

УДК 546.55/.59+546.655

DOI <https://doi.org/10.33989/2022.8.1.275435>

**М.О. Маліношевська, О.А. Шидловська**

Київський Національний Університет Технологій та Дизайну  
вул. Немировича-Данченка, 2, Київ, 01011, Україна

[marimalinoshevska@gmail.com](mailto:marimalinoshevska@gmail.com)

ORCID 0000-0001-9964-695X

ORCID 0000-0002-6926-3672

## МЕТОДИ СИНТЕЗУ НАНОЧАСТОК СРІБЛА ТА ЦЕРІЮ

Дослідження наночастинок в даний час - область інтенсивного наукового інтересу через широкий спектр можливостей застосування в медико-біологічних галузях. Тому національні ініціативи в галузі нанотехнологій та дослідження наночастинок отримують широку державну підтримку в багатьох країнах світу. Методи синтезу наночастинок досить прості і можуть здійснюватись без спеціального лабораторного обладнання. Сам факт простоти процесу синтезу з технічного боку робить синтез і використання наночастинок у медицині, біотехнології та інших галузях діяльності людини вкрай привабливим. Наночастки срібла володіють ярко вираженою антибактеріальною дією проти широкого спектра бактеріальних збудників інфекцій. Для наночастинок церію описані антиоксидантні властивості, що забезпечують перспективу їх застосування в терапії пухлинних та вірусних захворювань. Саме тому метою роботи є аналіз та порівняння можливих методів синтезу наночастинок срібла та церію та виокремлення найперспективнішого методу. Проведений аналіз відомих методів синтезу наночастинок срібла та церію, а також порівняння їх переваг та недоліків, дозволило зробити висновок, що саме біологічний синтез наночастинок є найперспективнішим, зокрема з використанням рослинних екстрактів. Важливою особливістю біологічного методу синтезу наночастинок є відсутність токсичних відновників та складної багатоступінчатості процесу в порівнянні з хімічним методом синтезу. Також, біологічний метод синтезу дозволяє отримувати наночастки визначеного розміру та форми в широкому діапазоні значень, тоді як фізичний метод є дуже обмеженим. Регулювання розміру та форми наночастинок, отриманих біологічним синтезом забезпечується простою зміною умов синтезу, а саме значення рН, кислотності, концентрації відповідної солі металу і т.д. Зелений синтез є безпечним екологічним та економічно-вигідним методом синтезу наночастинок срібла та церію.

**Ключові слова:** наночастки; нанотехнології; біотехнологія; методи синтезу; срібло; церій.

Нанорозмірний стан для багатьох речовин істотно відрізняється від масивного стану у макромасштабах. Через велику частку поверхневих атомів, властивої наночасткам, їх фізико-хімічні параметри можуть зазнавати значних змін щодо параметрів, властивих масивному стану. Разом з тим, основу багатьох функціональних матеріалів складають саме наночастки з властивими нанорозмірними ефектами. Так, наноб'єкти срібла, церію та інших благородних металів завдяки високо питомій поверхні, унікальним оптичним та біологічним властивостям, таким як поверхнево-плазмонний резонанс, гігантське комбінаційне розсіювання, гасіння або посилення флуоресценції, активно застосовуються в косметології, біології, медицині, оптиці та аналітичній хімії (Wiley et al., 2005). Фізико-хімічні властивості наночастинок срібла та церію визначаються геометрією та станом поверхні. Залежно від вимог до властивостей цільових наночастинок їх форма і властивості поверхні можуть, як варіювати в широкому діапазоні, так і бути строго заданими. З постановкою все більш складних і комплексних завдань

зростають вимоги до колоїдів, що синтезуються, при цьому досить часто виникає потреба в розробці нових методів синтезу.

Успіх наукових досліджень і використання наночасток металів значною мірою залежить від можливостей методу синтезу – від того, чи дозволяє обраний метод отримати частинки, які відповідають вимогам поставленої наукової чи практичної задачі. При цьому однією з найважливіших проблем є синтез досить стабільних наночасток заданого розміру, які протягом тривалого часу зберігають високу хімічну або біологічну активність, тому питання отримання наночасток та процеси їх стабілізації необхідно розглядати в комплексі.

