

553.549:550.4:553.462/463(477)

М. З. Серебряна, Н. В. Тонкова

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

ОСОБЛИВОСТІ ЗОЛОТОВМІЩУЮЧИХ МІНЕРАЛІВ ТА РУД У ЗВ'ЯЗКУ З МОЖЛИВІСТЮ ВИКОРИСТАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ СПОСОБІВ ЗБАГАЧЕННЯ

Приведені дані досліджень характеру включення золота до піриту в сульфідно-кварцових родовищах та руйнація таких асоціацій в умовах біотехнологічного процесу.

Ключові слова: золотовміщуючі мінерали, біотехнологічне збагачення.

Приведены данные исследований характера включения золота в пирит в сульфидно-кварцевых золотосодержащих рудах и деструкция таких ассоциаций в условиях биотехнологического процесса.

Ключевые слова: золотосодержащие минералы, биотехнологическое обогащение.

It's lead the investigation results of nature aurum inclusions in pyrite into the sulfide-quartz ores and distruction that association biotechnological treatment over.

Key words: gold minerals, biotechnological reaching.

Золото – досить розсіяний елемент, але створює промислові концентрації. В природних умовах воно дуже стійке і тому легко накопичується в розсипах. Утім багато субмікроскопічні включення, що містяться у сульфідах, в умовах окислення проявляють здатність до міграції. Це зумовлює накопичення золота.

Великі промислові концентрації золота виявляються в гідротермальних родовищах, що сформувалися за високих, середніх та низьких температур. У метаморфізованих родовищах знаходиться головна маса запасів золотовміщуючих руд. Серед метаморфогенних родовищ виділяються наступні промислові типи: високотемпературні гідротермальні (скарнової формації, кварц-золото-сульфідно-силікатної формації); середньо температурні (золото-кварцової формації, золото-баритової формації, золото-сульфідної формації); низькотемпературні гідротермальні (золото-кварц-сульфідно-алунітової формації, золото-карбонатної формації); метаморфогенні золото-кварцові конгломерати.

З точки зору застосування біотехнологічних методів переробки золоторудних родовищ найбільшу цікавість представляють сульфідні формації. Тому детальніше ми зупинимося саме на них.

Золото-скарнова формація представлена невеликими родовищами, в яких золото пов'язане з сульфідами (піритом, піротином), покладеними на скарни.

Родовища кварц-золото-сульфідно-силікатної формації характеризуються невисоким, але рівномірним умістом сульфідів (10–20%), які розвинені у вигляді жил, лінз та смуг. Серед сульфідів відмічено наявність галеніту, піротину, піриту, арсеніопіриту та халькопіриту.

Родовища золото-кварцової формації представлені, головним чином, кварцом з незначними вкрапленнями сульфідів. Видиме золото частково пов'язане з сульфідними мінералами.

Золото-сульфідна формація представлена золото-колчеданними та золото-сульфідними родовищами. У золото-колчеданних родовищах золото субмікроскопічне та знаходиться в невеликих концентраціях у піриті та інших сульфідах.

Золото-поліметалічні родовища характеризуються підвищеним вмістом золота у первинних рудах.

Низькотемпературні гідротермальні родовища майже не вміщують золота, асоційованого з сульфідами.

Великі родовища Українського щита, що вміщують основні ресурси і розвідані запаси, відносяться до одного із провідних у світі промислових типів (золото-кварц-сульфідна формація стародавніх щитів).

Представлені дані свідчать про те, що частина родовищ та рудопроявів УЩ містять певну частину золота асоційованого з сульфідами, що є підставою для застосування у процесі збагачення цих руд технології біоокислення сульфідів, яка на цей час визнається найбільш економічним та екологічним способом вскриття золота у сульфідах.

Золото поряд з самородними формами має зв'язки з іншими хімічними елементами, що призводить до наявності багаточисельних форм знаходження золота.

Пірит – звичайний рудний мінерал у родовищах золота, який являється одним із головних концентраторів золота. Такі властивості піриту, як форма кристалів, хімічний склад, елементи-домішки, піроелектрика, дають інформацію щодо зруденіння, рудного потенціалу, глибини зруденіння та інше. Одним з головних питань при збагаченні сульфідно-кварцових золотовміщуючих руд є питання руйнації піриту з визволенням асоційованого з ним золота. Останнім часом розпочата розробка та використання сучасних методів щодо визначення характеру асоціацій золота з сульфідами та розробки критеріїв оцінки ступеню руйнування сульфідів під час їхнього біоокислення. За допомогою сучасних методів спектроскопії, рентгенодіагностики, електронного зонду, іонного мікроаналізу та мікрозондового аналізів дана оцінка перспективності використання способу біовилуження «стійких» сульфідних руд.

