

О. М. Лавриненко, І. І. Волобаєв, В. А. Прокопенко

## Утворення феригідриту біогенного та хімічного походження і взаємодія біокомпозитів на його основі з частинками золота

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Б. Бриком)

*Проведено дослідження процесу формування біокомпозитів на основі клітин мікрободорості *Chlorella vulg.* та ферумокисигенвмісних мінеральних фаз, утворених в їх структурі за рахунок відновної сорбції феруму з водних розчинів  $\text{FeCl}_3$ . Встановлено залежність складу мінеральних фаз у структурі біокомпозита від вихідної концентрації електроліту, з яким контактують клітини *Chlorella vulg.* Для визначення впливу природи ферумокисигенвмісних мінеральних фаз на ефективність отриманих біокомпозитів модельною системою вибрано процес хімічної корозії на поверхні сталі. Показано, що найінтенсивніше вилучення золота (87%) з дисперсій проходить при їх взаємодії з біокомпозитом на основі клітин мікрободорості *Chlorella vulg.* з відновленими в їх структурних елементах частинками феригідриту.*

На сьогодні все більшого практичного застосування знаходять нанобіопродукти та нанобіотехнології, які ґрунтуються на використанні біологічних об'єктів і наночастинок, зокрема металів. Одним з актуальних напрямів розвитку таких систем є створення нових реагентів-флокулянтів, спрямованих на вилучення тонкодисперсного золота з тривних руд [1, 2]. Використання металофільних клітин мікроорганізмів як високовибіркових флокулянтів для ультрадисперсних частинок золота вже визнано ефективним і перспективним [3, 4]. Подальший крок у розв'язанні проблеми видобутку високодисперсного золота полягає в сумісності адоптованих до золота клітин з ультрадисперсними частинками сполук феруму, який відрізняється високою геохімічною спорідненістю стосовно золота [5]. Використання комплексного флокулянта дасть змогу залучити до технологічних схем збагачення золота процеси магнітної сепарації, селективної магнітної флокуляції та деякі інші.

Відомо, що одним з представників нанорозмірних ферум окисигенвмісних мінералів, що утворюється внаслідок проходження окисно-відновних реакцій у клітинах мікроорганізмів, є дволінійний феригідрит. За сприятливих умов феригідрит може перетворюватися на інші мінеральні фази, а саме, гетит, магнетит,  $\text{Fe(II)-Fe(III)}$  шаруваті подвійні гідроксиди (*Green Rust*) тощо [6]. В умовах навколишнього середовища феригідрит, як і інші ферумокисигенвмісні мінеральні фази, утворюється на поверхні заліза та сталей у ході корозійного процесу, зокрема в системах проникних реактивних бар'єрів [7]. Для вивчення процесу формування нанорозмірних частинок феригідриту хімічним (корозійним) шляхом модельною системою було вибрано систему залізного (сталевого) електрода за умов контакту його поверхні з дисперсійним середовищем, яке містить аквагідроксоформи феруму (III), та киснем повітря або з іншим окисником [8].

*Мета представленої роботи* полягала в дослідженні процесів біогенного формування та перетворення ферумокисигенвмісних мінеральних фаз у клітинах мікрободоростей, їх фазо-

вого складу та структури; порівняння властивостей фаз біогенного походження з подібними фазами, отриманими при проходженні хімічного (корозійного) процесу, а також у розгляді механізму взаємодії частинок феригідриту та біокомпозитів на їх основі з частинками золота.

**Об'єкти та методи дослідження.** Біокомпозити, які містять клітини мікроводоростей та ультрадисперсні частинки сполук феруму, отримували шляхом відновної сорбції клітинами іонів феруму (III) з водних розчинів. Формування наночастинок металу зумовлене утворенням екзометаболітів, головним чином, полісахаридів, які містять альдегідні та спиртові групи, і характеризуються наявністю сильних відновних властивостей. Центрами нуклеації таких структур можуть слугувати амінокислотні ділянки (групи) поліпептидів, які несуть негативний заряд та утримують катіони або кластери за рахунок електростатичних сил. В експериментах було використано мікроводорості *Chlorella vulg. Larg 3*, які зрощені на середовищі Тамія [9], з колекції Інституту біологічної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАН України. Час контакту клітин з електролітом тривав 30 хв.

Для введення в клітини феруму використовували електроліт на основі хлориду феруму (III). Загальну кількість феруму, акумульованого клітинами, визначали методом титрування. Формування частинок феригідриту хімічного (корозійного) походження проводили в лабораторних умовах на поверхні сталевого електрода (Ст 3), який контактував з водним дисперсійним середовищем і киснем повітря [10]. Як дисперсійне середовище було використано водні розчини сульфату феруму (III) з концентрацією  $C_{\text{Fe(III)}} = 100 \text{ мг/дм}^3$ ; значення рН 3,5; окиснення системи — помірне. Частина дослідів проводили за умов контакту сталі з дистильованою водою (рН 6,5) за умов вільного надходження окисника в зону реакції.