Основною метою обраного дослідження є вивчення методів синтезу наночасток срібла та церію.

Для реалізації поставленої мети у статті вирішено наступні завдання:

- аналіз хімічних методів синтезу срібла та церію;
- аналіз фізичних методів синтезу срібла та церію;
- аналіз біологічних методів срібла та церію.

В роботі використано методи аналізу, синтезу порівняння, дедукції, узагальнення.

Нині у літературі описані численні методи отримання наночасток срібла та церію. Найчастіше формуються найбільш стійкі з погляду термодинаміки сферичні частки. Однак з використанням ряду синтетичних підходів вдається одержувати препаративні кількості не-сферичних частинок паличкоподібної, трикутної, кубічної форми. Незалежно від геометрії частинок у кінцевому продукті умовно методи одержання можна розбити на три групи:

- 1). Фізичні методи синтезу, засновані на формуванні наночасток шляхом фізичного впливу;
- 2). Хімічні методи синтезу, у яких процес формування наночасток ініціюється хімічним впливом;
- 3). Біотехнологічні методи, засновані на відновленні сполук металів сполуками, які містяться у живих організмах, чи вироблюваних ними у процесі життєдіяльності.

Методи синтезу нанодисперсних систем за фундаментальними принципами одержання можна розділити на методи диспергування макроскопічних об'єктів («зверху-вниз») та конденсаційні методи («знизу-вгору»). Диспергування, як правило, відбувається за рахунок жорсткого фізичного впливу на метал (лазерна абляція та ін.). Конденсаційні методи засновані на формуванні нанооб'єктів з металовмісних сполук шляхом фізичної (радіоліз, соноліз та ін.) або хімічної дії (відновлення та ін.). Відповідно, всі диспергаційні та частина конденсаційних методів відносяться до фізичних методів, а більшість конденсаційних методів – до хімічних методів одержання нанооб'єктів.

### ***I. Фізичні методи синтезу наночасток срібла та церію***

Принципово фізичні методи синтезу срібла можна розбити на дві категорії:

- 1). Метод «зверху-вниз» або диспергування масивного металевого срібла (кріохімічний синтез, метод лазерної абляції, електроконденсаційний метод Сведберга);
- 2). Ініціювання процесу відновлення срібла шляхом фізичного впливу на прекурсори (радіоліз, соноліз, фотоліз).

Загальні принципи цієї групи методів синтезу засновані на диспергуванні макроскопічного металу шляхом жорсткого фізичного впливу та стабілізації отриманого диспергованого металу в конденсованому середовищі. З методів диспергування найбільш поширений кріохімічний синтез (Chen et al., 2010), лазерна абляція (Ruscenga et al., 2011) та електроконденсація (Yao et al., 2011).

В основі кріохімічного синтезу лежить випаровування металу у вакуумі з його подальшою співконденсацією з парами органічної сполуки на охолодженій рідким азотом поверхні. При співконденсації органічна сполука (стабілізатор) формує тверду матрицю з атомами металу, яка при подальшому нагріванні плавиться з утворенням органозолію. У цілому нині метод досить універсальний використовується для синтезу широкого спектра металевих колоїдів (Moskovits, 1989). Також цей метод дозволяє отримувати біметалічні колоїдні системи. Даний

метод ефективний для металів, що мають достатню летучість у вакуумі, але практично неприйнятний у разі тугоплавких металів. Для реакційноздатних металів як кріоматриці не підходять спирти та сполуки, що містять галогени, через формування алкоголятів або реактивів Гриньяра. Ще одним обмеженням методу є формування досить високостійких індивідуальних металоорганічних або металокомплексних сполук.

Оптимальними є системи метал – органічна сполука, в яких формуються відносно стійкі інтермедіатні сполуки, що дозволяють контролювати швидкість утворення атомарного металу в рідкому середовищі. Отже, для таких цілей меншою мірою підходить вода, спирти та галогеналкани, а найбільше підходять ароматичні вуглеводні за рахунок оборотного утворення бісаренових комплексів, здатні керувати розкладатися при руйнуванні кріоматриці з формуванням щодо монодисперсного колоїду металу.

