

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 підвищеним 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

використовується для утворень одиниць 10^{-9}), в якості наночастинок слід розглядати частинки розміром від 0,1–100 нм. Наприклад, досліджує методи одержання та хімічні властивості частинок, що мають розміри 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 зв'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].

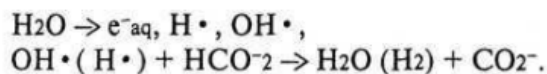
На теперішній час інтереси дослідників зосереджені на розробці методів одержання та стабілізації наночастинок металів у рідкій фазі. При цьому, особлива увага приділяється отриманню монодисперсних частинок. Значне місце у вирішенні проблеми одержання монодисперсних частинок посідають методи хімічного 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 диброміду біс[(триметиламоніо)деканоліаміно)етил] дисульфідом 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 амфільний полімер полі(октадецилсілоксан) [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 NaBH_4 та гідазином. Встановлено, що при відновленні NaBH_4 в основному утворюються невеликі частинки платини радіусом $\sim 2\text{--}3$ нм, а при відновленні гідазином – частинки розміром ~ 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 HCOONa одержано сферичні частини 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 CO_2^- .



Гідратовані електрони та іон-радикали CO_2^- відновлюють іони Co^{2+} , при цьому формуються наночастинок кобальту, що мають максимум поглинання в області 200 нм. Методом імпульсного радіолізу показано, що відновлення Co^{2+} і утворення наночастинок кобальту відбуваються за автокаталітичним механізмом. При радіаційно-хімічному відновленні іонів 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

при цьому особлив

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

Сферичні частинки міді розміром 20–100 нм одержано при γ -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 γ -радіолізі розчинів азотнокислого срібла у воді, етанолі та 0,01М 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 апротонному 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 $нА \cdot см^{-2}$ 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 діізооктилсульфосукцинатна натрію (АОТ). Змішування розчиненого в ізооктані АОТ з визначеною кількістю водного розчину перхлорату оксовісмуту $BiOClO_4$ призвело до утворення зворотних міцел. Міцелярний розчин $NaBO_4$ готували аналогічним чином з таким же відношенням $\alpha=[H_2O]:[АОТ]$. Обидва розчини змішували в атмосфері аргону [32].

Після витримування такої суміші протягом декількох годин при кімнатній температурі висаджувалися 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 ≥ 20 нм [30].

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

На теперішній час ведуться активні пошуки макромолекул, що можна використовувати як матриці для синтезу наночастинок. За 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 ± 2 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-

на функція полімерної оболонки втрачається; при цьому збільшується агрегація та прискорюється окиснення частинок металу. Протилежний результат отримують за умов зниження температури системи, що утворилася при 30 °С, до 11 °С: агрегація частинок не відбувається, їх розмір зберігається незмінним, 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 Ag^+ у присутності дендримерів з кінцевими аміно- та карбоксильними групами синтезовано частинки срібла з середнім розміром ~ 7 нм [37].

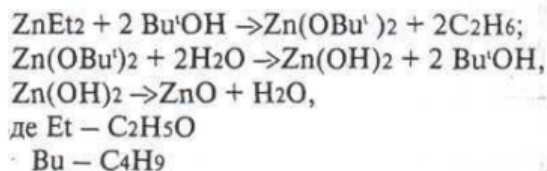
Розмір частинок можна контролювати, змінюючи природу дендримерів. За останній час для стабілізації наночастинок металів активно використовують дендримери на основі поліамідоамінів та їх різноманітних модифікацій. Приклад використання дендримерів як мікрореакторів для синтезу наночастинок металів наведено у роботі [34]. Монодисперсні сферичні поліамідоамінні дендримери прокикливі для низькомолекулярних реагентів. Додавання, наприклад, тетрахлорозолотоводневої кислоти $\text{H}[\text{AuCl}_4]$ до водного розчину дендримера, що містить первинні та третинні аміногрупи, призводить до появи протонованого дендримера з AuCl_4^- як протиіону. При відновленні аніонів AuCl_4^- борогідридом натрію утворюються частинки золота розміром 1–5 нм. Змінюючи відношення концентрації протиіонів 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 іоном нанорозмірних мембран [49]. Відновлення іонів металів у присутності амінодекстрину та стиролу призводить до утворення сферичних часточок полістірола 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 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 ~ 120 м²/г, – використовували для проведення реакції:

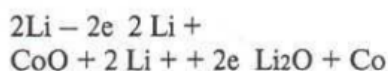


Процес проводили за температурою 250 °С, причому CCl_4 вводили в реакційну суміш порціями з інтервалом 7 хв. Діоксид вуглецю та CCl_4 , що не прореагував, аналізували методом газової хроматографії. Показано, що нанокристалічний оксид цинку більш активний, ніж звичайні комерційні препарати. Встановлено також, що на 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 фосфорвмісними 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 літєвих 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 Li₂O завжди розглядали як електрохімічно не активний. Авторам не вдалося електрохімічно розкласти Li₂O. 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 частинок, що містять два і навіть три різних метала.

