

Чекман І.С.,  
Горчакова Н.О.,  
Сирова Г.О.,  
Калібабчук В.О.,  
Шаповалова Л.Г.,  
Небесна Т.Ю.,  
Грабовецька Є.Р.

## НАНОХІМІЯ БІОМЕТАЛІВ

Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ,  
Харківський національний медичний університет, м. Харків, Україна

**Резюме.** Узагальнено дані літератури з нанохімії біогенних елементів, зокрема металів. Основну увагу приділено методам отримання наночастинок металів та хімічним реакціям за їх участю. Розглянуто методи стабілізації та фізико-хімічні властивості наночастинок індивідуальних металів, а також частинок, що включають атоми декількох металів. Виділено основні тенденції розвитку цього нового наукового напрямку. Описано процеси самоорганізації наночастинок металів та обговорено перспективи застосування їх у каталізі, біології та медицині.

**Ключові слова:** нанохімія, нанофармакологія, біометали, наночастинки, фізико-хімічні властивості, самоорганізація.

Десять металів (натрій, калій, магній, кальцій, манган, залізо, кобальт, мідь, цинк, молібден) відіграють важливу роль у життєдіяльності організмів і отримали назву "метали життя" або "біометали". У найбільшій кількості в організм людини входять 6 елементів: кальцій, фосфор, калій, натрій, магній, залізо; інші чотири — складають менший відсоток. Біометали входять до складу ферментів, коферментів та простатичних груп, виступають у ролі каталізаторів багатьох життєвоважливих реакцій тощо. Нестача біометалів в організмі веде до розвитку різних патологічних станів [17].

Останні десять років ХХ століття характеризувалися підвищенням інтересом фахівців в різних областях науки: фізики, хімії, біології, медицини тощо, — до нанотехнологій: одержанням наночастинок, їх властивостями та різноманітними перетвореннями в організмі. Це пов'язано з тим, що у таких частинок виявлено особливі механічні, оптичні, термодинамічні, електричні та магнітні властивості, які відрізняються від властивостей аналогічних мікро- або макрочастинок. Починаючи з 1990 року, спостерігається щорічне збільшення кількості наукових праць, присвячених цьому

питанню [22, 24–26, 36]. З'явилися чисельні узагальнюючі праці з методів одержання, стабілізації, оптичних, магнітних та інших властивостей наночастинок, зокрема, опубліковано монографії, збірники наукових статей та огляди, присвячені вивченню властивостей наночастинок металів та напівпровідників, а також матеріалів, отриманих на їх основі [38, 40, 42, 44, 51].

В той же час вивчення хімічних перетворень за участю наночастинок знаходиться у початковому стані, і навіть сам термін "нанохімія" з'явився нещодавно. Автори цієї статті зробили спробу узагальнити дані вітчизняної та зарубіжної літератури, які стосуються хімічних перетворень за участю наночастинок металів як біогенних елементів і комплексоутворювачів біологічно активних сполук. Велика увага приділяється методам отримання, стабілізації та вивченню фізико-хімічних властивостей наночастинок як окремих металів, так і декількох різних металів та сполук металів.

До останнього часу до наночастинок відносили частинки розміром від 1 до 100 нм (в деяких роботах цей інтервал був ще ширшим — від 1 до 1000 нм), хоча згідно системи СІ (префікс

нано- використовується для утворень одиниць  $\sim 10^{-9}$ ), в якості наночастинок слід розглядати тільки частинки розміром від 0,1–100 нм. Нанохімія досліджує методи одержання та хімічні властивості частинок, що мають розміри 0,1–100 нм. З реакційною здатністю наночастинок пов'язані найбільш актуальні проблеми нанохімії. Наприклад, хімічні властивості частинок розміром 1 нм, що включають 5–10 атомів металу, змінити додаванням лише 1 атому. Тому важливо знати і правильно розуміти хімічні та фізичні закономірності, що управляють активністю частинок розміром порядку 1 нм. Вивчення залежності хімічних і фізичних властивостей наночастинок від числа атомів металів, що входять до їх складу та природи пов'язаних з наночастиною лігандів являє собою новий напрямок в нанохімії. На теперішній час в цій області іде накопичення матеріалу, який надасть змогу зрозуміти вплив геометрії, електронних та розмірних властивостей таких систем на їх реакційну здатність. Найбільш детально вивчено властивості наночастинок, отриманих у газовій фазі. Одночасно застосування методів надзвукового струменю, імпульсних лазерів та мас-спектрометрії дало можливість отримати, ідентифікувати та характеризувати "вільні" наночастинок металів з різним числом атомів. Залежність хімічної активності наночастинок в газовій фазі від числа атомів, що входять до їх складу, детально вивчена на прикладі частинок ніобію та заліза [31].