Золі золота з розміром частинок 40–80 нм синтезували за методикою, описаною в публікації [11]. Рентгенофазовий аналіз (РФА) зразків ферумокисневмісних сполук проводили на дифрактометрі ДРОН-УМ1 з двома щілинами Солера та фільтруванням  $\text{Co}_{K\alpha}$ -випромінювання нікелевим фільтром; швидкість зйомки 1 град/хв, граничний кут Вульфа-Брега —  $80^\circ$ . Ідентифікацію фазового складу ферумокисневмісних сполук та нанобіокомпозитів проводили згідно з даними картотеки *ASTM (Powder Diffraction File/International Centre for Diffraction Data/Swarthmore, Pennsylvania, USA, 1977)*. Інтенсивність взаємодії отриманих частинок феригідриту та біокомпозитів з частинками золота оцінювали методом нефелометрії на фотоелектрокалориметрі ФЕК-56 М за стандартною методикою [12].

**Результати та їх обговорення.** Фазовий склад і дисперсність ферумокисневмісних фаз, утворених в процесі відновної сорбції в клітинних структурах мікроводорості, можна простежити за даними рентгеноструктурного аналізу, результати якого представлені на рис. 1.

Дослідження процесу формування нанорозмірних ферумокисневмісних мінеральних фаз в клітинах мікроводоростей проводили залежно від часу їх контакту з дисперсійним середовищем та концентрації в ньому хлориду феруму (III). Рентгенограми вихідних клітин мікроводоростей та клітин, які контактували з водними розчинами  $\text{FeCl}_3$  при концентраціях, моль/дм<sup>3</sup>:  $C_{\text{Fe(III)}} = 10^{-3}$ ,  $C_{\text{Fe(III)}} = 10^{-2}$ ,  $C_{\text{Fe(III)}} = 10^{-1}$  впродовж 30 хв. Згідно з даними РФА (див. а на рис. 1), вихідні клітини містять у своїй структурі частинки хлориду феруму (III), рефлекс якого відбиваються на 0,55 нм; 0,436; 0,385; 0,303; 0,286; 0,224; 0,203; 0,199; 0,190; 0,165 й 0,160 нм. При контакті клітинної маси з  $10^{-3}$  моль розчинном хлориду феруму (III) у ній починається процес формування слабо окристалізованих ферумокисневмісних мінеральних фаз: феригідриту  $\text{Fe}_5\text{O}_3(\text{OH})_9$  та продуктів його перетворення — лепідокрокіту  $\gamma\text{-FeOOH}$ , гетиту  $\alpha\text{-FeOOH}$  і магнетиту  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ . У той час як