Отримано та досліджено нові нанокристалічні гібридні матеріали ядро-оболонка, такі як TiO₂ – MoO₃ [27]. Частинок TiO₂ – (MoO₃)_x отримали сумісною нуклеацією оксидів металів на поверхні міцели. У таких матеріалах енергія фотопоглинання корелює з розміром частинок. При зменшенні розміру частинок TiO₂ – MoO₃ від 8 до 4 нм енергія поглинання зменшувалась від 2,9 до 2,6 еВ. Для порівняння можна констатувати, що енергії заборонених зон компактних TiO₂ і – MoO₃ 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 метала. 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 важливим 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-

характеризуються високою концент-
цією. Як живі клітини використовували
області мавп, а як біоматеріали застосову-
вали мічені флуоресцируючим білком су-
спензія плазмід (плазмід — позахромосомні ут-
ворення у вигляді замкнених кілець дволанцю-
го ДНК), а також плазмід з частинками зо-
лота розміром 5–10 нм. За допомогою УФ-
флуоресцентного мікроскопа показано, що
суспензія плазмід з золотом проникає в кліти-
ну. Особливо важливо, що проникає в клітину
створюється в її ДНК також суспензія
золотих наночастинок, що не містить золота. За думкою ав-
торів [23], цей результат найцікавіший, оскільки
у цьому випадку вдалося обійтися без золо-
та, що традиційно використовується для про-
никнення у клітину. Відмічено, що електро-
трансфекція відкриває нові можливості для
трансфекції і терапії генів.

В якості нових контрастних матеріалів для
магніторезонансних досліджень в медицині
пропонується застосовувати наночастинки з
мішками іонів гадолінію. Такі частинки
діаметром 120 нм достатньо малі і можуть лег-
ко проникати в кровоносні судини, що дало
можливість їх використати для одержання зоб-
раження серця та шлунково-кишкового тракту
у щурів [47].

Проводяться наукові дослідження щодо
застосування біомолекул для розпізнавання
розповсюджених неорганічних матеріалів. Це
можливо зробити, використовуючи принципи
селективного зв'язування, що відомі в молеку-
лярній біології. Застосування специфічного
зв'язування пептидів з різноманітними
напівпровідниками для створення нанокрис-
талічних ансамблів запропоновано у роботі
[58]. Показано, що за допомогою нанокрис-
талічних напівпровідників можна виділити
визначені пептиди, тому що останні з високою
специфічністю зв'язуються з поверхнею цих
напівпровідників. Як субстрати використову-
вали п'ять різноманітних поверхонь монокрис-
талів 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, дослідували за допомогою
антитіл, мічених наночастинками золота
розміром 20 нм, а також методами світової і
флуоресцентної мікроскопії, фотоелектронної
спектроскопії, атомно-силової і скануючої ту-
нелльної мікроскопії.

В роботі [53] проаналізовано перспективи
синтезу дво- і тримірних наноструктур на ос-
нові біологічних принципів. За думкою ав-
торів, у новому столітті отримає розвиток стра-
тегія синтезу складних ансамблів з більш простих.
Біологічні структури можуть бути вико-
ристані як поверхневі детектори для ор-
ганізації зв'язаних великих органічних
будівельних блоків. Фактично це дозволить
використовувати для одержання нових ма-
теріалів принципи створення складних
функціональних систем.

Аналіз робіт, що опубліковані в останні ро-
ки, показує, що багато аспектів нанохімії ме-
талів набувають все більшого значення і в їх
рішенні вже здобуто значний прогрес. Актив-
но вивчаються фактори, що впливають на
розмір і форму наночастинок, які одержують,
процеси самозбірки і самоорганізації, як са-
мих наночастинок, так і лігандів, що їх
стабілізують. Список полімерів, ПАР, зворот-
них міцел і тіолів, що традиційно застосову-
ються для стабілізації наночастинок успішно
доповнився дендримерами. Поширюється
застосування наночастинок у каталізі, а
напівпровідникових частинок — у фотока-
талізі. Більш інтенсивно ведуться роботи з ви-
користанням наночастинок металів у прове-
денні незвичайних реакцій. Стає більш акту-
альною проблема одержання і вивчення ре-
акцій металічних наночастинок, не захище-
них покриттями. Інтереси дослідників зміщу-
ються в бік вивчення реакцій металічних на-
ночастинок розміром менше 1 нм. Ще одне
перспективне направлення нанохімії може
розвиватися на стику таких наук, як біологія,
фармакологія, фармація, органічна та неор-
ганічна хімія, матеріалознавство. Взаємне
"розпізнавання" і сумісна самоорганізація не-
органічних і біологічних молекул є ключови-
ми проблемами, рішення яких повинно при-
вести до синтезу нових перспективних ма-
теріалів [7, 9, 15, 18].

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

- використання сучасної експерименталь-
ної техніки для вивчення процесів, що
відбуваються з наночастинками і на по-
верхні наноструктур;
- вивчення ролі наноструктур і таких важ-
ливих процесів, як осадження білків, де-
сорбція забруднень, стабілізація ко-

- лійдних дисперсій, агрегація міцел і регулювання рухливості мікроорганізмів;
- 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 БИОМЕТАЛЛОВ

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 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, organization.

Список літератури у редакції: visnyk_nmu@mail.ru