Метод лазерної абляції заснований на опроміненні масивного металу пучком висококогерентного випромінювання великої інтенсивності, що призводить до випаровування металу та подальшому осадженні його в конденсованому середовищі.

В якості конденсованого середовища можуть бути як чисті середовища (метанол, етанол, етиленгліколь, дихлоретан, ацетон та ін), так і розчини, що містять стабілізатори, наприклад, цитрат, ПАВ, полімери.

Перевага методу полягає у отриманні колоїдів з мінімальним числом компонентів у середовищі.

Наступним фізичним методом отримання золів металів, основу якого лежить процес конденсації (принцип «згори донизу»), є електроконденсаційний метод Сведберга. Високочастотний струм діапазону 800-900 кГц пропускають через порошок срібла диспергований в органічному розчиннику (Новожилов, & Лунина, 1968). При цьому формується атомарний метал, що утворює наночастки, що стабілізуються компонентами доквіллям.

За підсумками цього методу М. А. Лунина розробили метод синтезу дисперсій металів в органічному середовищі шляхом пропускання імпульсного струму високої частоти (Лунина, & Новожилов, 1969). У ряді випадків вдається одержувати високодисперсні колоїди. Так практично незалежно від природи металу у водноацетоновому середовищі середній розмір синтезованих наночастинок становить 1,5 нм. Однак, у процесі синтезу органічне середовище частково піддається деструкції та продукти розпаду забруднюють поверхню наночастинок.

Нанорозмірний оксид церію можна одержати різними синтетичними способами, наприклад, осадженням, гідротермальним:

#### 1). Метод осадження.

Це найпоширеніший спосіб отримання наночастинок оксиду церію завдяки зручності та простоті виконання. На відміну від інших методів одержання, він не потребує дорогої сировини, а сам процес синтезу простий, з апаратним забезпеченням і може бути модифікований. Метод спрямований на одержання кристалографічної структури, є легкокеруваним і використовується в промисловості. Суть методу полягає в осадженні солей церію у водному середовищі зміною величини рН при кімнатній або підвищеній температурі з подальшою термічною обробкою осадів (Kitsou, Roussi, & Tsetsekou, 2017).

Недоліком методу є те, що цей метод потребує ретельно підібраних параметрів синтезу, адже значення рН, концентрація водного розчину, природа осаджуючого агента, температура реакції та час старіння, впливають на морфологію продукту. За допомогою цього методу переважно отримують сферичні частинки, через що важко контролювати морфологію продукту. Крім того, отримані наноматеріали  $\text{CeO}_2$  нерівномірно розподіляються за розміром, є слабкодисперсними та легко агрегуються після термічної обробки (Zhang et al., 2012).

#### 2). Гідротермальний метод.

Стандартні методи, такі як преципітація та співосадження, не гарантують високого ступеня морфологічної однорідності. Для контролю форми та розміру частинок під час синтезу застосовують гідротермальний метод. Суть методу полягає у тому, що хімічна реакція відбувається в автоклаві, в якому розчин нагрівається під тиском, а розчинником є вода.

Перевагою цього методу синтезу нанорозмірного оксиду церію є те, що температура реакції нижча за температуру плавлення реагентів. Крім того, можна легко регулювати такі робочі параметри, як температура та тривалість реакції, вибір типу автоклаву допомагає налаштуватися до змін параметрів синтезу неорганічних твердих речовин. Як і метод осадження, цей метод використовують для одержання переважно кристалічних, а не аморфних структур.

Дотримуючись чітких методологічних рекомендацій, гідротермальним методом можна отримати нанокристали оксиду церію різної форми: стрижні, дроти, трубки, багатогранники, куби.

Але, не зважаючи на простоту процедури гідротермального методу, все ж він є недостатньо керованим для отримання наноструктур  $\text{CeO}_2$  з заданою морфологією і геометрією.