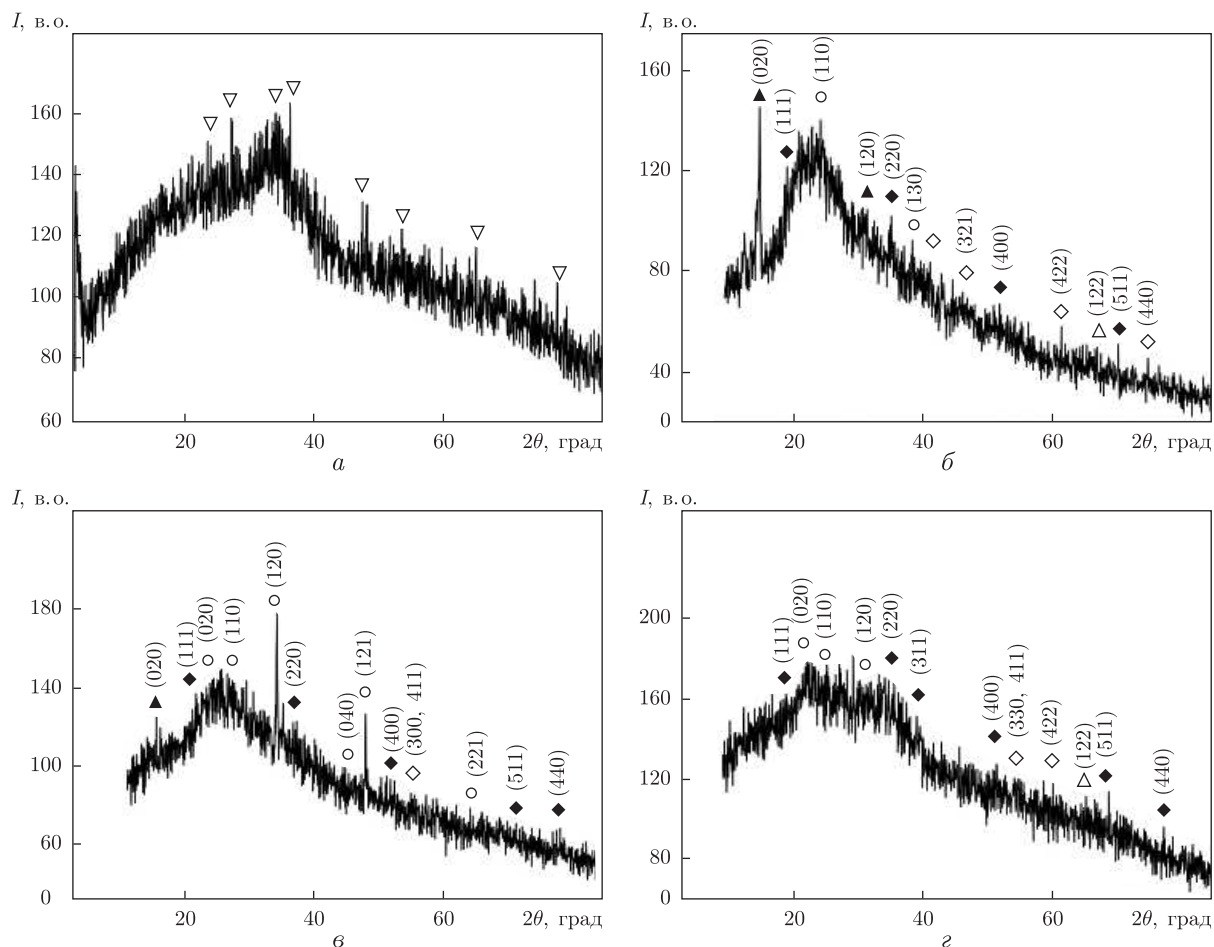


Рис. 1. Ферумокисневмісні мінеральні фази, що утворені в структурі клітинної маси при її контакті з водними розчинами хлориду феруму (III): *a* – вихідні клітини мікрободоростей; *б* –  $C_{\text{Fe(III)}} = 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup>; *в* –  $C_{\text{Fe(III)}} = 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup>; *г* –  $C_{\text{Fe(III)}} = 10^{-1}$  моль/дм<sup>3</sup>.

Умовні позначення мінеральних фаз:  $\nabla$  – хлорид феруму (III)  $\text{FeCl}_3$ ;  $\circ$  – гетит  $\alpha\text{-FeOOH}$ ;  $\blacktriangle$  – лепідокрокит  $\gamma\text{-FeOOH}$ ;  $\blacklozenge$  – магнетит  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ;  $\triangle$  – феригідрит  $\text{Fe}_5\text{O}_3(\text{OH})_9$ ;  $\diamond$  – гематит  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

фаза лепідокрокиту відбивається лише на малих кутах (площини (020) й (120)), рефлексії гетиту та феригідриту представлені в повному обсязі. Розмір кристалітів лепідокрокиту (площина (020)), розрахований за рівнянням Шерера, становить  $\sim 38,8$  нм, гетиту (площина (110)) – 137,6 нм, феригідриту (площина (311)) – близько 170 нм. Магнетит, який утворюється у клітинах мікрободоростей в ході подальших фазових перетворень, дає дифракційні відбиття від площин (111), (220), (311), (400), (511), (440). Розмір його кристалітів, згідно з проведеними розрахунками, не перебільшує 130 нм. Збільшення вихідного вмісту феруму (III) до  $10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup> призводить до зміни фазового складу ферумокисневмісних частинок: у структурі клітинної маси головною фазою стає продукт перетворення феригідриту – гетит  $\alpha\text{-FeOOH}$ , максимальні піки якого відбиваються від площин (120) й (121), другою, за значенням, фазою – магнетит  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ . Розмір кристалітів гетиту зменшується до 27,8 нм, а магнетиту та феригідриту – практично не змінюється.

Важливо зазначити, що процес відновлення феруму (III) з утворенням ферумокисневмісних сполук, за однаковою тривалістю відновлення, залежить від концентрації електро-

літу, що, імовірно, пов'язано з досягненням необхідної для цього концентрації іонів поблизу активного центра (табл. 1). При малих концентраціях у клітинах нагромаджується переважно хлорид феруму (III). При збільшенні вихідної концентрації феруму в складі біокомпозита з'являється фаза феригідриту, а також стійкіші та більш окристалізовані фази лепідокрокіту та гетиту. Подальше збільшення в розчині вихідного вмісту феруму (III) призводить до зникнення із складу біокомпозита фази лепідокрокіту, на зміну якої приходить фаза магнетиту. Саме наявність фази  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  надає осаду біокомпозитів магнітні властивості, що встановлені нами в попередньому дослідженні [3]. Такому мінеральному складу біокомпозита відповідають мінімальні розміри кристалітів гетиту — 27,8 нм при сталих значеннях розмірів кристалітів магнетиту і феригідриту.

Для вивчення процесу формування та фазових перетворень ферумокисневмісних мінеральних фаз хімічним шляхом модельною системою було вибрано метод їх отримання на межі розділу поверхня сталі–водне дисперсійне середовище–кисень повітря. Процес реалізувався при обертанні сталевого електрода за умов змінного контакту його поверхні з водним розчином, який містив аквагідроксоформи феруму (III), та повітрям, що створювало в системі окисні умови. Результати дослідження ілюструє рис. 2.

