

MICROBIAL POLYSACCHARIDES IN THE BIOSYNTHESIS OF METAL NANOPARTICLES

T. Pirog^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0002-3873-2253>

M. Kachkivska¹, <https://orcid.org/0009-0000-2846-2600>

¹National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

²Institute of Microbiology and Virology of NASU, Kyiv, Ukraine

Key words:

Biotechnology
Biosynthesis
Nanoparticles
Microorganisms

Article history:

Received 04.03.2026

Received in revised form
20.03.2026

Accepted 08.04.2026

Published 30.04.2026

Corresponding author:

T. Pirog

E-mail:

tapirog@nuft.edu.ua

Citation: Пирог Т. П., Качківська М. О. (2026). Мікробні полісахариди у біосинтезі наночастинок металів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 32(2), 84—106.

<https://doi.org/10.24263/225-2924-2026-32-2-8>

ISSN 2617-1945 (online)

ISSN 2225-2924 (print)



ABSTRACT

Current scientific data on the biosynthesis of metal nanoparticles using microbial exopolysaccharides were summarized and their properties as well as prospects for practical application were analyzed. It was shown that metal nanoparticles with sizes of 1—100 nm were characterized by unique physicochemical and biological properties, including high reactivity, a large surface area-to-volume ratio, and pronounced antimicrobial, catalytic, and optical activity. These features determined their wide application in medicine, the food industry, bioelectronics, environmental protection, and other fields.

Particular attention was paid to «green» methods of nanoparticle synthesis using microbial exopolysaccharides, which performed a dual function as reducing agents of metal ions and stabilizers of the formed nanostructures. The results of studies on the biosynthesis of silver nanoparticles involving exopolysaccharides of bacteria, cyanobacteria, microalgae, and fungi were analyzed. It has been found that silver nanoparticles were the most extensively studied, characterized by a diversity of shapes and sizes, and exhibited pronounced antimicrobial, antioxidant, and catalytic activity.

The features of gold nanoparticle biosynthesis using microbial polysaccharides were considered. Such nanoparticles were shown to possess high stability, biocompatibility, and significant potential for biomedical applications, particularly in drug delivery, diagnostics, and therapy. Special attention was also paid to the possibility of synthesizing nanoparticles of other metals (zinc, nickel, iron, cadmium, selenium), which demonstrated promising antimicrobial, cytotoxic, and catalytic properties.

The presented data indicated the high potential of microbial exopolysaccharides as environmentally friendly agents for the development of functional nanomaterials with a wide range of applications.

DOI: 10.24263/225-2924-2026-32-2-8

МІКРОБНІ ПОЛІСАХАРИДИ В БІОСИНТЕЗІ НАНОЧАСТИНОК МЕТАЛІВ

Т. П. Пирог^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0002-3873-2253>

М. О. Качківська¹, <https://orcid.org/0009-0000-2846-2600>

¹Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

²Інститут мікробіології та вірусології НАНУ, Київ, Україна

У статті узагальнено сучасні наукові дані щодо біосинтезу металевих наночастинок за участю мікробних екзополісахаридів та проаналізовано їхні властивості і перспективи практичного застосування. Показано, що наночастинки металів розміром 1–100 нм характеризуються унікальними фізико-хімічними та біологічними властивостями, зокрема високою реакційною здатністю, значним співвідношенням площі поверхні до об'єму, антимікробною, каталітичною та оптичною активністю. Це зумовлює їх широке використання у медицині, харчовій промисловості, біоелектроніці, екології та інших галузях.

Особливу увагу приділено «зеленим» методам синтезу наночастинок з використанням мікробних екзополісахаридів, які виконують подвійну функцію — відновників іонів металів і стабілізаторів утворених наноструктур. Проаналізовано результати досліджень щодо біосинтезу наночастинок срібла за участю екзополісахаридів бактерій, ціанобактерій, мікроводоростей і грибів. Встановлено, що найбільш вивченими є саме наночастинки срібла, які характеризуються різноманітністю форм і розмірів та проявляють виражену антимікробну, антиоксидантну й каталітичну активність.

Також розглянуто особливості біосинтезу наночастинок золота за участю мікробних полісахаридів. Показано, що такі наночастинки відзначаються високою стабільністю, біосумісністю та значним потенціалом у біомедичних застосуваннях, зокрема для доставки лікарських засобів, діагностики й терапії. Окрему увагу приділено можливості синтезу наночастинок інших металів (цинку, нікелю, заліза, кадмію, селену), які демонструють перспективні антимікробні, цитотоксичні та каталізаторні властивості.

Наведені дані свідчать про високий потенціал мікробних екзополісахаридів як екологічно безпечних агентів для створення функціональних наноматеріалів із широким спектром застосування.

Ключові слова: біотехнологія, біосинтез, наночастинки, мікроорганізми.

Постановка проблеми. Останнім часом дослідницький інтерес до металевих наночастинок та їх виробництва значно зріс через їх інноваційне застосування в різних галузях промисловості. Наночастинки — це дисперсії твердих частинок з розміром від 1 до 100 нм. Наночастинки відкрили різні фронти для розробки нових матеріалів та оцінки їхніх властивостей шляхом модуляції розміру частинок, морфології та розподілу. Наночастинки металів широко досліджуються завдяки їхнім унікальним характеристикам, таким як антимікробна, протипухлинна та каталітична активність, а також магнітні й оптичні властивості. Найважливішою властивістю металевих наночастинок є їх велике відношення площі поверхні до об'єму,

що збільшує їхню взаємодію з іншими молекулами. Завдяки цим перспективним характеристикам наночастинки привертають значну увагу в різноманітних сферах застосування, таких як біохімічні сенсори, електронне обладнання, каталізatori, біоаналіз, візуалізація пухлин, доставка ліків і процедури фармацевтичного лікування (Gahlawat, 2019; Bilesky-Jose, 2025; Tijani, 2025).

