

УДК 504.42. 553.411.06:579.266) (262.5)

## БІОМІНЕРАЛІЗАЦІЯ ЗОЛОТА В ОСАДОВИХ КОМПЛЕКСАХ УКРАЇНИ ТА ЇЇ ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Ковальчук М. С., Фігура Л. А.  
Інститут геологічних наук НАН України, Київ

Дослідження золотоносності осадових комплексів України дозволило встановити широкий розвиток біомінералізації золота як у древніх, так і в сучасних континентальних (кори вивітрювання, зони окиснення та делювіально-пролювіальні, алювіальні відклади, що утворилися за рахунок розмиву перших двох) та морських (прибережно-морські, морські) утвореннях. Виявлено, що біогенному золоту притаманні певні морфологічні ознаки. Показано роль органічної речовини в стабілізації екосистеми та в процесах рудогенезу.

Вивчення питання про внесок речовини земної кори в біогенез та життєзабезпечення організмів призводить до розуміння існування функціонального зв'язку живої клітини з мінеральним субстратом. Мікроорганізми відіграють значну роль у геологічних процесах, головним чином у процесах вивітрювання гірських порід, у формуванні родовищ корисних копалин, перевідкладенні і концентрації речовини, деяких порід та корисних копалин. Утворення багатьох осадових порід можна пов'язати з діяльністю мікробів (зокрема фосфоритів, карбонатів, високовуглецевих порід та ін.). Так, генезис фосфоритів на сучасних підводних окраїнах континентів пов'язаний з явищем прибережного апвелінга, який забезпечує високу біологічну продуктивність фітопланктону, накопичення збагачених рухомим фосфором біогенних осадків і формування в них діагенетичних фосфатних стяжиль [1]. Для докембрійських і ранньопалеозойських нафтоматеринських товщ встановлена наявність викопних ціанобактеріальних матів, а ріст галобактерій відмічено на поверхні рапи, котра стає червоною (отже рожеві чи червоні прошарки в солях цілком ймовірно пов'язані з активністю галобактерій) [12]. При нагромадженні глинистих осадків бактерії відіграють роль організатора транспорту глинистих частинок на дно водоймища та каталізують утворення аутигенних силікатів в слизових чохлах ціанобактерій [12]. Величезну роботу органічна речовина виконує і при утворенні кір вивітрювання, зон окиснення та формуванні зон вторинного збагачення металів і мінералів. За допомогою бактерій інколи формуються сполуки урану, міді та золоті псевдоморфози [12]. Органічна речовина сприяє концентрації певних елементів чи їхніх сполук (метаболізм елементоспецифічних мікробів, рослини, тварин), є каталізатором чи фільтром (осаджуючи, наприклад, рідкісноземельні елементи).

Участь мікроорганізмів в геологічних процесах почалась в архей і продовжується сьогодні. Найбільш активно ці процеси відбуваються сьогодні в океанах (Атлантичний, Тихий), в дещо меншому масштабі – окраїнних та внутрішніх морських водоймах (Червоне, Чорне та ін. моря). Для розквіту органічного життя, в тому числі і бактеріального, необхідна енергія. Частина з них отримує енергію від Сонця (мілководні басейни, кори вивітрювання, зони окиснення), інші ж існують завдяки ендегенній енергії Землі (глибоководні частини водних басейнів), решта – за рахунок поєднання видів енергії. Серед рудних корисних копалин в океанах і морях виділяють гідротермальні сульфідні побудови на поверхні дна; сульфідну мінералізацію в товщі океанічної кори (придонні утворення); залізо-марганцеві конкреції на дні глибоководних западин; металеносні осадки; прибережно-морські розсипи. Як правило, утворення цих корисних копалин нерозривно пов'язане з життєдіяльністю організмів, і тому їх просторове та батиметричне положення пов'язане з місцями розквіту органічного життя, яке в свою чергу залежить від наявності джерела енергії (підводні вулкани, підводні грязьові вулкани, сіпи, гідротермальні джерела, вершини і схили підводних гір).

У місцях виходу ендегенної речовини відбувається насичення води та донних осадків токсичними струменями гарячої води (сірководнем, метаном тощо), металами. Геохімічні процеси, що відбуваються у місцях виходу флюїду в морську воду, визначаються законами змішування флюїду і морської води. Частина елементів змінює концентрацію у відповідності з розбавленням флюїду водою, частина вступає в реакції і зв'язується у новоутворених мінералах, бере участь у процесах сорбції і бактеріального хемосинтезу. Хоча місця виходу на поверхню дна гідротермальних джерел мають температуру 250–400 °С, вони характеризуються знач-