Процес формування зародкових ферумокисневмісних мінеральних фаз у системах на основі залізвуглецевих сплавів зумовлений проходженням просторово розділеної окисно-відновної реакції анодного розчинення залізної складової сталі з надходженням у дисперсійне середовище катіонів феруму (II) та відновлення кисню на її катодних ділянках, яке, залежно від значення рН, супроводжується потраплянням в дисперсійне середовище гідроксилу або зв'язуванням в ньому протонів [13]. За умов відкритої системи, зона реакції насичується кисневмісними сполуками вуглецю та киснем повітря, який сприяє окисненню та гідролізу феруму з утворенням реакційно здатних аквагідроксоформ  $\text{Fe(II)}$  й  $\text{Fe(III)}$ . Забезпечення змінного контакту поверхні сталі з киснем та дисперсійним середовищем підтримує безперервність окисно-відновного процесу та призводить до постійного надходження  $\text{Fe(II)}$  в зону реакції, якій каталізує формування ферумокисневмісних сполук та їх фазових перетворень.

Колоїдно-хімічний механізм зародження феригідриту в системах на основі заліза та сталей залежить від хімічного складу дисперсійного середовища, з яким контактує поверхня металу, та окисних умов. Зокрема, при наявності у дисперсійному середовищі неорганічних солей феруму (III), у перші хвилини його контакту з поверхнею сталі в зоні реакції проходить гідроліз  $\text{Fe(III)}$  та осадження фази гідроксиду за реакцією:



За таких умов утворення феригідриту може проходити шляхом упорядкування структури аморфного осаду  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  з видаленням води (згідно з реакцією поліконденсації), тобто

Таблиця 1. Вилучення частинок золота з водних золів клітинною масою різного фазового складу та масового вмісту ферумокисневмісних сполук

Вміст феруму в клітинах, % (мас.)	Ферумокисневмісні мінеральні фази, що утворені в клітинній масі
0,0051 (вихідні клітини)	<b><math>\text{FeCl}_3</math></b>
0,21	$\gamma\text{-FeOOH}$ , $\alpha\text{-FeOOH}$ , $\text{Fe}_5\text{O}_3(\text{OH})_9$
0,47	$\alpha\text{-FeOOH}$ , $\text{Fe}_5\text{O}_3(\text{OH})_9$ , <b><math>\text{FeFe}_2\text{O}_4</math></b>
0,75	$\alpha\text{-FeOOH}$ , $\text{Fe}_5\text{O}_3(\text{OH})_9$ , $\text{FeFe}_2\text{O}_4$