Одним із перспективних напрямів сучасної нанотехнології є використання наночастинок металів (найчастіше срібла, цинку, титану, заліза) у харчовій промисловості (Joshi та ін., 2024). Так, наночастинки металів додають до полімерів для створення «активного пакування» з антимікробними властивостями, що подовжує термін зберігання продуктів (Adeyemi та Fawole, 2023), використовують у біосенсорах для виявлення токсинів, патогенів і алергенів (Couto та Almeida, 2022), наноматеріали можуть покращувати біодоступність поживних речовин і стабільність інгредієнтів (Altemimi та ін., 2024), наночастинки заліза застосовують для видалення мікотоксинів і гістаміну (Góral та ін., 2023).

Мікробні екзополісахариди (ЕПС) — це екзогенні полімери вуглеводної природи, які завдяки своїй хімічній структурі та функціональним групам здатні одночасно відновлювати іони металів і стабілізувати утворені наночастинки. Проте, незважаючи на значний потенціал таких біополімерів, існує ряд невирішених питань, що пов'язані з механізмами біосинтезу наночастинок за їх участі та впливом складу ЕПС на властивості наночастинок (Gahlawat та Choudhury, 2019).

На сьогодні більшість літературних даних присвячена дослідженню біосинтезу наночастинок срібла за наявності мікробних екзополісахаридів. Поодинокими є відомості про отримання наночастинок інших металів за участю ЕПС мікробного походження, наприклад, цинку та нікелю (Garza-Cervantes та ін., 2019), кадмію (Raj та ін., 2016), заліза (Gholampoor, 2015; Vignesh, 2015), селену (Concórdio-Reis, 2023; Shehata, 2024).

Таким чином, існує потреба в систематизації наукових даних щодо особливостей біосинтезу металевих наночастинок за участю мікробних екзополісахаридів, поглибленні розуміння механізмів цього процесу та оцінці перспектив їх практичного застосування, що і є **метою** пропонованого дослідження.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження стали наукові публікації зарубіжних учених у провідних періодичних і спеціалізованих світових виданнях, що стосуються використання мікробних полісахаридів для біосинтезу наночастинок металів.

Викладення основних результатів дослідження. Наночастинки срібла. У літературі є відомості про синтез наночастинок срібла (AgNPs) за участю ЕПС, синтезованих бактеріями (Ahmed, 2014; Cui, 2025; Gholampoor, 2015; Gomaа, 2016; İspirli, 2021; Kanmani, 2013; Li, 2016; Mehta, 2014; Rajoka, 2020; Saravanan, 2017; Thota, 2020; Yumei, 2017; Zaki, 2014), ціанобактеріями (Aletayeb та ін., 2020), мікроводоростями (El-Naggar, 2020; Patel, 2015), грибами (Ansari, 2018; Raza, 2021). Серед бактерій продуцентами ЕПС, які використовують для біосинтезу наночастинок срібла (AgNPs), є молочнокислі бактерії (Gomaа, 2016; İspirli, 2021; Kanmani, 2013; Rajoka, 2020; Saravanan, 2017; Zang 2024), бактерії роду *Bacillus* (Gholampoor, 2015; Thota, 2020; Zaki, 2014) та представники інших родів — *Acetobacter*, *Aeromonas*, *Arthrobacter*, *Pseudoduganella*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Shewanella* (Ahmed, 2014; Cui, 2025; Gholampoor, 2015; Li, 2016; Yumei, 2017).

Екзополісахариди грампозитивних бактерій для біосинтезу наночастинок срібла. У праці (Saravanan та ін., 2017) встановлено, що ЕПС, синтезований *Leucostoc lactis*, у середовищі MRS з сахарозою, є гомополісахаридом (складається лише із залишків глюкози). Утворення наночастинок ідентифікували за зміною безбарвного розчину на жовтий. УФ-спектроскопічний аналіз виявив характерний максимум поглинання в діапазоні 400—550 нм. Синтезовані AgNPs мали переважно сферичну форму із середнім розміром близько 35 нм (у межах 30—200 нм) і виявляли виражену каталітичну активність, зокрема забезпечували повну деградацію азобарвників упродовж 240 хв.

Rajoka із співавт. (2020) повідомили про біосинтез AgNPs з використанням ЕПС *Lactobacillus brevis* MSR104. Бактерії культивували в середовищі MRS із сахарозою (концентрація ЕПС становила 0,16 г/л). Отримані наночастинок були сферичними та характеризувалися вираженою біологічною активністю. Вони проявляли антимікробні властивості щодо *Escherichia coli* та *Staphylococcus aureus* із мінімальними інгібуючими концентраціями 8,2 та 12,5 мкг/мл відповідно. Крім того, AgNPs виявляли антиоксидантну активність, досягаючи 75% інгібування оксиду азоту при концентрації 100 мкг/мл, а також цитотоксичну дію щодо ракових клітин при аналогічній концентрації.