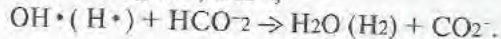
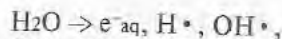
На теперішній час інтереси дослідників зосереджені на розробці методів одержання та стабілізації наночастинок металів у рідкій фазі. При цьому особлива увага приділяється отриманню монодисперсних частинок. Значне місце у вирішенні проблеми одержання монодисперсних частинок посідають методи хімічного відновлення, що використовують, головним чином, для синтезу наночастинок золота та срібла, а іноді – для одержання частинок платини, кобальту, нікелю, міді. Сферичні наночастинок срібла розміром 3,3–4,8 нм синтезовано відновленням нітрату срібла борогідридом натрію в присутності дибромиду біс[(триметиламоніодеканоїламіно)етил] дисульфіда як стабілізатора [59]. Отримані частинки характеризуються інтенсивним оптичним поглинанням в області 400 нм, що відповідає плазменому пікові срібла. Це свідчить про металічну природу наночастинок. Досліджено вплив середовища на стабільність

одержаних наночастинок срібла і встановлено, що вони агрегуються в присутності сірчаної та соляної кислот. Стійкість частинок срібла залежить і від рН середовища; при рН 5–9 у водному середовищі частинки стабільні протягом тижня. Збільшення або зменшення рН призводить до швидкої агрегації та осадження наночастинок срібла. Вплив рН середовища на стійкість частинок золота менш сильний, ніж на частинки срібла [59].

Для одержання наночастинок металів розміром 1–2 нм в якості матриці використовували амфифільний полімер полі(октадецил-силоксан) [19].

Гібридні матриці на основі поліелектролітичних гелів з протилежно зарядженими поверхнево-активними речовинами (ПАР) використовували як наноструктуровані середовища для відновлення різноманітних солей платини борогідридом натрію  $\text{NaBH}_4$  та гідразинном. Встановлено, що при відновленні  $\text{NaBH}_4$  в основному утворюються невеликі частинки платини радіусом  $\sim 2\text{--}3$  нм, а при відновленні гідразинном – частинки розміром  $\sim 40$  нм [53].

В роботі [28] вивчено механізми утворення, електронні спектри та реакції наночастинок кобальту у водних розчинах. При радіаційно-хімічному відновленні іонів кобальту з водних розчинів перхлорату кобальта  $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$  та формиату натрію  $\text{HCOONa}$  одержано сферичні частинки кобальту діаметром 2–4 нм. В якості стабілізатора використовували поліакрилат натрію з молекулярною масою 2100. При радіолізі утворюються сольватовані електрони  $e\text{-aq}$ , гідроксильні радикали, атоми водню і іон-радикали  $\text{CO}_2^-$ .



Гідратовані електрони та іон-радикали  $\text{CO}_2^-$  відновлюють іони  $\text{Co}^{2+}$ , при цьому формуються наночастинок кобальту, що мають максимум поглинання в області 200 нм. Методом імпульсного радіолізу показано, що відновлення  $\text{Co}^{2+}$  і утворення наночастинок кобальту відбуваються за автокаталітичним механізмом. При радіаційно-хімічному відновленні іонів  $\text{Ni}^{2+}$  із водних розчинів  $\text{Ni}(\text{ClO}_4)_2$ , що містить ізопропіловий спирт, у присутності поліетилену, поліакрилату та полівінілсульфату утворюються золі металу, які містять сферичні частинки діаметром 2–4

нм. Наночастинки нікелю, що легко окиснюються киснем та пероксидом водню, при взаємодії з іонами срібла утворюють стійку наносистему Ni-Ag [4].