## **II. Хімічні методи синтезу наночастинок срібла та церію**

Хімічні методи синтезу колоїдів срібла більш поширені порівняно з фізичними методами через ширші можливості контролю процесу шляхом використання широкого спектра хімічних сполук (відновників, стабілізаторів), а також варіюванням концентрацій та умов.

Крім того для реалізації хімічних методів синтезу, як правило, не потрібно високотехнологічне обладнання, що суттєво розширює коло дослідників, які використовують їх як основні.

Спочатку цей метод був розроблений Туркевичем для отримання золів золота (Turkevich, Stevenson, & Hiller, 1951). Золотохлористоводнева кислота відновлюється при кип'ятінні у водному розчині цитрату натрію з утворенням наночастинок золота із середнім діаметром  $20 \pm 1,5$  нм. Пізніше за аналогічною методикою були отримані наночастинок срібла значно більшого діаметра та більшим розкидом за розмірами (Jin et al., 2001). Незважаючи на більший розмір частинок та меншу відтворюваність по відношенню до золотих, цей метод активно застосовується при синтезі срібних золів.

Головним недоліком даного методу є одночасне використання цитрат-іону і як відновник і як стабілізатор. З цієї причини неможливо незалежно керувати, як формуванням, зростанням та стабілізацією наночастинок, і швидкістю відновлення.

Золь-гель метод. Метод дуже підходить для виготовлення наноксидів металів (Zhen, & Vossaccini, 2021). Він легкий і не потребує будь-яких спеціальних умов. Процес передбачає перетворення розчину алкоксиду або хлориду металу в колоїдну суспензію (золу) з наступним гелеутворенням золю. В результаті утворюються дискретні частинки або сітчасті полімери в безперервній рідкій фазі (гель).

Природа попередника металу та розчинника відіграє значну роль у цьому способі синтезу наночастинок оксидів металів. Так, наприклад, у роботі (Dargoudi et al., 2013) синтезували наночастинок оксиду церію золь-гель методом в желатиновому середовищі. Вихідним реагентом слугував нітрат церію  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ , гідроліз проводили розчином аміаку.

Довголанцюговий желатин був використаний для росту наночастинок оксиду церію та їх стабілізації. Таким чином був виготовлений нанорозмірний оксид церію з кубічною структурою флюориту з розмірами менше 10 нм.

Мікроемulsionний метод є універсальним на шляху до отримання наночастинок оксидів металів. Мікроемulsion – це колоїдний розчин, який складається з двох незмішуваних розчинників. Зазвичай синтез мікроемulsionних наночастинок включає хімічну реакцію в водному середовищі, внаслідок якої розчинні прекурсори переходять в нерозчинний продукт. Хоча метод мікроемulsionсії часто називають шаблоном, досить складно прогнозувати розмір синтезованих частинок, адже склад мікроемulsionсійної системи досить сильно впливає на процеси зародження та росту кристалітів.

Використання поверхнево-активних речовин дозволяє отримувати монодисперсні частинки. Дуже важливо правильно обрати ПАВ, які будуть використовуватися для синтезу наноксиду церію, так як ці речовини впливають на заряд поверхні, що може зашкодити властивостям кінцевого продукту. Наночасточки оксиду церію, синтезовані цим методом, виявляють каталазоподібну активність, тому його можна використовувати для синтезу наночастинок медичного призначення (Shlara et al., 2019).

### III. Синтез наночастинок з використанням рослин – біологічний метод

«Зелений» синтез – метод отримання металевих наночастинок різної морфології із солей відповідних металів з використанням як відновлюючих та стабілізуючих агентів екстракти рослин. Метод дозволяє отримувати металеві наночастки розміром від 10 до 500 нм сферичної, тригранної, пентагональної і гексагональної форм. Водне середовище використовується для «зеленого» синтезу замість органічного розчинника (Annu et al., 2019).