Утворення AgNPs за участю ЕПС *Lactobacillus brevis* NM101-1 підтверджували як зміною кольору реакційної суміші на жовтувато-коричневий, так і УФ-спектральними характеристиками (Gomaа, 2016). Синтезовані наночастинок проявляли антимікробну активність проти широкого спектра мікроорганізмів, включаючи *Bacillus subtilis* NCTC-10400, *S. aureus* ATCC-29213, *Streptococcus pneumoniae* ATCC-109857, *E. coli* ATCC-10536, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC-10145, *Salmonella typhi* NCIMB-9331. Так, діаметр зон затримки росту (мм) становив: *E. coli* ATCC-10536 — 10,30; *P. aeruginosa* ATCC-10145 — 9,56; *B. subtilis* NCTC-10400 — 3,44.

ЕПС *Lactobacillus rhamnosus* GG ATCC складаються з мономерів арабінози, фруктози та галактози (Kanmani та Lim, 2013). Наночастинок срібла, які були синтезовані з використанням даних ЕПС, характеризувалися значною морфологічною різноманітністю (сферичні, трикутні, паличкоподібні, гексагональні форми) та малими розмірами (2—15 нм, у середньому 10 нм). Такі наночастинок проявляли як антимікробну, так і антибіоплівкову активність. Зокрема, при збільшенні концентрації AgNPs з 0,2 до 2 мг/мл спостерігали збільшення діаметра зон інгібування росту грибів *Aspergillus* spp. і *Penicillium* spp. Утворення біоплівки *E. coli* та *P. aeruginosa* на 100% пригнічувалося при концентрації біогенних наночастинок срібла 56 г/мл, тоді як ступінь інгібування біоплівки *Listeria monocytogenes* становив 32% (Kanmani та Lim, 2013).

İspirli із співавт. (2021) встановили, що *Weissella cibaria* MED17 під час культивування в модифікованому середовищі ВНІ із сахарозою (20 г/л) синтезує екзополісахарид декстран. Наночастинок срібла, утворені з використанням цього ЕПС, характеризувалися антибактеріальною і антифунгальною активністю. Так, при концентрації наночастинок 5 мг/мл діаметр зон затримки росту (мм) бактерій становив: *S. aureus* ATCC25923 — 16, *Yersinia enterocolitica* ATCC27729 — 16, *Bacillus cereus* BC6830 — 16, *Salmonella typhimurium* RSSK95091 — 15, *E. coli* BC1402 — 16. За аналогічної концентрації AgNPs діаметр зон затримки росту (мм) грибів

становив: *Penicillium chrysogenum* — 18, *Aspergillus niger* — 13, *Alternaria alternata* — 16,5, *Aspergillus parasiticus* — 18, *Fusarium oxysporum* — 12.

ЕПС, синтезований *Lactiplantibacillus plantarum* HDL-03, є гетерополісахаридом, що складається із залишків глюкози і манози (Zang та ін., 2024). Синтезовані за участю ЕПС штаму HDL-03 наночастинки срібла характеризувалися антимікробною активністю щодо широкого спектра бактерій. Так, за наявності наночастинок (1 мг/мл) діаметр зон затримки росту *E. coli* і *S. aureus* становив 18,68 і 19,4 мм відповідно.

У праці (Yumei та ін., 2017) досліджували утворення AgNPs за участю ЕПС, синтезованого *Arthrobacter* sp. у середовищі з глюкозою (16 г/л) та дріжджовим екстрактом (2,5 г/л). Наночастинки срібла демонстрували виражену антимікробну активність. За дії AgNPs у концентрації 20—100 мкг/л зони інгібування росту *P. aeruginosa* PAO1, *S. aureus* ATCC25923, *Candida albicans* ATCC10231, *Fusarium oxysporum* ATCC48112 становили (мм): 25—37, 25—35, 20—30 та 20—27 відповідно (Yumei та ін., 2017).

Thota і Sreelatha (2020) встановили, що під час культивування у середовищі з дріжджовим екстрактом і розчинним крохмалем *Bacillus amyloliquefaciens* Ts-1 синтезував гетерополісахарид, що містить у своєму складі манозу, глюкозу та галактозу. УФ-спектроскопічний аналіз підтвердив біосинтез AgNPs з використанням цього ЕПС (максимум поглинання при 419 нм). Синтезовані AgNPs проявляли каталітичну активність щодо деградації барвників, зокрема метиленового синього.

Zaki зі співавт. (2014) визначили особливості одержання AgNPs з використанням ЕПС *Bacillus mojavensis* 32A. Середовище для культивування бактерій містило 1% пептону, 0,5% дріжджового екстракту та 0,5% яловичого екстракту. До поживного середовища додавали 3,5 мМ AgNO₃ та контролювали позаклітинний синтез наночастинок шляхом візуального огляду зміни кольору середовища від світло-жовтого до коричневого. Отримані наночастинки були сферичними, монодисперсними та мали розміри 6—72 нм.

У праці (Gholamrooz та ін., 2015) показано, що ЕПС, синтезовані *Microbacterium hominis* та *Bacillus licheniformis* у середовищі з підвищеним вмістом сахарози (20%), здатні утворювати AgNPs. УФ-спектральний аналіз виявив максимуми поглинання при 419 та 344 нм, тоді як розміри наночастинок становили 12—42 нм, а їх форма була гексагональною.