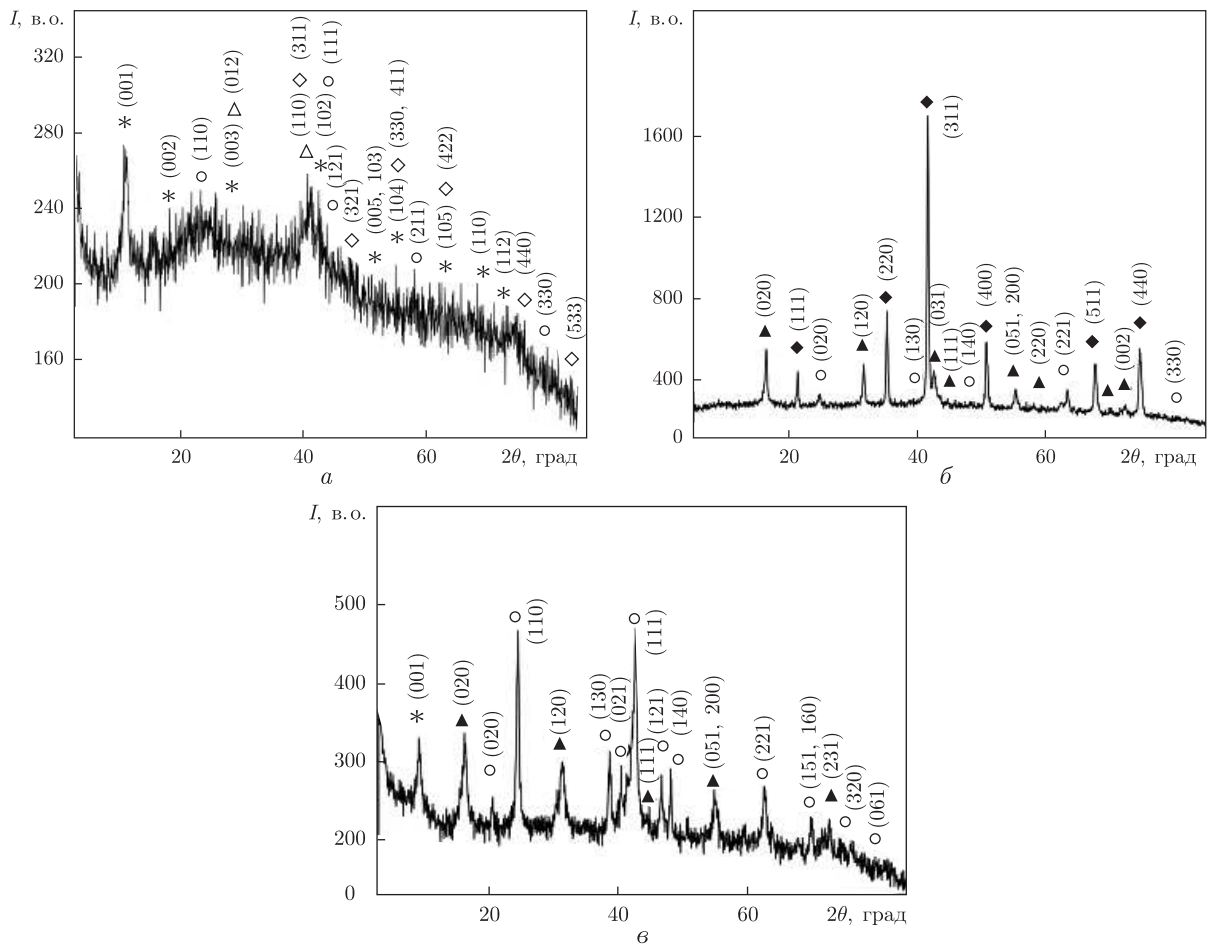


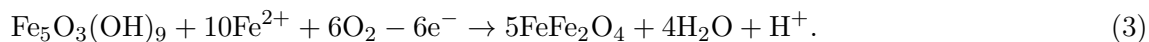
Рис. 2. Ферумокисневмісні мінеральні фази, що утворені на поверхні сталі при її контакті з водними розчинами сульфату феруму (III): *a* – суміш зародкових фаз Green Rust, феригідриту та гетиту; *b* – фази магнетиту та лепідокрокіту з домішкою гетиту, що утворені за умов помірного окиснення системи; *c* – фази гетиту та лепідокрокіту, що утворені за умов інтенсивного окиснення системи.  
 Умовні позначення мінеральних фаз: \* – гідроксисульфатний Green Rust; ○ – гетит  $\alpha$ -FeOОН; ▲ – лепідокрокіт  $\gamma$ -FeOОН; ◆ – магнетит  $FeFe_2O_4$ ; △ – феригідрит  $Fe_5O_3(OH)_9$ ; ◇ – гематит  $\alpha$ -Fe $_2$ O $_3$

має місце двостадійний процес: осадження гідроксиду феруму (III) за реакцією (1) та його подальше перетворення на феригідрит за реакцією:

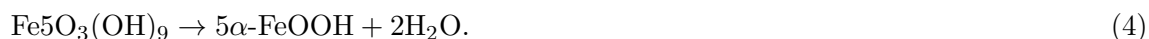


За умов навколишнього середовища феригідрит нестійкий і швидко перетворюється на стійкіші мінеральні фази, які належать до структурного  $\alpha$ -ряду: гетит  $\alpha$ -FeOОН, гематит  $\alpha$ -Fe $_2$ O $_3$ , або на фази структурного  $\gamma$ -ряду: Fe(II)–Fe(III) шаруваті подвійні гідроксиди (*Green Rust*), лепідокрокіт  $\gamma$ -FeOОН, магнетит  $FeFe_2O_4$ . Так, при постійному надходженні в зону реакції катіонів феруму (II) фазовий склад продуктів перетворення феригідриту залежить від інтенсивності окиснення системи. За даними РФА, мінеральні фази, які реєструються на поверхні сталі при її контакті з водними розчинами сульфату або хлориду феруму (III), є суміш феригідриту, гетиту, гематиту і гідроксисульфатного або гідроксикарбонатного *Green Rust* (див. *a* на рис. 2). Помірне окиснення такої системи впродовж

2–5 год веде до утворення фази магнетиту: на рентгенограмі (див. б) зареєстровані відбиття від площин (111), (220), (311), (400), (511), (440). Інтенсивне окиснення системи, в свою чергу, сприяє формуванню суміші оксигідроксидів феруму — гетиту  $\alpha$ -FeOOH і лепідокрокіту  $\gamma$ -FeOOH (див. в), які впродовж 24 год частково перетворюються на магнетит  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ . На нашу думку, фазове перетворення феригідриту на магнетит у присутності окисника проходить шляхом його взаємодії з катіонами Fe(II) за реакцією:



Пряме перетворення фази феригідриту на гетит  $\alpha$ -FeOOH за реакцією (4) вірогідне при контакті поверхні сталі з дисперсійним середовищем при вихідному значенні  $\text{pH} < 4,0$  або  $\text{pH} > 9,5$ :