Сферичні частинки міді розміром 20–100 нм одержано при  $\gamma$ -радіолізі водних розчинів диціанокупруматом(I) калію  $K[Cu(CN)_2]$  у присутності метанолу або 2-пропанолу як акцепторів гідроксильних радикалів [35].

У роботі [56] вивчено утворення частинок срібла при  $\gamma$ -радіолізі розчинів азотнокислого срібла у воді, етанолі та 0,01M лаурилсульфаті натрію  $C_{12}H_{25}OSO_3Na$ . Фронтальна розмірність агрегатів частинок у воді, етанолі і  $C_{12}H_{25}OSO_3Na$  складала відповідно 1,81, 1,73 і 1,70 [56]. У статті [57] описано одержання стійких наночастинок (середній розмір 1–2 нм) платини, родію і рутенія в органічних середовищах в результаті нагрівання відповідних колоїдних розчинів гідроксидів металів у етиленгліколі.

Частинки срібла розміром 2–7 нм одержано електрохімічним розчиненням металічного аноду (пластина срібла) в апроtonному розчині тетрабутиламонійброміду у ацетонітрилі [48]. Показано, що на цей процес впливають такі характеристики як густина струму і природа катоду. Так, при високих густинах струму за нерівновісних умов можуть утворюватися частинки неправильної форми. В інтервалі від 1,35 до 6,9  $nA \cdot cm^{-2}$  діаметр частинок змінюється від  $6 \pm 0,7$  до  $1,7 \pm 0,4$  нм. При відновленні іонів срібла, стабілізованих сіллю тетрабутиламонійброміду, відбувається утворення наночастинок срібла та їх осадження на катодах, в якості яких використовували платину та алюміній. З використанням платинових катодів утворюються в основному сферичні наночастинки срібла, а на катоді з алюмінію формуються та осаджуються тільки плівки. Аналіз оптичних спектрів наночастинок при їх синтезі дозволив зробити висновок про існування автокаталітичної стадії у цьому процесі.

Для одержання наночастинок металів і їх сполук використовують міцели, емульсії та дендримери, які можна розглядати як своєрідні нанореактори, що дозволяють синтезувати частинки визначених розмірів. Дендримери – дуже розгалужені макромолекули, які включають центральне ядро, проміжні одиниці, що повторюються та кінцеві функціональні групи. Дендримери з невеликою кількістю проміжних ланок існують у

"відкритій" формі, а з більшою кількістю ланок утворюють сферичні тримірні структури. Кінцеві групи дендримерів можна модифікувати гідроксильними, карбоксильними або вуглеводними групами.

Наночастинки кристалічного вісмуту розміром менше 10 нм було одержано відновленням розчинених у воді солей вісмуту внутрішньо-зворотних міцел на основі діізооктилсульфосукцината натрію (AOT). Змішування розчиненого в ізооктані AOT з визначеною кількістю водного розчину перхлорату оксовісмуту  $BiOClO_4$  призвело до утворення зворотних міцел. Міцелярний розчин  $NaVO_4$  готували аналогічним чином з таким же відношенням  $\alpha = [H_2O]:[AOT]$ . Обидва розчини змішували в атмосфері аргону [32].

Після витримування такої суміші протягом декількох годин при кімнатній температурі осаджувалися частинки вісмуту. Рідку фазу видаляли у вакуумі, а сухий залишок диспергували у толуолі. Одержаний таким чином розчин темного кольору містив за методом порошкової рентгенографії та електронної мікроскопії частинки вісмуту розміром  $3,2 \pm 0,35$  нм при  $\alpha=2$  та  $6,9 \pm 2,2$  нм при  $\alpha=3$ . Якщо для захисту від окиснення кристалічних частинок вісмуту використовували полімери, то розмір частинок збільшувався до  $\geq 20$  нм [30].

При відновленні у воді солі родію в присутності амфифільного блоксополімеру стиролу і етиленоксидом і аніонного ПАВ (додецилсульфату натрію) утворюються частинки родію діаметром 2–3 нм, стабілізовані блоксополімером [20]. У роботі [39] одержано люмінесцентні наноматеріали на основі оксиду ітрію лігированого европієм, з використанням неіонних зворотних макроемульсій на основі поліетиленоксиду та інших сферів.