Узагальнену інформацію щодо використання екзополісахаридів грамположитивних бактерій для біосинтезу наночастинок срібла наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Екзополісахариди грамположитивних бактерій для біосинтезу наночастинок срібла

Продуцент ЕПС	Умови біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
<i>Leuconostoc lactis</i>	0,1% розчин ЕПС, 9 мМ AgNO ₃ , 18—20 °С, 24 год	Сферичні, 30—200 нм (середній розмір 35 нм)	Saravanan та ін., 2017
<i>Lactobacillus brevis</i> MSR104	1% розчин ЕПС, 2 мМ AgNO ₃ , 120 об/хв, 60 хв	Сферичні	Rajoka та ін., 2020

<i>Lactobacillus brevis</i> NM101-1	Розчин ЕПС і 10 мМ AgNO ₃ у співвідношенні 1:1, 10 год	Сферичні, 11—25 нм (середній розмір 18 нм)	Gomaa, 2016
<i>Lactobacillus rhamnosus</i> GG ATCC 53103	Розчин ЕПС, 9 мМ AgNO ₃ , 10 год	Сферичні, трикутні, паличкоподібні, гексагональні; 2—15 нм (середній розмір 10 нм)	Kanmani та Lim, 2013
<i>Weissella cibaria</i> MED17	0,4% розчин AgNO ₃ , 0,3% розчин ЕПС, перемішування при 800 об/хв упродовж 10 хв з подальшим автоклавуванням при 120 °С упродовж 60 хв	Сферичні (10 нм)	İspirli та ін., 2021
<i>Lactiplantibacillus plantarum</i> HDL-03	Суміш розчинів ЕПС і AgNO ₃ різної концентрації при різних значеннях рН (регуляція 0,1 М NaOH) витримували у мікрохвильовій печі при потужності 340 Вт упродовж 3-5 хв. Оптимальні умови: співвідношення ЕПС і AgNO ₃ 1:1, рН 10, 100 °С	36,63 нм	Zang та ін., 2024
<i>Arthrobacter</i> sp. B4	Розчин ЕПС (1, 2, 3, 4, 5 г/л), AgNO ₃ (0,5, 1, 2, 3 мМ), температура (70, 80, 90°С)	Сферичні, 9-72 нм	Yumei та ін., 2017
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Ts-1	Супернатант, AgNO ₃ (1, 5, 10 мМ), 200 об/хв, 48 год	10-50 нм	Thota та Sreelatha, 2020
<i>Bacillus mojavensis</i> 32A	Культуральна рідина, 3,5 мМ AgNO ₃ , 200 об/хв, 30°С, 7 діб	Сферичні, 6-72 нм	Zaki та ін., 2014
<i>Microbacterium hominis</i> <i>Bacillus licheniformis</i>	ЕПС, 1 мМ AgNO ₃ і FeCl ₃ , 1% природний полімер (карбоксиметилцелюлоза), 18-20°С, 2 год	Гексагональні, 12-42 нм	Gholampoor та ін., 2015

Одержання наночастинок срібла з використанням екзополісахаридів грамнегативних бактерій. Синтез наночастинок срібла за участю екзополісахаридів грамнегативних бактерій є менш дослідженим порівняно з грампозитивними. У дослідженні Li із співавт. (2016) для одержання ЕПС та подальшого синтезу AgNPs використовували штами *Shewanella oneidensis* MR-1, *Aeromonas hydrophila* та *Pseudomonas putida*, які культивували у середовищі LB. Екзополісахариди розчиняли у 30 мМ буфері HEPES у флаконах, попередньо оброблених азотом упродовж 15 хв для створення анаеробних умов, після чого додавали розчин нітрату срібла. У процесі біосинтезу формувалися наночастинки срібла з розмірами 5—35 нм. Біологічну активність отриманих наночастинок дослідники не визначали.

Особливий інтерес становлять морські грамнегативні бактерії, які існують в умовах підвищеної солоності, тиску та змінних температур. Адаптація до таких неоптимальних факторів зумовлює формування унікальних метаболічних шляхів,

що приводить до синтезу структурно та функціонально різноманітних екзополісахаридів. Так, Mehta із співавт. (2014) досліджували процес одержання наночастинок срібла за участю ЕПС *Alteromonas macleodii* PA2, синтезованого у середовищі Zobell Marine Broth із додаванням 15% лактози. При цьому концентрація ЕПС становила 23,4 г/л. Під час біосинтезу формувалися переважно сферичні наночастинок срібла із середнім розміром близько 70 нм. Біологічні властивості отриманих наночастинок у цьому дослідженні не аналізували.

У праці (Ahmed та ін., 2014) для утворення наночастинок срібла використовували ЕПС леван, синтезований *Acetobacter xylinum* NCIM 2526. Культивування продуцента здійснювали у середовищі LB з метою накопичення ЕПС, після чого 20 мг левану розчиняли у 49 мл 0,2% розчину гідроксиду натрію. До отриманого лужного розчину додавали нітрат срібла. Поява коричневого забарвлення свідчила про відновлення іонів срібла та утворення наночастинок. УФ-спектроскопічний аналіз підтвердив формування AgNPs за наявності характерного максимуму поглинання при 418 нм. Розміри отриманих наночастинок становили 10—29 нм.