У водному дисперсійному середовищі механізм перетворення феригідриту на гетит  $\alpha$ -FeOOH і лепідокрокіт  $\gamma$ -FeOOH у присутності “слідових” концентрацій Fe(II) проходить шляхом розчинення/переосадження (реконструктивного перетворення) [14], за якого слабо окристалізовані частинки феригідриту розчиняються, а далі в розчині відбувається вторинне осадження добре впорядкованих структур оксигідроксидів феруму. Перетворення феригідриту на  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, навпаки, проходить твердофазним шляхом (дегідратацією) за рахунок руйнування шарів OH та видалення H<sub>2</sub>O<sub>ад</sub> зі слабо окристалізованих наночастинок феригідриту [15]. Розглядаючи механізм формування фаз гетиту  $\alpha$ -FeOOH, лепідокрокіту  $\gamma$ -FeOOH та гематиту  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при перетворенні феригідриту, отриманого на поверхні заліза та сталей, простежується чітка аналогія з процесами, які проходять в водному дисперсійному середовищі при відновній сорбції клітинами. Передумовами для цього є: 1) властивість системи завдяки катодним процесам самовільно змінювати значення pH приповерхневого шару в широкому діапазоні вихідних значень до нейтральних (pH ~ 7–9); 2) примусове окиснення системи, яке призводить до нагромадження в зоні реакції катіонів Fe(III), їх гідролізу та хімічної взаємодії з гідроксидом з утворенням фази феригідриту; 3) постійне надходження в зону реакції продуктів анодного розчинення заліза — катіонів Fe(II), які при незначній зміні pH приелектродного простору можуть перебувати як у формі гідратованих катіонів Fe<sup>2+</sup> або гідроксокомплексів FeOH<sup>+</sup>, так і утворювати окрему фазу Fe(OH)<sub>2</sub>.

Ще один важливий чинник було встановлено в ході дослідження, він полягає в тривалості процесу формування ферумоксигенвмісних фаз. Так, у біохімічному процесі, зумовленому дією клітин, перетворення первинних ферумоксигенвмісних фаз у кінцеві стійкі форми магнетиту, гетиту та лепідокрокіту досягається практично за 30 хв. Навпаки, для реалізації процесу фазового перетворення шляхом хімічного окиснення необхідно не менше 3–5 год. У попередніх роботах [3] було показано, що сполуки феруму утворюються в окремих компартментах клітин мікрободорості, що визначає їх розмір у десятки нанометрів. На рис. 3 наведено електронно-мікроскопічні зображення ферумоксигенвмісних частинок, які були отримані внаслідок відновлення дисперсної фази в клітинних структурах із розчину FeCl<sub>3</sub> та отриманих на поверхні сталевго електрода, який контактував з розчином FeSO<sub>4</sub>.

У попередніх роботах [1–4] було показано, що біокомпозити, які містять клітини мікроорганізмів і колоїдні частинки металів, можуть бути використаними як реагенти-флокулянти в процесах флоатації при збагаченні металів, зокрема золота. В даному дослідженні було показано інтенсивність взаємодії з золями золота клітин *Chlorella vulg.*, біокомпозитів на