Термін «зелений» застосовують до екологічно безпечного та нешкідливого використання менш енерговитратних, нетоксичних хімічних речовин біологічного походження для синтезу наночастинок. В якості стабілізатора та комплексоутворюючого агента (хелатного) використовують природні органічні матриці, як-от: рослинні екстракти, біополімери, гриби, поживні речовини тваринного походження. Тому цей метод ідеально підходить для синтезу наночастинок  $\text{CeO}_2$ , призначених для фармацевтичного застосування. Частинки, синтезовані цим методом, зазвичай мають сферичну форму.

В оглядовій роботі (Charbgo, Ahmad, & Darroudi, 2017) зроблено класифікацію методів зеленого синтезу за природою утримуючого та стабілізуючого агента. За цією класифікацією, існує фітосинтез, коли для отримання наночастинок оксиду церію використовують рослинні екстракти. Використання рослин дозволяє отримати малотоксичні сферичні частинки, а сам процес є простим та економічно вигідним. Як сировину можна використовувати, наприклад, екстракти: листя Лоху вузьколистого (*Elaeagnus angustifolia*), одержуючи з частинки розміром 30-75 нм, Глоріози розкішної (*Gloriosa superba*) – 5 нм, Акаліфи індійської (*Acalypha indica*) – 25-30 нм, Алоє вера (*Áloë véra*) та Маслини європейської (*Olea europaea*) – 24 нм; з рослинного екстракту лимонної трави (лемонграссу) – від 10 до 40 нм, екстракту насіння Льону звичайного (*Linum usitatissimum*) – 21 нм, екстракту кори Пікрасма (*Picrasma quassioides*) – 24-30 нм, Моринги маслянистої (*Moringa oleifera*) – 40-45 нм. Можливий також так званий мікосинтез – біосинтез частинок з використанням грибів, наприклад, *Humicola sp.* (12-20 нм), *Curvularia lunata* (5-20 нм), Аспергілл чорний (*Aspergillus niger*) (5-20 нм). Але недоліком є те, що в деяких випадках отримані частинки неоднорідні за морфологією, здатні до агломерації та мають широкий розмірний діапазон.

Використовують в якості стабілізуючого агента й органічні сполуки (біополімери): дубильну кислоту, пектин (40 нм), хітозан (23 нм). Існують спроби синтезувати наночастинки «зеленим» методом, використовуючи поживні речовини, такі як свіжий яєчний білок (8-18 нм) або, наприклад, мед (23 нм).

Механізм синтезу металевих наночастинок у рослинних екстрактах включає три основні фази:

- 1) фазу активації, де відбувається відновлення іонів металу;
- 2) зростання, що супроводжується збільшенням термодинамічної стабільності наночастинок;
- 3) фазу термінації процесу, що визначає остаточну форму наночастинок.

Відновлення солей супроводжується зміною кольору розчину від жовтого до фіолетового, темно-коричневого, чорного і темно-зеленого залежно від компонентів, що використовуються. Для отримання високої якості таких наночастинок використовуються різні концентрації екстрактів рослини та солей, рН екстрактів, оптимальні умови проведення синтезу, інтервал температур від 10 до 300°C. Даним методом отримують різні металеві наночастки, такі як золото, срібло, платина, цинк, мідь, окис титану, магнетит та нікель. Використовують різні частини рослин, такі як стебло, корінь, фрукти, насіння, шкірка, листя та квітка.

Рослинний свіжий екстракт містить різні метаболіти, такі як поліфеноли, флавоноїди, алкалоїди і терпеноїди, фенольні кислоти, цукру і білки, в яких ці складні головним чином відповідальні за відновлення іонів і формування металевих наночастинок. Різноманітність рослинних екстрактів, реакційної суміші та умов проведення реакції шляхом зміни температури, рН реакційної суміші та включення добавок біологічного походження (біоматриць) дозволяють створювати наночастки різних металів певного розміру та форми.