Дослідженнями форм знаходження Au у сульфідах, сульфоарсенідах, миш'яквміщуючих піритах та арсенопіритах, що виконані Т. Т. Chen [5], встановлено, що в арсенопіриті Au присутнє як у хімічно пов'язаному стані, так і в елементарній формі, розмір золотин дуже малий та складає за більшістю випадків не більше декількох нанометрів у діаметрі. Під час автоклавного окислення стійких золотовміщуючих руд під дією високих температур та тиску здійснюється руйнування піриту і арсенопіриту та виділення дуже малих часток Au, які концентруються на залишках вилуження [5].

При проведенні кристалографічного дослідження піриту після його біовилуження встановлено, що мікробіологічна руйнація кристалів піриту відбувається переважно по площинах (100, 111 та 210). При використанні мікроорганізмів *Bacteria* (мезофільні) та *Archaea* (термофільні) встановлено, що глибина вилуження досягає до 100 Мм [3].

Під час кристалографічного контролю домішок інших елементів у золотонесному піриті за допомогою електронного мікрозонда та зображенню на вторинних іонах та йонного мікроаналізу [6] було вивчено розподіл Au з іншими домішними елементами в рудній стадії піриту із високосульфідного Au-Ag-Cu родовища Паско пояса Ель-Індіго центральної та північної частинах Чілі. Зображення свідчать, що вміст Au та Cu мають концентрично зональний розподіл, а Ag, As, Te, Se – концентрично та секторіально зональне. Головні асоціації домішних елементів – As-Ag, As-Cu, Se-Te. Припускається, що перші дві асоціації відображають парне заміщення Fe тоді як Te і Se заміщують S під час прямого іонного обміну. Базуючись на подібності в зображенні секторальної зональності Ag та As автори припускають, що Ag входить до структури піриту завдяки пов'язаному заміщенню з As, в якому один атом Ag

Відомо, що As заміщують два атоми Fe, отримуючи $(Ag_{0,5}As_{0,5})S_2$ у вигляді Au^{+++} . Вхідження Au до піриту погоджується з інформацією щодо дуже високих температурних умов під час формування родовища Паскуа. Зональність за «невидимим» Au в поріджених домішками у піриті рудної стадії родовища Паскуа є першим зазначеним прикладом кристалографічного структурного контролю вмісту множини металевих елементів у піриті [6].

За допомогою методу гідротермальної термоградієнтної співкристалізації елементів при 450 °C, тиску 1 кбар та різних активностях S у присутності домішок As та Se Смагуновим із соавторами [2] вивчено розподіл Au між піротитом і гринокітом. Структурна складова домішок золота в мінералах знайдена під час визначення статистичних вибірок аналітичних даних для монокристалів. При визначенні золота в окремих кристалах використовувався атомно-абсорбційний аналіз з графітовим атомізатором. Найбільший вміст золота встановлено в залізистому гринокіті – (10 ± 2) г/т. Закономірна зміна вмісту золота у співіснуючих фазах відзначена тільки у системі «стехіометричний піротин – гринокіт», де коефіцієнт розподілу $K_{Au}^{Po/Cr}$ досягає $(2,5 \pm 0,9)$. Це вказує на структурний характер домішок золота в $Fe_{0,1}S$ та дозволяє зробити оцінку межі входження золота в (25 ± 9) г/т [2].

За допомогою електронного мікрозонду Mikulski [8] зроблено аналіз співвідношення Co/Ni, вмісту міді та золота у піриті із родовища Радоміце та Клекта. Різке співвідношення Co/Ni відтворює різні умови формування кристалів піриту: від низьодіагенетичних та метаморфічних до гідротермальних. Форма кристалів піриту різноманітна – від фрамбоїдальних мікрозерен до ідіоморфних та ксеноморфних кристалів розміром декілька мм. У родовищі Радоміце збагаченість піриту «невидимим» Au (до 450 г/т) добре корелюється з домішками As, частка яких досягає 3,1 %. Російськими вченими [1] під час дослідження золото-срібних родовищ північно-східної Росії встановлені дві форми входження «невидимого» Au у пірит – сорбційна та структурна, з них більшість – сорбційна. Причина формування високих концентрацій «невидимого» золота у піриті – сорбція під час утворення комплексних сполук та комплексів, які вміщують Au та його елементи-супутники, наприклад As. На думку авторів під час розпаду вони залишають на поверхні кристалів мікрочастки Au та, можливо, більш складні метастабільні Au – вміщуючі мікрофази.

Необхідно визначити, що останнім часом велика кількість праць з біовилучення Au та вивчення теоретичних аспектів цього процесу проводиться в Китаї [4; 7; 9]. Характеристика родовища золота Макаоке (північно-західний Китай) показала, що основні золотовміщуючі мінерали – пірит, арсенопірит, стібніт, реальгар та лимоніт. Виділені дві генерації піриту – осадово-діагенетична та гідротермальна, найвищий вміст золота знайдено в дрібних кристалах. Дрібні виділення стібніту та реальгару також вміщують більше золота, ніж більші за масою утворення. У лимоніті присутні достатньо великі золотини. Автори висувають гіпотезу, що формування родовища відбувалося за три етапи: осадово-діагенетичний, гідротермальний та гіпергенний [9].