На теперішній час ведуться активні пошуки макромолекул, що можна використовувати як матриці для синтезу наночастинок. З подібних методів молекули стабілізатора взаємодіють з поверхнею металічної частинки, впливаючи на її зростання. Наприклад, при відновленні іонів двовалентної міді в присутності полі-N-вінілпірролідона за умов температури 11°C утворюються частинки діаметром  $7 \pm 1,15$  нм, а при  $-30^\circ C$  – діаметром до  $10 \pm 1$  нм. Цікаві результати одержано при вивченні впливу температури на стійкість вже сформованих наночастинок. Якщо частинки міді, що утворилися при 11°C, нагрівати до 30°C, то за-

висна функція полімерної оболонки втрачається; при цьому збільшується агрегація та прискорюється окиснення частинок металу. Протилежний результат отримують за умов зниження температури системи, що утворила-ся при 30 °С, до 11 °С: агрегація частинок не відбувається, їх розмір зберігається незмінним, а стійкість до окиснення підвищується [6].

Конкуренція перебігу різноманітних процесів, пов'язаних із зміною температури, відображується не тільки на стійкості одержаних частинок, але і на їх розподілі за розмірами. Фотохімічним відновленням іонів  $\text{Ag}^+$  у присутності дендримерів з кінцевими аміно- та карбоксильними групами синтезовано частинки срібла з середнім розміром  $\sim 7$  нм [37].

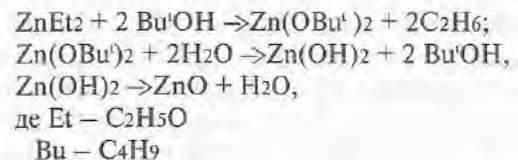
Розмір частинок можна контролювати, змінюючи природу дендримерів. За останній час для стабілізації наночастинок металів активно використовують дендримери на основі поліамідоамінів та їх різноманітних модифікацій. Приклад використання дендримерів як мікрореакторів для синтезу наночастинок металів наведено у роботі [34]. Монодисперсні сферичні поліамідоамініні дендримери проєктивні для низькомолекулярних реагентів. Задавання, наприклад, тетрахлорозолотоводяної кислоти  $\text{H}[\text{AuCl}_4]$  до водного розчину дендримера, що містить первинні та третинні аміногрупи, призводить до появи протонованого дендримера з  $\text{AuCl}_4^-$  як протіону. При відновленні аніонів  $\text{AuCl}_4^-$  борогідридом ітрію утворюються частинки золота розміром 1–5 нм. Змінюючи відношення концентрації протіонів  $\text{AuCl}_4^-$  і кінцевих аміногруп або діаметр дендримеру, можна контролювати розмір частинок [34].

Відновленням солей золота та срібла в присутності модифікованих дендримерів одержано частинки з середнім діаметром 2–6 нм. Спектральним методом встановлено автокаталітичний характер реакцій [29].

Перспективи використання мезопор при синтезі різноманітних нанорозмірних матеріалів розглянуто в роботі [41]. Наночастинки срібла та сульфід срібла одержано в нанорозмірних порожнинах перфторированих мезопористих мембран [49]. Відновлення іонів металів у присутності амінодекстрану та стиролу призводить до утворення сферичних часточок полістирола діаметром до 2 мкм, вкритих острівками золота та срібла розміром від 5 до 200 нм [21].

Оксиди металів, як і метали, знаходять широке практичне застосування. Реакційна активність оксидів металів нижче, ніж реакційна здатність самих металів, тому процес утворення оксидів використовують для стабілізації наночастинок металів. За участю наночастинок оксидів металів в останній час здійснено декілька реакцій, що представляють інтерес для нанохімії.