ним розквітом мікроорганізмів, різні угруповання яких з'являються починаючи з температур близько 100 °С [9]. У водах над гідротермальними джерелами інколи утворюються водозакрути бактерій, що нагадують живий бульйон. Тут вченими встановлено багато невідомих раніше видів живих організмів, які існують за підвищеної температури і у середовищі, збагаченому сірководнем. Однак найбільший розквіт життя встановлено на деякій відстані від місць виходу гарячих джерел, де температура води значно нижча і сприятливіша для життєдіяльності живих організмів, а сама вода насичена мікроелементами, що надійшли з надр. Поблизу гідротерм біомаса досягає сотень кілограмів на 1 м<sup>2</sup>. Серед організмів, які в значній кількості концентруються поблизу виходу гідротерм є перш за все бактерії і мікроорганізми, які активно поглинають метан, сірководень та метали. Вони не тільки очищують морську воду від шкідливих речовин (природно регулюють екосистему), стають основою харчового ланцюга (за їхній рахунок існує багато видів вищих організмів), що призводить до створення оазису життя поблизу гідротермальних плямів, сипів, підводних грязьових вулканів, а й переводять метали в металічний стан. В місцях виходу гідротерм вченими були відкриті найбільші і найменші роди бактерій, які активно сприяють осажденню металів та формуванню мінералів.

На думку деяких вчених [8, 9], у гідротермальному факелі існує дві сорбційні системи, спрямовані на переведення розчинних форм елементів флюїду і морської води у суспендований стан і співосаждення в донні відклади. Третя система регулює перехід розчинених газів в донні осади хемосинтезуючими бактеріями (захоплення H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, вуглекислоти, біогенних елементів і металів в процесі хемосинтезу) [9]. При віддаленні від джерела енергії відбувається пониження температури, що знаходить своє відображення у зміні мінералотворних стадій: сульфідної (високотемпературної) на сульфатну Fe-силікатну (нонтронітову), яка замінюється Fe-оксигідратною та Mn-оксигідратною [8, 9]. Явище мінералогічної зональності, проявлене у місцезнаходженні певних видів корисних копалин залежно від віддаленості від джерела енергії і є пошуковим критерієм, за допомогою якого можливе вирішення й оберненої задачі.

Дослідження золотоносності осадових комплексів України дозволило встановити широкий розвиток біомінералізації золота як у древніх, так і в сучасних континентальних (кори вивітрювання, зони окиснення та делювіально-пролювіальні, алювіальні відклади, що утворилися за рахунок розмиву перших

двох) та морських (прибережно-морські, морські) утвореннях.

В утвореннях архею, раннього протерозою, палеозою біогенне золото домінує над кластогенним, оскільки значні території континентів в цей час були покриті мілководними морськими басейнами, значна частина дна яких знаходилась в межах зони фотосинтезу і де бурхливо розвивались мікроорганізми, забезпечуючи концентрацію золотоносних розчинів в осадах та переведення золота в металічний стан. Надходження золота в морські водойми забезпечувалось зносом металу з континентів та активною вулканічною діяльністю цього часу. У мезозої і, особливо, кайнозої кластогенні прояви золота переважають.

Участь органічної речовини у процесах біомінералізації золота проявляється у мобілізації, міграції та концентрації золота і його сполук (металоорганічних, метастабільних) на різних стадіях літогенезу; каталізацією та регулюванням процесів і параметрів мінералоутворення; безпосереднім входженням мікроорганізмів у механізм еволюції мінералу. Типовим прикладом індукованої біомінералізації золота є мінералогічна сторона життєдіяльності тіонових і сульфатредуючих бактерій, яка широко проявляється в елювіальних і морських фаціальних умовах. При окисненні сульфідів за допомогою тіонових бактерій, золото, яке містилось у них, виділяється у самородній формі, або у вигляді металоносного комплексу в гіпергенному розчині. У процесі сульфатредукції бактерії забезпечують генерацію сірководню, який в подальшому трансформується у золотовмісні сульфідні мінерали. Так чи інакше, процес, індукований бактеріями, завершується мінералізацією. Окрім цього спостерігаються процеси відкладення золота на фосилізованій органічній речовині у вигляді тонких крихких плівок, або дрібнозернистих виділень та на стінках раковин черепашок (як результат метаболізму). Особливої уваги (за своєю масштабністю і золотоносним потенціалом) представляє біомінералізація золота на пластинках глинистих силікатів (головне каолініту). Оскільки структурна впорядкованість каолініту вища, а ентропія нижча, ніж монтморилоніту, то активність взаємодії каолініту з біокосною системою значно вища. Завдяки цьому органічні молекули розташовуються не тільки на поверхні пластинок каолініту, а й у міжшаровому просторі. Наявність органічної речовини та дислокаційність кристалічної ґратки є запорукою концентрації золота в каолініті.

У осадах морського генезису спостерігається прямий кореляційний зв'язок між вмістом золота та

кількістю органічної речовини. Відмічається сорбція золота на відмерлих органічних залишках і тонкій мінеральній речовині, що знаходиться у плавучому стані. Роботами попередників і авторів встановлено, що низка мікроорганізмів, зосереджених у придонному шарі води та у верхній частині осадків, інтенсивно акумулює тонкодисперсне золото як своєю поверхнею так і продуктами метаболізму. При фосилізації органічної речовини хлориди золота відновлюються до колоїдних частинок, котрі в подальшому зазнають сукупну кристалізацію.