Мікроморфологічний аналіз піриту із золотовміщуючого родовища Сяоцинлін, який проводився різними методами з вивченням негативної штриховки та морфологічної грані піриту /210/, показав, що грані піриту /210/ – це F-грані, які утворюють шари вільного росту. Механізм кристалічного росту контролюється площиною нуклеації. Позитивна штриховка на гранях формується за рахунок скупчення зростання на гранях /100/, а інша позитивна штриховка на гранях /210/ формується за рахунок

скупчення зростання на гранях /210/. Спостереження на просвітлюючому електронному мікроскопі вказують, що кристали з негативною штриховкою формуються за рахунок автоепітаксимального осадження на зростаючому кристалі блока зародку діаметром від 30 нм до 50 нм. Окрім знахідки на родовищі Шаканай в Японії, кристали піриту з негативною штриховкою також утворюються на золоторудних родовищах у кварц-сульфідних жилах [7].

Золоторудне родовище Доуланьсай, досліджене Guodong Chen [4], вважається середнім за масштабами зрудення та характеризується ламко-пластичною зоною розсланцювання. Пірит є звичайним рудним матеріалом. Пірит, який не є золотоносним, має дуже просту морфологію, тоді як форми виділення золотоносного – складні. Геохімічні дослідження показали, що склад піриту змінюється від $Fe_{1,05} - S_2$ до $Fe_{0,941} - S_2$. Золото позитивно корелюється з Mn, Sr, Zn, Te, Pb, Ba та Ag. У піриті розрізняють 4 групи домішних елементів: Fe-Cu-Sr-Ag, Au-Te-Co, As-Pb-Zn, Mn-V-Ti-Ba-Ni-Cr.

Детальний мінералогічний аналіз характеру зростання піриту з золотом розпочато тільки в останні роки, особливо у зв'язку з впровадженням біотехнологічних методів переробки «стійких» руд та й подальше ширше використовуватися для вивчення та встановлення механізмів тих процесів, які протікають при взаємодії сульфідних мінералів з вилужуючими їх мікроорганізмами.

Бібліографічні посилання

1. Кравцова, Р. Г. Формы нахождения Au в рудах золото-серебряных месторождений (Северо-Востока России) / Р. Г. Кравцова, В. Л. Таусон // Труды 2-го Международного симпозиума «Золото Сибири: геология, геохимия, технология, экономика». – Красноярск, 2001. – С. 47–49.
2. Смагунов, Н. В. Особенности фазового соответствия при распределении золота между совместно растущими кристаллами гринокитаи пирротина / Н. В. Смагунов, В. Л. Таусон, Т. М. Пастушкова и др. // Геохимия. – Иркутск, 2004. – №11. – С. 1203–1212.
3. Etzel K. Crystallographic effects on microbial pyrite leaching / K. Etzel, J. Toporski, W. Depmeier, H. Huber // Schriftenr. Dtsch. Ges. Geowiss. – 2005. – №39. – P. 93.
4. Guodong Cheh. Geochemical characteristics of pyrite in Duolan gold deposit, Xinjiang / Cheh Guodong, Xiao Huiliang, Zhou Jiuyan // J. Geochem. – 2005. – №3. – P. 280–288.
5. Chen T. T. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues / T. T. Chen, L. J. Cabri, J. E. Dutrizac // Metals and Mater. – 2002. – № 12. – P. 20–22.
6. Chouinard Annick. Crystallographic controls on trace-elements incorporation in auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina / Annick Chouinard, Jeanne Paquette, E. Anthony Williams-Jones // Can Mineral. – 2005. – №3. – P. 951–963.
7. Liang-ju Zhang. Исследование микроморфологии кристаллов пирита в золотоносной кварцевой жиле золоторудного месторождения Сяоцинлин // Acta petrol. Et mineral. – 2004. – №2. – С. 167–172.
8. Mikulski Stanislaw Z. Co, Ni, As and Au distribution within pyrite from the radomice and Klecza abandoned gold deposits (Kaczawa Mts) / Z. Stanislaw Mikulski, Boguslaw Baginski, Piotr Dzierzanowski // Scientific Communication. – Krakow, 2005. – P. 211–214.
9. Shao-hong Fu. Характеристика золотосодержащих минералов и их генетическое значение (золотое месторождение Манаоке, северо-западный Сычуань, Китай) / Fu Shao-hong, Gu Xue-xiang, Wang Ping // Chendu Inst. Technol. – 2002. – №4. – С. 422–427.

Надійшла до редколегії 20.12.09