Cui із співавт. (2025) встановили, що наночастинкам срібла, утвореним за участю ЕПС *Pseudoduganella armeniaca* ZMN-3, притаманна антибактеріальна активність. Так, діаметр зон затримки росту (мм) за наявності ЕПС-AgNPs становив: *E. coli* ATCC259221 — 6,0; *Acinetobacter haemolyticus* ATCC31105 — 10,2; *Pseudomonas stutzeri* ATCC17588 — 10,1; *S. aureus* ATCC25923 — 19,2. Мінімальні інгібуючі концентрації щодо *E. coli* ATCC259221 і *S. aureus* ATCC25923 становили 34 і 25,5 мкг/мл відповідно.

Окрему групу продуцентів ЕПС становлять ціанобактерії, зокрема *Nostoc pruniforme* та *Nostoc* sp. M5094-IBRC, які для утворення ЕПС культивували у середовищі BG-11 (Aletayeb та ін., 2020). Екзополісахариди цих ціанобактерій є гетерополісахаридами (містять глюкозу, галактозу, ксилозу та глюкуронову кислоту). Синтезовані за їх участю AgNPs мали сферичну форму та невеликі розміри (10—19 та 15—17 нм відповідно). Наночастинок проявляли антимікробну активність: мінімальні інгібуючі концентрації AgNPs, синтезованих *N. pruniforme* та *Nostoc* sp. M5094-IBRC щодо *P. aeruginosa* B52 становили 26,25 та 105 мкг/мл, а щодо *P. aeruginosa* p 48 — 13,12 та 52 мкг/мл відповідно (Aletayeb та ін., 2020).

У 2024 р. опублікована стаття Sarker із співавт., в якій автори використовували для утворення наночастинок срібла капсульний полісахарид, синтезований *Chryseobacterium geocarposphaerae* DD3. Це одне з перших повідомлень про можливість біосинтезу наночастинок металів за участю капсульних полісахаридів. Полісахарид штаму DD3 складається з глюкозних одиниць, з'єднаних як β -(1→3), так і β -(1→4) глікозидними зв'язками. AgNPs виявили фотокаталітичну активність щодо широкого спектру азобарвників, конго червоного (88,33%), метилового червоного (76,81%), та малахітового зеленого (47,34%) упродовж всього 3 год експозиції.

Узагальнену інформацію щодо використання екзополісахаридів грамнегативних бактерій для біосинтезу наночастинок срібла наведено в табл. 2.

Екзополісахариди мікрободоростей і грибів для одержання наночастинок срібла. *Chlorella vulgaris* у середовищі BG-11 синтезує екзополісахариди, у складі яких виявлено 495,44 мг/г вуглеводів (моносахариди фруктоза, мальтоза, лактоза,

глюкоза), сульфатні групи (210,65 мг/г), уронові кислоти (171,97 мг/г), а також білок (32,99 мг/г) (El-Naggar та ін., 2020). Вихід ЕПС становив 174,46 мг на 1 г біомаси. Отримані за участю цього ЕПС наночастинки срібла мали сферичну форму з радіусом близько 5,76 нм. Вони проявляли антимікробну активність: діаметр зони затримки росту *Bacillus* sp., *Candida* sp. та *Erwinia* sp. становив 1,867, 1,6 та 1,433 мм відповідно.

Таблиця 2. Екзополісахариди грамнегативних бактерій для біосинтезу наночастинок срібла

Продуцент ЕПС	Умови біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
<i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 700550 <i>Aeromonas hydrophila</i> AB2015302 <i>Pseudomonas putida</i> AB2015303	Розчин ЕПС (100 мг/л), 1 мМ AgNO ₃ , анаеробні умови	5—35 нм	Li та ін., 2016
<i>Alteromonas macleodii</i> PA2	0,05% розчин ЕПС і 9 мМ AgNO ₃ у співвідношенні 1:9, 30 °С	Сферичні близько 70 нм	Mehta та ін., 2014
<i>Acetobacter xylinum</i> NCIM 2526	Розчин ЕПС, 1 мМ AgNO ₃ , 100 °С	10—29 нм	Ahmed та ін., 2014
<i>Pseudoduganella armeniaca</i> ZMN-3	Розчин ЕПС (0,02 г/л), AgNO ₃ 0,5 мМ, співвідношення нітрату срібла і NaBH ₄ 1:1, рН 9,0, 60 хв, 100 °С	Сферичні (діаметр 31,22 нм) або еліпсоїдні	Cui та ін., 2025
<i>Nostoc pruniforme</i> <i>Nostoc</i> M5094-IBRC	Безклітинний водний екстракт ціанобактерій, 5 мМ AgNO ₃ , 18—20 °С, 24 год	Сферичні; 10—18 нм (<i>Nostoc</i> M5094-IBRC); 15—17 нм (<i>Nostoc pruniforme</i>)	Aletayeb та ін., 2020
<i>Chryseobacterium geocarposphaerae</i> DD3 (синтезує капсульний полісахарид)	0,5% розчин полісахариду, AgNO ₃ 1 мМ, перемішування на магнітній мішалці при 70 °С упродовж 3 год	100—300 нм	Sarkar та ін., 2024

Штам мікроводоростей *Scenedesmus* sp. 145-3 під час вирощування у середовищі BG-11 синтезував 1,3 г/л позаклітинних полісахаридів, які використовували для синтезу AgNPs (Patel та ін., 2015). Сформовані наночастинки мали сферичну форму та розміри у межах 13—31 нм. У цьому дослідженні біологічну активність отриманих наночастинок не оцінювали.