Мікроби та бактерії часто мають просту морфологію – кульки, крапельки, нитки, палички, гантелі, веретена тощо [3]. Золоту, яке утворилося при участі органічної речовини притаманні подібні морфологічні риси. Це, як правило, луски, куле-, крапле-, гантеле-, грудко-, паличко- та амебоподібні, дуже високопробні ( $Au > 95,0\%$ ) утворення, які характеризуються певною внутрішньою мікоморфологією (зокрема повторюють скелет організмів, по яких золото утворює псевдоморфози та ін.).

Таким чином, процеси морського рудогенезу відбуваються за активної діяльності органічної речовини, яка забезпечує підвищену біопродуктивність районів "ендогенного дихання" планети, формування на дні рудних корисних копалин та очищення води від шкідливих речовин (за рахунок переведення їх у металоносні осадки і рудні мінерали, поглинання в результаті життєдіяльності). Місця "ендогенного дихання" планети можуть бути не тільки пошуковим критерієм на виявлення покладів корисних копалин, а й критерієм виявлення місць біопродуктивності морських басейнів (зокрема Чорного моря).

Широкий прояв біомінералізації золота в осадових товщах України, дозволяє стверджувати, що золото найближчим часом може поповнити ряд біомінералів, яких на сьогоднішній день встановлено близько чотирьох десятків. Окрім цього, цілеспрямовані палеогеографічні, літологічні та палеонтологічні дослідження епіконтинентальних басейнів минулого на території України дозволять ефективно прогнозувати корисні копалини (в тому числі і золото) на території України.

1. Батурич Г. Н. Фосфорити на подводных горах // *Природа*. – 1996. – № 8. С. 3–13.
2. Богданов Ю. А., Гурвич Е. Г., Бутозова Г. Ю. и др. Металлоносные осадки Красного моря. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
3. Громов Б. В. Цианобактерии в биосфере // *Соросовский Образовательный журнал*, 1996. – № 9. – С. 35–39.
4. Ковальчук М. С. Морфогенетична класифікація золота з осадових комплексів України // *Геол. журн.* – 2000. – № 3. – С. 54 – 73.
5. Ковальчук М. С. Золотоносність осадових комплексів України // *Мінерал.* 36. Львівськ. ун-ту, 2001. – № 51. – Вип. 1. – С. 75–87.
6. Ковальчук М. С. Особенности формирования золотоносности осадков Черного моря // *Метасоматизм, рудообразование, полезные ископаемые*. – Сб. науч. работ ИГОС НАН и МЧС Украины, 2003. – Вип. 7. – С. 317–326.
7. Ленин А. Ю., Пименов Н. В., Виноградов М. Е., Иванов М. В. Скорость CO<sub>2</sub>-ассимиляции и бактериальная продукция органического вещества на гидротермальных полях 26° с. ш. и 29° с. ш. Средне-Атлантического хребта // *Океанология*. – 1997. – 37, № 3. – С. 396–407.
8. Лисицын А. П., Богданов Ю. А., Мурдма И. О. Металлоносные осадки и их генезис // *Геолого-геофизические исследования в юго-восточной части Тихого океана*. – М.: Наука, 1976. – С. 289–379.
9. Лисицын А. П., Богданов Ю. А., Гурвич Е. Г. Гидротермальные образования рифтовых зон океана. – М.: Наука, 1990. – 256 с.
10. Перцов Н. В., Ульберг З. Р., Коган Б. С. и др. Механизм биогенного концентрирования металлов в шельфовых зонах дефицита наносов // *Геохимия*. – 1990. – № 1. – С. 112–116.
11. Пещевский Б. И., Антошин Г. Н., Эренбург А. М. О химических формах золота в морской воде // *Докл. АН СССР*. – 1965. – 162, № 4. – С. 915–918.
12. Розанов А. Ю. Ископаемые бактерии и новый взгляд на процессы осадкообразования // *Соросовский общеобразовательный журнал*, 1999. – № 10. – С. 63–67.
13. Тамбиев С. Б. Биоседиментация марганца в районах разгрузки глубоководных гидротермальных источников (по материалам из седиментационных ловушек) // *Докл. АН СССР*. – 1989. – 307, № 2. – С. 457–461.
14. Фишер Э. И., Фишер В. Л. Роль гумусовых кислот в процессе сорбции золота морскими осадками // *Литология и полезные ископаемые*. – 1984. – № 5. – С. 77–82.
15. Шнюков Е. Ф. Поиски месторождений мелкого и тонкого золота в Азово-Черноморском регионе – важная геологическая проблема XXI века // *Геологические проблемы Черного моря*. – Киев, 2001. – С. 11–22.