Оригінальне використання нанокристалічного оксиду описано у роботі [21]. Оксид цинку одержано із застосуванням модифікованого золь-гель методу за реакціями:



Процес приготування  $\text{ZnO}$  включав три стадії: отримання, виділення та активацію. Останній процес, у свою чергу, складався з декількох послідовних стадій теплової обробки. Спочатку порошок повільно нагрівали до 90 °С і витримували за цієї температури 15 хв. Потім температуру поступово підвищували до 250 °С, витримували зразок 15 хв і повільно охолоджували до кімнатної температури. Одержаний оксид цинку – це кристалічні наночастинки розміром 3–5 нм з площею поверхні  $\sim 120$  м<sup>2</sup>/г, – використовували для проведення реакції:

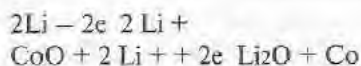


Процес проводили за температурою 250 °С, причому  $\text{CCl}_4$  вводили в реакційну суміш порціями з інтервалом 7 хв. Діоксид вуглецю та  $\text{CCl}_4$ , що не прореагував, аналізували методом газової хроматографії. Показано, що нанокристалічний оксид цинку більш активний, ніж звичайні комерційні препарати. Встановлено також, що на  $\text{ZnO}$  з більшою ефективністю відбувається адсорбція діоксиду сірки і деструктивна адсорбція диетил-4-нітрофенілфосфату – токсичної фосфорорганічної сполуки [21].

Автокаталітичне дегідрогалогенування 2,2-дихлордиетилсульфіду на нанокристалічному оксиді кальцію розглянуто в роботі [55]. Одержані продукти аналізували методом ЯМР. У продуктах розкладання 2,2'-дихлордиетил-

сульфіду знайдено дівінілсульфід (~ 80%) і тіогліколь і/або іон сульфонія (~ 20%) з гідроксильною групою, за рахунок якої він, вірогідно, зв'язується з поверхнею оксиду лужноземельного металу. Крім взаємодії CaO з іпритом, вивчено також його реакції з фосфоромісними сполуками. Кінетика взаємодії всіх сполук з оксидом кальцію характеризується швидкою початковою стадією і повільною наступною стадією, що лімітується дифузією.

Цікаве застосування наночастинок оксидів перехідних металів розглянуто у роботі [46]. Частинок оксидів кобальту, нікелю, міді, заліза розміром 1–5 нм використовували як матеріали для електродів в літійових батареях. При цьому на електродах з наночастинок оксиду кобальта CoO перебігають реакції утворення та розкладу води і відновлення та окиснення наночастинок, що їх супроводжують. Схему оборотних реакцій наведено нижче.



Пряма реакція вірогідна і термодинамічно можлива, зворотна – незвичайна з точки зору електрохімії. Оксид літію Li<sub>2</sub>O завжди розглядали як електрохімічно не активний. Авторам не вдалося електрохімічно розкласти Li<sub>2</sub>O. Таким чином, можливість протікання зворотної реакції пов'язана з використанням наночастинок і зростанням їх електрохімічної активності зі зменшенням розміру.

За останній час велика увага приділяється отриманню та вивченню фізико-хімічних властивостей гібридних наноматеріалів типу ядро-оболонка і частинкам, що містять два і навіть три різних метала.

Отримано та досліджено нові нанокристалічні гібридні матеріали ядро-оболонка, такі як TiO<sub>2</sub> – MoO<sub>3</sub> [27]. Частинок TiO<sub>2</sub> – (MoO<sub>3</sub>)х отримали сумісною нуклеацією оксидів металів на поверхні міцели. У таких матеріалах енергія фотопоглинання корелює з розміром частинок. При зменшенні розміру частинок TiO<sub>2</sub> – MoO<sub>3</sub> від 8 до 4 нм енергія поглинання зменшувалась від 2,9 до 2,6 еВ. Для порівняння можна констатувати, що енергії заборонених зон компактних TiO<sub>2</sub> і – MoO<sub>3</sub> відповідно дорівнюють 3,2 і 2,9 еВ. Для поліпшення транспорту електронів у металічних наночас-

тинках запропоновано дослідити вплив рН на зміну зарядів у стабілізуючих покриттях, пов'язаних з поверхнею частинки.

Показано також, що молекули твердих меркаптофенілацетиленів добре зв'язують частинки золота та срібла [45]. Встановлено, що транспорт електронів у заряджених частинках золота краще описується на основі класичних, а не квантово-механічних закономірностей [54].