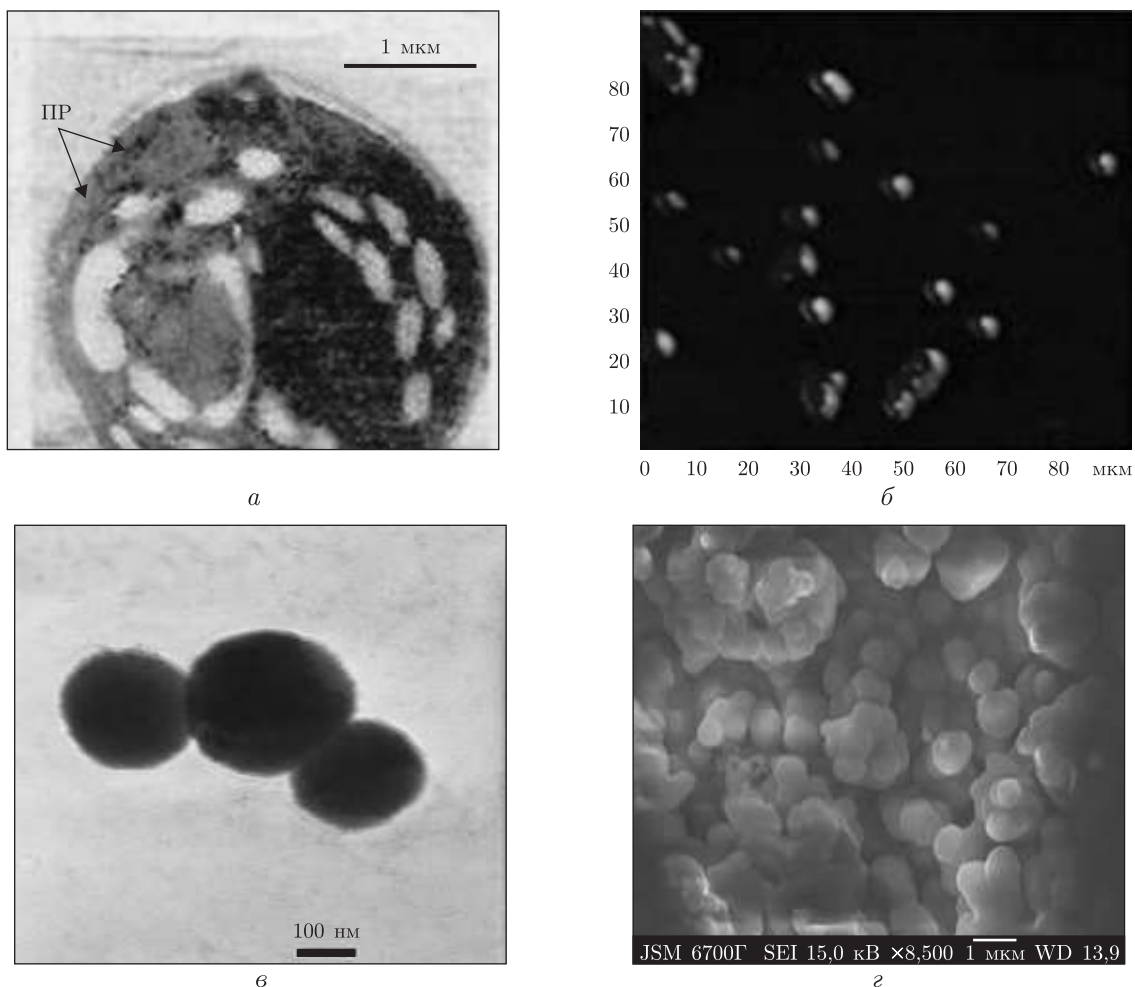


Рис. 3. Електронні мікрофотографії: *a* — клітини *Chlorella vulg.* з частинками оксидів феруму, відновленими з розчину хлориду феруму (ІІІ); *б* — магнітне зображення цих клітин; *в* — частинки феригідриту, отриманого на поверхні сталі при її контакті з водним розчином сульфату феруму (ІІІ); *г* — частинки магнетиту, як продукту фазового перетворення феригідриту

основі клітин *Chlorella vulg.* та частинок феригідриту хімічного походження, отриманих при їх змішуванні з біомасою (рис. 4). В результаті проведеного дослідження було встановлено, що максимальною активністю в адгезуванні та флокуляції наночастинок золота характеризуються клітини *Chlorella vulg.* з частинками феригідриту, відновленими в їх структурних елементах (87%). Ті самі клітини в суміші з частинками феригідриту, що отримані хімічним (корозійним) методом, вилучають із золю 75 % золота. Частинки феригідриту та біокомпозитів, які утворені як біогенним, так і хімічним шляхом, мають негативні значення  $\zeta$ -потенціалу. В цьому випадку має місце гетерокоагуляція між частинками золота і феригідриту, що спричиняє зниження вмісту золота в дисперсії на 68%. Клітини *Chlorella vulg.* також взаємодіють з частинками золота, але ступінь вилучення золота (46 %) — найменший.

Таким чином, отримані результати вказують на те, що біокомпозити, які містять клітини *Chlorella vulg.* й отримані методом відновної сорбції, та ультрадисперсні фази магнетиту, гетиту та лепідокрокіту характеризуються підвищеною активністю у взаємодії з частинка-



Рис. 4. Результати дослідження взаємодії біокомполітів на основі ферумокисневмісних сполук біогенного та хімічного походження з частинками золота

ми золота за рахунок гетерокоагуляції. В подальших технологічних дослідженнях передбачається використовувати магнітне поле для активації цієї взаємодії з метою підвищення ефективності збагачення золота в процесах флотації та седиментації. Дані про спільність процесів перетворення ферумокисневмісних сполук у природних системах, які здійснюються мікроорганізмами, а також у хімічному корозійному процесі є корисними при розробці теорії біогенного формування родовищ ряду металів, зокрема золота, вміст якого корелює з ферумокисневмісними мінеральними фазами.