Окрім ЕПС мікроводоростей, у літературі є інформація про використання для утворення AgNPs екзополісахаридів, синтезованих грибами (мікроміцетами та дріжджами) (Ansari, 2018; Raza, 2021).

У праці (Ansari та ін., 2018) для біосинтезу ЕПС мікроміцети роду *Aspergillus* культивували в картопляно-декстрозному середовищі, а дріжджі *Saccharomyces cerevisiae* — у середовищі YPD. Біогенні AgNPs характеризувалися негативним дзета-потенціалом (у більшості випадків від –18 до –21 мВ), що свідчить про їхню

колоїдну стабільність. Отримані наночастинки були надзвичайно стабільними і не мали ознак флокуляції або агрегації навіть після трьох місяців зберігання в темряві. AgNPs виявляли антимікробну активність: зони інгібування росту *Micrococcus luteus*, *Salmonella typhi* та *E. coli* становили (мм): 16—22, 11—13 та 12—13 відповідно.

Здатність *Aspergillus fumigatus* KIBGE-IB33 до синтезу ЕПС і їх подальшого використання для утворення наночастинок срібла встановлено Raza із співавт. (2021). Штам KIBGE-IB33 культивували в картопляно-декстрозному середовищі, що містило 20 г/л декстрази та 0,3 г/л картопляного крохмалю. Наночастинки, сформовані за участю цього ЕПС, мали відносно однорідну, переважно сферичну форму та розміри менше 100 нм, значення дзета-потенціалу становило –22,1 мВ, а індекс полідисперсності 0,4. Отримані наночастинки демонстрували антимікробну активність щодо широкого спектра тест-культур, у тому числі *Enterococcus faecalis* ATCC 29212, *Salmonella typhimurium* ATCC 3632, *P. aeruginosa* ATCC27853, *Listeria monocytogenes* ATCC 7644, *E. coli* ATCC 8739, *S. aureus* KIBGE-IB23 та *Bacillus cereus* ATCC 11778. Зони затримки росту цих бактерій перебували в межах 9—13 мм.

Узагальнену інформацію щодо використання екзополісахаридів мікродоростей і грибів для біосинтезу наночастинок срібла наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Екзополісахариди мікродоростей і грибів для біосинтезу наночастинок срібла

Продуцент ЕПС	Умови біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
<i>Chlorella vulgaris</i>	Розчин ЕПС, AgNO ₃ , 85 °С, рН 10, 20 хв	Сферичні 5,76 нм	El-Naggar та ін., 2020
<i>Scenedesmus</i> sp. 145-3	ЕПС, 1 мМ AgNO ₃ , 25 °С, рН 7, 72 год	Сферичні, 13—31 нм	Patel та ін., 2015
<i>Aspergillus niger</i> KIBGE-IB36	Супернатант, 3,5 мМ AgNO ₃ , 24—72 год	Сферичні, 83,36 нм	Ansari та ін., 2018
<i>Aspergillus terreus</i> KIBGE-IB35		113,8 нм	
<i>Aspergillus flavus</i> KIBGE-IB34		208,2 нм	
<i>Aspergillus fumigatus</i> KIBGE-IB33		88,8 нм	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>		65,6 нм	
<i>Aspergillus fumigatus</i> KIBGE-IB33	Безклітинний водний екстракт, 3,5 мМ AgNO ₃ , 25 °С, 100 об/хв, 72 год	Сферичні, < 100 нм	Raza та ін., 2021

Практичне застосування наночастинок срібла. Найбільш перспективними наноматеріалами для поточного комерційного застосування є саме наночастинки срібла. Їх використовують при виробництві текстилю, електроніки, медицині, екології, харчовій промисловості та інших галузях (Bilesky-Jose, 2025; Gholampoor, 2015; Husain, 2023; Hawa Jasni, 2021; Tijani, 2025).

Фізичні та хімічні властивості наночастинок срібла, у тому числі хімічний склад, розмір, розподіл за розміром, форму, морфологію частинок, склад частинок, покриття/закриття, агломерацію, швидкість розчинення, реакційну здатність частинок у розчині, ефективність вивільнення іонів, тип клітини та тип клітин, що використовуються для синтезу, є вирішальними факторами для їхнього практичного застосування, зокрема визначення цитотоксичності (Zhang та ін., 2016).

Біоелектронні технології. AgNPs використовуються у складі біосенсорів, де можуть виконувати функцію біологічних міток для кількісного визначення різних аналітів. Висока поверхнева активність і здатність до функціоналізації забезпечують їх ефективну взаємодію з біомолекулами, що підвищує чутливість і селективність аналітичних систем. В електроніці наночастинок срібла використовуються для підвищення електропровідності, зокрема у провідних чорнилах і тонких плівках, а також входять до складу композитних матеріалів із покращеними електрофізичними характеристиками. У галузі оптики AgNPs застосовуються для підсилення оптичних сигналів, зокрема в методах поверхнево-підсиленої раманівської спектроскопії та метал-підсиленої флуоресценції, що дозволяє значно підвищити чутливість спектроскопічних досліджень. У сфері наноелектроніки, оптоелектроніки та наноінженерії наночастинок срібла відіграють важливу роль у створенні сучасних функціональних пристроїв. Вони використовуються в розробці інноваційних технологічних процесів, включаючи мікро- та наноелектромеханічні системи, надвеликі інтегральні схеми, а також перспективні розробки, такі як нанодвигуни, наноприводи та нанороботи (Hawa Jasni та ін., 2021).