На теперішній час інтенсивно розвивається новий напрямок нанохімії, метою якого є синтез із використанням систем, що складаються з наночастинок металів (в основному золота і срібла) і різноманітних біомолекул: ДНК, пептидів, олігонуклеотидів. Оптичні властивості агрегатів наночастинок золота, зв'язаних фрагментами ДНК, що містить від 27 до 72 пар нуклеотидів, розглянуто у роботі [45]. Використовували частинки золота діаметром ~ 15 нм, модифіковані алкантіолами. Вивчено вплив довжини олігонуклеотидного ланцюга на оптичні властивості отриманих агрегатів і показано, що довжина ланцюга впливає на положення піку плазмону металу. Розміри агрегатів наночастинок визначали кінетичним методом, тому що швидкість їх росту залежить від довжини олігонуклеотидних ланцюгів і відстаней між наночастинками. З факторів, що впливають на швидкість росту агрегатів, найбільш важливі є швидкість зв'язування ДНК-лінкерів (Лінкери – не скручені відрізки дволанцюгової ДНК, що пов'язують між собою компактно упаковані ділянки ДНК, стабілізовані білками і амінами) з комплементарними ДНК на поверхні наночастинок золота і швидкості росту агрегатів. Оптичні зміни спостерігали при прожарюванні структур, що утворені двома найбільш довгими нуклеотидами-лінкерами, за температур нижче їх точки плавлення. Таким чином ДНК-лінкери можна використати для здійснення кінетичного контролю росту агрегатів.

Новий метод введення біоматеріалів в живі клітини запропоновано в роботі [23]. Метод засновано на електророзпиленні часточок металу, що несуть значний електричний заряд і мають високу швидкість. Якщо металічні частинки, поверхня яких покрита генами, диспергувати за допомогою розробленої апаратури, то вони дезінтегруються в рідких краплях під впливом зовнішнього неоднорідного поля. Фрагменти гена, що при цьому одержуються, мають заряд того ж знаку, що і частинки мета-

і характеризуються високою концентрацією. Як живі клітини використовували шобласти мавп, а як біоматеріали застосовували мічені флуоресцируючим білком суспензії плазмід (плазміді – позахромосомні утворення у вигляді замкнених кілець дволанцюгової ДНК), а також плазміді з частинками золота розміром 5–10 нм. За допомогою УФ-флуоресцентного мікроскопа показано, що суспензія плазмід з золотом проникає в клітинну оболонку. Особливо важливо, що проникає в клітинну оболонку створюється в її ДНК також суспензія плазмід, що не містить золота. За думкою авторів [23], цей результат найцікавіший, оскільки в цьому випадку вдалося обійтися без золота, що традиційно використовується для проникнення у клітину. Відмічено, що електроосилювання відкриває нові можливості для трансфекції і терапії генів.

В якості нових контрастних матеріалів для магніторезонансних досліджень в медицині запропоновано застосовувати наночастинки з частинками іонів гадолінію. Такі частинки розміром 120 нм достатньо малі і можуть легко проникати в кровеносні судини, що дало можливість їх використати для одержання зображення серця та шлунково-кишкового тракту пацієнтів [47].

Проводяться наукові дослідження щодо застосування біомолекул для розпізнавання розповсюджених неорганічних матеріалів. Це можливо зробити, використовуючи принципи селективного зв'язування, що відомі в молекулярній біології. Застосування специфічного зв'язування пептидів з різноманітними напівпровідниками для створення нанокристалічних ансамблів запропоновано у роботі [58]. Показано, що за допомогою нанокристалічних напівпровідників можна виділити визначені пептиди, тому що останні з високою специфічністю зв'язуються з поверхнею цих напівпровідників. Як субстрати використовували п'ять різноманітних поверхонь монокристалів напівпровідників: GaAs (100), GaAs(111)Ga (на поверхні атоми галія), GaAs(111)As (на поверхні атоми миш'яку), InP(100) і Si(100). Нанокристалічні ансамблі, що були одержані, досліджували за допомогою антибіодів, мічених наночастинками золота розміром 20 нм, а також методами світової і флуоресцентної мікроскопії, фотоелектронної спектроскопії, атомно-силової і скануючої тунельної мікроскопії.

В роботі [53] проаналізовано перспективи синтезу дво- і тримірних наноструктур на основі біологічних принципів. За думкою авторів, у новому столітті отримає розвиток стратегія синтезу складних ансамблів з більш простих. Біологічні структури можуть бути використані як поверхневі детектори для організації зв'язаних великих органічних будівельних блоків. Фактично це дозволить використовувати для одержання нових матеріалів принципи створення складних функціональних систем.