1. Овчаренко Ф. Д., Ульберг З. Р., Перцов Н. В. и др. Механизмы биогенного концентрирования металлов в шельфовых зонах дефицита наносов // Докл. АН УССР. Сер. Б. – 1989. – № 1. – С. 19–22.
2. Перцов Н. В., Ульберг З. Р., Коган Б. С., Гарбара С. В. Механизмы биогенного концентрирования металлов в шельфовых зонах дефицита наносов // Геохимия. – 1990. – № 1. – С. 112–116.
3. Волобаев И. И., Марочко Л. Г., Ульберг З. Р. Высокоселективные биофлокулянты для извлечения ультрадисперсных частиц золота // Коллоид. журн. – 2012. – 74, № 4. – С. 454–459.
4. Лавриненко Е. Н., Волобаев И. И., Волобаев И. В., Ульберг З. Р. Коллоидно-химический механизм образования золото-магнетитовых композитов и роль наноразмерных железокислородных минералов в процессе обогащения золотосодержащих руд: Материалы Междунар. совещ. “Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения 2012)”, Петрозаводск, 10–14 сент. 2012 г. – Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2012. – С. 92–96.
5. Кармазин В. В. Повышение извлечения мелкого и тонкого золота – основа развития золотодобычи в России в ближайшем будущем // Золотодоб. пром-сть. – 2009. – № 6(36). – С. 29–33.
6. Kukkadapu R. K., Zachara J. M., Fredrickson J. K., Kennedy D. W. Biotransformation of two-line silica-ferrihydrite by a dissimilatory Fe(III)-reducing bacterium: Formation of carbonate green rust in the presence of phosphate // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2004. – 68, No 13. – P. 2799–2814.
7. Furukawa Y., Kim J.-W., Watkins J., Wilkin R. T. Formation of ferrihydrite and associated iron corrosion products in permeable reactive barriers of zero-valent iron // Environ. Sci. and Technol. – 2002. – 36. – P. 5469–5475.
8. Лавриненко Е. Н. Роль катионов железа дисперсионной среды при образовании железокислородных структур в системах на основе железа и углерода // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2008. – 6, вып. 2. – С. 529–550.
9. Гузев В. С., Жарикова Г. Г., Звягинцев Д. Г. Изучение поверхности микробных клеток методом микроэлектрофореза // Микробиология. – 1972. – 41. – С. 723–727.
10. Лавриненко О. М. Процеси утворення дисперсних фаз у системі гальваноконтакту залізо-вуглець (кокс) у водному середовищі: Автореф. дис. ... канд хім. наук / НАН України. Ін-т біолоїд. хімії ім. Ф. Д. Овчаренка. – Київ, 2011. – 20 с.
11. Лавров И. С. Практикум по коллоидной химии. – Москва: Высш. шк., 1983. – 215 с.



12. *Получить альго-бактериальные ассоциации микроорганизмов, агрегирующие благородные и сопутствующие металлы из дисперсных систем: (Промежут. отчет. 01.84.0 081 497).* – Киев: Ин-т ботаники им. Н. Г. Холодного, 1987. – С. 38–42.
13. *Зозуля В. В., Лавриненко Е. Н., Прокопенко В. А., Перцов Н. В.* О механизме процессов в гальванопаре железо – углерод (кокс) в аэрированном растворе, содержащем ионы тяжелых металлов // Укр. хім. журн. – 2000. – **66**, № 7. – С. 48–50.
14. *Yee N., Shaw S., Benning L. G., Nguyen T. H.* The rate of ferrihydrite transformation to goethite via the Fe(II) pathway // Amer. Miner. – 2006. – **91**. – P. 92–96.
15. *Cudenec Ya., Lecerf A.* The transformation of ferrihydrite into goethite or hematite, revisited // J. Solid. State Chem. – 2006. – **79**. – P. 716–722.

*Институт біологічної хімії  
ім. Ф. Д. Овчаренка НАН України, Київ*

*Надійшло до редакції 02.11.2012*

**Е. Н. Лавриненко, И. И. Волобаев, В. А. Прокопенко**

**Образование ферригидрита биогенного и химического происхождения и взаимодействие биокмполитов на его основе с частицами золота**

*Проведено дослідження процесу формування біокмполитов на основі кліток мікробіодорослі *Chlorella vulg.* і залізоокислородних мінеральних фаз, утворених в їх структурі за рахунок відновительної сорбції заліза з водних розчинів FeCl<sub>3</sub>. Встановлено залежність складу мінеральних фаз в структурі біокмполита від вихідної концентрації електроліта, з яким контактують клітки *Chlorella vulg.* Для визначення впливу природи залізоокислородних мінеральних фаз на ефективність отриманих біокмполитів в якості моделі системи вибрано процес хімічної корозії на поверхні сталі. Показано, що найбільш інтенсивно вилучення золота (87%) з дисперсій проходить при їх взаємодії з біокмполитом на основі кліток мікробіодорослі *Chlorella vulg.* з відновленими в їх структурних елементах частинами ферригидрита.*

**O. M. Lavrynenko, I. I. Volobaev, V. A. Prokopenko**

**The formation of ferrihydrite of the biogenic and chemical origins and the interaction of biocomposites on its basis with gold particles**

*The process of formation of biocomposites based on *Chlorella vulg.* microalgae cells and the iron oxygen mineral phases formed in their structure due to the ferric reductive sorption from the FeCl<sub>3</sub> water solutions is studied. A dependence of the mineral phase compositions in the biocomposite structure on the initial concentration of the electrolyte contacting with *Chlorella vulg.* cells is found. The chemical corrosion process on the steel surface is chosen as a model system in order to determine the influence of the nature of the iron oxygen mineral phases on the efficiency of the obtained biocomposites. It is shown that the process of aurum extraction (87%) from the dispersions runs the most intensively, when they interact with biocomposites based on *Chlorella vulg.* microalgae cells, and the ferrihydrite particles are reduced in their structural elements.*