Безперечно, «зелений» синтез є екологічно чистим, ефективним і безпечним методом синтезу. Він не потребує використання високих тисків та температури, токсичних та екологічно шкідливих реагентів і розчинників. Але і цей метод має певні обмеження. Доведено, що кристали з меншими розмірами (а отже, з більшою площею поверхні) виявляють вищу антибактеріальну активність, ніж більш агреговані частинки. На практиці ж отримані частинки зазвичай більшого розміру, ніж розраховано. Наприклад, в роботі (Elahi, 2018) в ролі стабілізуючого агенту використовували екстракт насіння Шавлії довготрубчаної (*Salvia macrosiphon* Boiss). Розмір кристалітів, одержаних у трьох синтезах, розрахований за рівнянням Шеррера по рентгенограмам становив 11, 9 і 10 нм, тоді як з СЕМ знімків – відповідно 40, 20, 20 нм. Вірогідно відбувається агломерація кристалітів. Тому частинки, синтезовані методом зеленого синтезу, мають великі розміри, внаслідок чого падає антибактеріальна активність, через що їхнє використання в біомедичній сфері перестає бути доцільним (Kumar et al., 2014).

**Висновки.** В даній статті розглянуто більшість відомих методів синтезу наночастинок срібла та церію, проаналізовано їх переваги та недоліки. Встановлено, що завдяки своїм унікальним властивостям, нанорозмірний оксид срібла та церію мають широкий спектр застосування. Наночастки оксиду срібла та церію та матеріали на їх основі широко використовуються в екологічній, промисловій, біоаналітичній та біомедичній сферах. Наночастки оксиду церію використовуються для каталізу завдяки їх високій каталітичній ефективності, термічно стабільній структурі та добрій селективності. Саме метод «зеленого синтезу» металічних наночастинок є найбільш ефективним, економічно-вигідним та екологічним в порівнянні з класичними методами.

#### Список використаної літератури:

- Лунина М. А., Новожилов Ю. А. Электрический конденсационный способ получения органодисперсий металлов. *Коллоидный журнал*. 1969. Т. 31. С. 467–470.
- Новожилов Ю. А., Лунина М. А. Адсорбция жирных кислот и спиртов на высокодисперсном никеле. *Журнал физической химии*. 1968. Т. 42. С. 2114–2115.
- Behavior of nanoceria in biologically-relevant environments / A. Kumar et al. *Environmental Science Nano*. 2014. Vol. 1(6). P. 516–532. DOI: 10.1039/x0xx00000x
- Charbgo F, Ahmad M. B., Darroudi M. Cerium oxide nanoparticles: Green synthesis and biological applications. *International Journal of Nanomedicine*. 2017. Vol. 12. P. 1401–1413. DOI: 10.2147/IJN.S124855. URL: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000394468300001>
- Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic / M. Rycenga et al. *Chemical Reviews*. 2011. Vol. 111(6). P. 3669–3712. DOI: 10.1021/cr100275d
- Sergeev B., Sergeev G., Prusov A. Cryochemical synthesis of bimetallic nanoparticles in the silver–lead– methylacrylate system. *Mendelev Communications*. 1998. Vol. 8(1). P. 1–2.
- Design. fabrication and characterization of indefinite metamaterials of nanowires / J. Yao et al. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2011. Vol. 369. P. 3434–3446. DOI:10.1098/rsta.2011.0159
- Facile synthesis, characterization, and evaluation of neurotoxicity effect of cerium oxide nanoparticles / M. Darroudi et al. *Ceramics International*. 2013. Vol. 39(6). P. 6917–6921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.02.026>
- Kitsou I., Roussi E., Tsetsekou A. Synthesis of aqueous nanodispersed nanocrystalline ceria suspensions by a novel organic/inorganic precipitation method. *Ceramics International*. 2017. Vol. 43(4). P. 3861–3865.
- Measuring Ensemble-Averaged Surface-Enhanced Raman Scattering in the Hotspots of Colloidal Nanoparticle Dimers and Trimers / G. Chen et al. *Journal of the American Chemical Society*. 2010. Vol. 132(11). P. 3644–3645. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja9090885>
- Moskovits M. *Chemistry and Physics of Matrix Isolated Species*. Amsterdam : North Holland, 1989. 430 p.
- Photoinduced Conversion of Silver Nanospheres to Nanoprisms / R. Jin et al. *Science*. 2001. Vol 294, Issue 5548. P. 1901–1903. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1066541>. DOI: 10.1126/science.1066541
- Phytomediated synthesis of cerium oxide nanoparticles and their applications / Annu Ali A. et al. *Nanomaterials and Plant Potential* /eds.: Azamal Husen, Muhammad Iqbal. Cham, 2019. P. 261–284.
- Preparation of cerium oxide nanoparticles in *Salvia Macrosiphon Boiss* seeds extract and investigation of their photo-catalytic activities / B. Elahi et al. *Ceramics International*. 2019. Vol. 45(4). P. 4790–4797. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218332917?via%3Dihub#>
- Preparation of silver nanoparticles by laser ablation in polyvinylpyrrolidone solutions / T. Tsujia et al. *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254(16). P. 5224–5230.
- Sakamoto M., Fujistuka M., Majima T. Light as a construction tool of metal nanoparticles: Synthesis and mechanism. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 2009. Vol. 10(1). P. 33–56.
- Shape-controlled synthesis and catalytic application of ceria nanomaterials / D. Zhang et al. *Dalton Transactions*. 2012. Vol. 41(48). P. 14455–14475.
- Shape-controlled synthesis of metal nanostructures: the case of silver / B. Wiley et al. *Chemistry*. 2005. Vol. 11(2). P. 454–463. DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.200400927>