Медицина. Не менш важливими наночастинок срібла є і для медицини. Загоєння ран — це складний біохімічний шлях, що включає кілька видів клітин, які працюють для регенерації функціональної шкіри, включаючи клітини шкіри та імунні клітини. Використання срібла в лікуванні ран вивчалось досить давно. У сучасних умовах фармацевтичні компанії та вчені шукають нові антибактеріальні засоби через поширення інфекційних захворювань і стрімкий розвиток резистентності до антибіотиків. Медичні вироби на основі срібла зі складнішою формою та підвищеною ефективністю, порівняно з традиційними засобами, були запатентовані та комерційно використані для лікування ран і виразок різної тяжкості. У догляді за ранами біополімери в поєднанні з біологічно активними антимікробними, антибактеріальними та протизапальними наночастинками мають великий потенціал для сприяння загоєнню ран, особливо при лікуванні діабетичних виразок стопи, які все ще становлять величезну проблему внаслідок високої частоти ампутацій та витрат ресурсів (Hawa Jasni та ін., 2021).

AgNPs також можуть сприяти перетворенню фібробластів у міофібробласти, що, у свою чергу, полегшує та прискорює темп загоєння та індукує проліферацію й переміщення кератиноцитів. Так, ефект наносрібла перевіряли *in vitro* та *in vivo*. З'ясовано, що при концентрації 10 ppm AgNPs сприяють міграції фібробластів, що демонструє вищі рівні альфа-гладком'язового актину (альфа-SMA), який сигналізує про здатність срібла перетворювати фібробласти на міофібробласти та прискорювати фазу загоєння. Дослідження на щурах і домашніх свинях, вільних від патогенів, показали, що пов'язка з наночастинками срібла прискорює загоєння

ексцизійної рани. Експерименти на мишах показали, що пов'язка з AgNPs запобігає проліферації клітин епідермісу та повторній епітелізації ран (Hawa Jasni та ін., 2021).

Синтезовані мікробним шляхом AgNPs також можна розглядати як альтернативні засоби лікування цукрового діабету. Досліджено, що AgNPs, синтезовані з використанням *Sphaeranthus amaranthoides* інгібують α -амілазу та цукор на моделях тварин, індукованих діабетом. Також встановлено, що наночастинки є потужними терапевтичними засобами для контролю діабету. Повідомлялося, що AgNPs ефективно інгібують ферменти, що перетравлюють вуглеводи, такі як амілаза та глюкозидаза, зі значеннями IC_{50} 54,56 та 37,86 г/мл відповідно, що демонструє їхні протидіабетичні властивості. Однак, як повідомляють дослідники, наразі потрібно провести більше досліджень, щоб переконатися в ефективності наночастинок срібла як протидіабетичних засобів (Husain та ін., 2023).

Хімічна промисловість. Наночастинки срібла характеризуються також своєю здатністю бути перспективними каталізаторами. Було продемонстровано, що AgNPs проявляють каталітичні окисно-відновні властивості щодо біологічних агентів, таких як барвники, а також хімічних агентів, таких як бензол. Хімічне оточення наночастинок відіграє важливу роль у їхніх каталітичних властивостях. Крім того, дослідники зазначають, що складний каталіз відбувається шляхом адсорбції реагентів на каталітичному субстраті. Коли полімери, складні ліганди або поверхнево-активні речовини використовуються як стабілізатор або для запобігання коалесценції наночастинок, каталітична здатність, зазвичай, знижується через знижену адсорбційну здатність. Загалом, наночастинки срібла в основному використовуються в комплексі з діоксидом титану як каталізатором хімічних реакцій (Ahmadi, 2020).

Косметична галузь. Відомо, що комерційні продукти, такі як сонцезахисні креми, шампуні для волосся, мило та миючі засоби, містять AgNPs у своєму складі (Husain та ін., 2023). Наночастинки срібла запобігають шкірним захворюванням, таким як атопічний дерматит. Наночастинки можуть використовуватися як консерванти в косметиці, а також в складі препаратів проти акне, зважаючи на їхню антибактеріальну активність. Завдяки своїм антибактеріальним, противірусним і протираковим властивостям AgNPs також використовуються в дієтичних добавках. Незважаючи на те, що антимікробна дія цих наночастинок зумовлена вивільненням іонів срібла, існує занепокоєння щодо можливого проникнення наноматеріалів у шкіру під час нанесення косметики. Розробники засобів для догляду за шкірою та волоссям дбають про те, щоб дія косметичних продуктів була спрямована за призначенням. Разом з тим доведено, що наночастинки не проникають у шкіру людини від поточного косметичного використання, за винятком ситуацій, коли бар'єрна функція шкіри порушена (Husain та ін., 2023).

Випробування гострої шкірної токсичності на щурах із застосуванням гелю з наночастинок срібла (S-гелю) продемонстрували повний захист при місцевому застосуванні. Ці результати чітко показують, що AgNPs у формі місцевих протимікробних препаратів можуть бути безпечнішою альтернативою звичайним протимікробним агентам. Нанорозмірний фосфат кальцію (апатит), який використовується в деяких спеціальних кремах для чутливих зубів, створює тонке покриття, схоже на звичайну зубну емаль, зменшуючи таким чином більову чутливість.