Аналіз робіт, що опубліковані в останні роки, показує, що багато аспектів нанохімії металів набувають все більшого значення і в їх рішенні вже здобуто значний прогрес. Активно вивчаються фактори, що впливають на розмір і форму наночастинок, які одержують, процеси самозбірки і самоорганізації, як самих наночастинок, так і лігандів, що їх стабілізують. Список полімерів, ПАВ, зворотних міцел і тіолів, що традиційно застосовуються для стабілізації наночастинок успішно доповнився дендримерами. Поширюється застосування наночастинок у каталізі, а напівпровідникових частинок – у фотокаталізі. Більш інтенсивно ведуться роботи з використанням наночастинок металів у проведенні незвичайних реакцій. Стає більш актуальною проблема одержання і вивчення реакцій металічних наночастинок, не захищених покриттями. Інтереси дослідників зміщуються в бік вивчення реакцій металічних наночастинок розміром менше 1 нм. Ще одне перспективне направлення нанохімії може розвиватися на стику таких наук, як біологія, фармакологія, фармація, органічна та неорганічна хімія, матеріалознавство. Взаємне "розпізнавання" і сумісна самоорганізація неорганічних і біологічних молекул є ключовими проблемами, рішення яких повинно привести до синтезу нових перспективних матеріалів [7, 9, 15, 18].

Досліджуючи властивості наночастинок біометалів, особливу увагу слід звернути на наступні напрямки:

- використання сучасної експериментальної техніки для вивчення процесів, що відбуваються з наночастинками і на поверхні наноструктур;
- вивчення ролі наноструктур і таких важливих процесів, як осадження білків, десорбція забруднень, стабілізація ко-

- розвиток експериментальної і обчислювальної техніки з метою дослідження наночастинок в процесах, що відбуваються в атмосфері і водних джерелах;
- застосування мезопористих структур, інтегрованих з потрібними мікрокомпонентами, для одержання високочутливих і високоселективних детекторів забруднень.

Таким чином, на теперішній час дослідження властивостей наночастинок біометалів складає міждисциплінарну галузь науки, яка надалі зможе визначити розвиток інших суміжних дисциплін, що надасть змогу більш ґрунтовно дослідити позитивні властивості продуктів нанотехнологій – наночастинок, а також можливу негативну їх дію як на організм людини, так і на зовнішнє середовище з метою упередження таких впливів.

## НАНОХИМІЯ БІОМЕТАЛЛОВ

*И. С. Чекман, Н.А. Горчакова, Г.А. Сырова, В.О. Калибачук, Л.Г. Шаповалова, Т.Ю. Небесная, Е.Р. Грабовецкая*

**Резюме.** Обобщены данные литературы о нанохимии биогенных элементов, в частности металлов. Основное внимание уделено методам получения наночастиц металлов и химическим реакциям с их участием. Рассмотрены методы стабилизации и физико-химические свойства наночастиц индивидуальных металлов, а также частиц, включающих атомы нескольких металлов. Выделены основные тенденции развития нового научного направления. Описаны процессы самоорганизации наночастиц металлов и обсуждены перспективы применения их в катализе, биологии и медицине.

**Ключевые слова:** нанохимия, нанофармакология, биометаллы, наночастицы, физико-химические свойства, самоорганизация.

## BIOMETALS NANOCHEMISTRY

*I.S. Chekman, N.A. Gorchakova, G.O. Sirova, V.A. Kalibabchuk, L.G. Shapovalova, T.U. Nebesnaya, E.R. Grabovetskaya*

**Abstract.** The literal data about biogenic elements, especially metals are generalized. The main attention has been made to the nanoparticles methods' receive and to chemical reactions with their part. The stabilization way and physico-chemical properties of individual metals' nanoparticles and nanoparticles including atoms of some metals are examined. The main development tendention of this new scientific direction have been traced. The nanoparticles self-organization processes are described. The perspectives of metals nanoparticles use in catalysis, biology and medicine have been discussed.

**Key words:** nanochemistry, nanopharmacology, biometals, nanoparticles, physico-chemical properties, self-organization.

*Список літератури у редакції: visnyk\_nmu@mail.ru*