**M.O. Malinoshevska, O.A. Shydlovska**

Kyiv National University of Technologies and Design

## SILVER AND CERIUM NANOPARTICLES SYNTHESIS METHODS

The study of nanoparticles is currently an area of intense scientific interest due to a wide range of application possibilities in medical and biological fields. Therefore, national initiatives in the field of nanotechnology and nanoparticle research receive broad government support in many countries of the world. Nanoparticle synthesis methods are simple and can be carried out without special laboratory equipment. The very fact of the simplicity of the synthesis process from the technical side makes the synthesis and use of nanoparticles in medicine, biotechnology and other fields of human activity extremely attractive. Silver nanoparticles have a pronounced antibacterial effect against a wide range of bacterial pathogens. The antioxidant properties of cerium nanoparticles are described, which provide the prospect of their use in the therapy of tumor and viral diseases. That is why the purpose of the work is to analyze and compare possible methods of synthesis of silver and cerium nanoparticles and to single out the most promising method. The analysis of the known methods of synthesis of silver and cerium nanoparticles, as well as a comparison of their advantages and disadvantages, allowed us to conclude that the biological synthesis of nanoparticles is the most promising, in particular with the use of plant extracts. An important feature of the biological method of synthesis of nanoparticles is the absence of toxic reducing agents and the complex multi-stage process in comparison with the chemical method of synthesis. Moreover, the biological method of synthesis allows obtaining nanoparticles of a certain size and shape in a wide range of values, while the physical method is very limited. Regulation of the size and shape of nanoparticles obtained by biological synthesis is provided by a simple change of the synthesis conditions, namely the pH value, acidity, concentration of the corresponding metal salt, etc. Green synthesis is a safe ecological and cost-effective method of synthesis of silver and cerium nanoparticles.

**Key words:** nanoparticles; nanotechnology; biotechnology; synthesis methods; silver; cerium.

### References

- Annu, Ali A., Gadkari, R., Sheikh, J. N., & Ahmed, S. (2019). Phytomediated synthesis of cerium oxide nanoparticles and their applications. In Zamal Husen, Muhammad Iqbal (Eds.), *Nanomaterials and Plant Potential* (pp. 261-284). Cham.
- Charbgo, F., Ahmad, M. B., & Darroudi, M. (2017). Cerium oxide nanoparticles: Green synthesis and biological applications. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 1401-1413. Retrived from <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000394468300001>. doi: 10.2147/IJN.S124855.
- Chen, G., Wang, Y., Yang, M., Xu, J., Goh, S. J., Pan, M., & Chen, H. (2010). Measuring Ensemble-Averaged Surface-Enhanced Raman Scattering in the Hotspots of Colloidal Nanoparticle Dimers and Trimers. *Journal of the American Chemical Society*, 132(11), 3644-3645. doi: <https://doi.org/10.1021/ja9090885>
- Elahi, Behrouz, Mirzaee, Mahdi, Darroudi, Majid Kazemi Oskuee, Reza, Sadri, Kayvan, & Amiri, Mohammad Sadegh. (2019). Preparation of cerium oxide nanoparticles in *Salvia Macrosiphon Boiss* seeds extract and investigation of their photocatalytic activities. *Ceramics International*, 45(4), 4790-4797. Retrived from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218332917?via%3Dihub#>
- Jin, R., Cao, Y. W., Mirkin, C. A., Kelly, K. L., Schatz, G. S., & Zheng, J. G. (2001). Photoinduced Conversion of Silver Nanospheres to Nanoprisms. *Science*, 294(5548), 1901-1903. Retrived from <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1066541>. doi: 10.1126/science.1066541
- Kitsou, I., Roussi, E., & Tsetsekou, A. (2017). Synthesis of aqueous nanodispersed nanocrystalline ceria suspensions by a novel organic/inorganic precipitation method. *Ceramics International*, 43(4), 3861-3865.
- Kumar, A., Das, S., Munusamy, P., Self, W., Baer, D. R., Sayle, D. C., & Seal, S. (2014). Behavior of nanocerium in biologically-relevant environments. *Environmental Science: Nano*, 1(6), 516-532. doi: 10.1039/x0xx00000x
- Lunina, M. A., & Novozhilov, Iu. A. (1969). Elektricheski kondensatsionnyi sposob polucheniia organodispersii metallov [Electric condensation method for obtaining metal organodispersions]. *Colloid Journal*, 31, 467-470 [in Russian].
- Moskovits, M. (1989). *Chemistry and Physics of Matrix Isolated Species*. Amsterdam: North Holland.
- Novozhilov, Iu. A., & Lunina, M. A. (1968). Adsorbtsiia zhirnykh kislot i spirtov na vysokodispersnom nikel [Adsorption of fatty acids and alcohols on highly dispersed nickel]. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 42, 2114-2115 [in Russian].
- Rycenga, M., Cogley, C. M., Zeng, J., Li, W., Moran, C. H., Zhang, Q., Qin, D., & Xia, Y. (2011). Controlling the synthesis and assembly of silver nanostructures for plasmonic applications. *Chemical Reviews*, 111(6), 3669-3712. doi: 10.1021/cr100275d
- Sakamoto, M., Fujistuka, M., & Majima, T. (2009). Light as a construction tool of metal nanoparticles: Synthesis and mechanism. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 10(1), 33-56.
- Sergeev, B., Sergeev, G., & Prusov, A. (1998). Cryochemical synthesis of bimetallic nanoparticles in the silver-lead-methylacrylate system. *Mendeleev Communications*, 8(1), 1-2.
- Tsujia, T., Thanga, D.-H., Okazakib, Y., Nakanishib, M., Tsuboic, Y., & Tsujia, M. (2008). Preparation of silver nanoparticles by laser ablation in polyvinylpyrrolidone solutions. *Applied Surface Science*, 254(16), 5224-5230.
- Wiley, B., Sun, Y., Mayers, B., & Xia, Y. (2005). Shape-controlled synthesis of metal nanostructures: the case of silver. *Chemistry*, 11(2), 454-463. doi: <https://doi.org/10.1002/chem.200400927>
- Yao, J., Wang, Y., Tsai, K.-T., Liu, Z., Yin, X., Barta, G., Stacy, A. M., Wang, Y.-L., & Zhang, X. (2011). Design, fabrication and characterization of indefinite metamaterials of nanowires. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 369, 3434-3446. doi:10.1098/rsta.2011.0159
- Zhang Dongsong, Du Xianjun, Shi Liyi, & Gao Ruihua. (2012). Shape-controlled synthesis and catalytic application of ceria nanomaterials. *Dalton Transactions*, 41(48), 14455-14475.