AgNPs використовуються в деяких денних і нічних кремах, щоб надати шкірі більш свіжий вигляд. Лінія засобів для макіяжу GNS Nanogistnanover™ включає наносрібло. Наносрібло міститься в милі, зубній пасті, вологих серветках, косметичці для губ, дезодорантах, пінках для обличчя та тіла. Повідомлялося, що очищувальне мило, що містить наносрібло, має бактерицидні та фунгіцидні властивості та допомагає лікувати акне й шкіру, пошкоджену сонячним ультрафіолетом. Основні показники включають високу ефективність для стримування поширення інфекційних захворювань протягом обмеженого періоду впливу. Дослідники також показали, що AgNPs проявляють активність щодо таких дріжджів, як *Candida glabrata* та *Candida albicans*, що дозволяє включати такі наночастинки до засобів для догляду за ротовою порожниною. Для постраждалих від опіків крем для шкіри з наночастинками срібла, який містить у тридцять разів менше срібла, ніж сульфадіазин срібла, є безпечнішим варіантом для лікування побічних інфекційних проявів (Husain та ін., 2023).

Наночастинки золота. Синтез наночастинок золота за участю екзополісахаридів грампозитивних бактерій. У науковій літературі відомостей про синтез наночастинок золота (AuNPs) за наявності мікробних екзополісахаридів налічується небагато (Ahmed, 2014; Vidya, 2016; Raveendran, 2015; Scala, 2019; Singh, 2019), разом з тим наявна інформація про одержання AuNPs у середовищі з білками синьо-зелених водоростей (Suganya та ін., 2015), екстрактом стручкового перцю (Qais та ін., 2021), фітосполукою горденіном (Rajkumarі та ін., 2017).

У праці (Vidya та ін., 2016) встановлено, що *Lactobacillus plantarum*, ізольований з кишечника морської риби *Sardinella longiceps*, під час вирощування в середовищі MRS з сахарозою (2%) синтезує ЕПС, у складі якого виявлені залишки глюкози та манози в молярному співвідношенні 6:1. Для біосинтезу AuNPs 5 мл одновідсоткового розчину ЕПС додавали до киплячого розчину хлорауринової кислоти. Отриманий колоїдний розчин мав характерне фіолетове забарвлення, що підтверджувалося УФ-видимою спектроскопією із максимумом поверхневого плазмонного резонансу при 525 нм. Значення дзета-потенціалу становило -41 мВ, що свідчить про високу колоїдну стабільність системи. Дані інфрачервоної спектроскопії підтвердили наявність гідроксильних груп і глікозидних зв'язків, що вказує на ефективне покриття наночастинок полісахаридною матрицею. Синтезовані AuNPs проявляли слабку антимікробну активність (діаметр зони затримки росту *E. coli* DH5 α становив 1,9 мм).

Біосинтез AuNPs також було реалізовано з використанням екзополісахаридів термофільних бактерій *B. licheniformis* B3-15 та *B. licheniformis* T14, які були виділені з гідротермальних джерел (Scala та ін., 2019). Екзополісахариди штаму B3-15 мають молекулярну масу близько 600 кДа, складаються з вуглеводів (66%) і білків (5%). Моносахаридний склад представлений переважно манозою та глюкозою. Екзополісахариди штаму T14 мають молекулярну масу близько 1000 кДа і містять 70% вуглеводів та 0,6% білків. Основними моносахаридами даних ЕПС є фруктоза, фукоза та глюкоза, а також у незначних кількостях присутні галактозамін і маноза. Незважаючи на високий вміст вуглеводів, ЕПС штаму T14 виявився неефективним для біосинтезу наночастинок золота, але при цьому виявив ефективність під час біосинтезу наночастинок срібла. Обидва екзополісахариди характеризуються високою термостабільністю, що дозволяє їх використовувати у біонанотех-

нологіях при високих температурах. Отримані при використанні ЕПС *B. licheniformis* В3-15 наночастинки золота мали дзета-потенціал $-32,6$ мВ, що свідчить про їх достатню стабільність. Вказані AuNPs проявляли виражену антимікробну активність щодо бактерій і дріжджів. Мінімальні інгібуючі концентрації для *S. aureus*, *E. coli* та *Candida albicans* становили $9,37$ — $18,75$ мкг/мл (Scala та ін., 2019).

Singh із співавт. (2019) встановили, що ізольований із солоного озера Самбхар (Раджастан, Індія) штам *Natronotalea sambharensis* sp. nov. АК103Т продукував $1,2$ г/л ЕПС з молекулярною масою $4,6 \times 10^6$ кДа, у складі якого виявлена маноза, глюкоза та глюкуронова кислот. За участю ЕПС було здійснено біосинтез наночастинок золота, які характеризувалися високою колоїдною стабільністю: дзета-потенціал становив $-85,5$ мВ, а середній розмір частинок — 55 нм.

Одержання наночастинок золота з використанням екзополісахаридів грам-негативних бактерій. Окремий інтерес становлять екстремофільні мікроорганізми, які залишаються недостатньо дослідженими у контексті створення нових наноматеріалів. У праці Raveendran зі співавт. (2015) для одержання AuNPs використовували сульфатований екзополісахарид мауран, синтезований *Halomonas maura* ATCC 700099. ЕПС складається з глюкози, галактози, манози та галактуронової кислоти. Характеризується високим вмістом сульфатів ($6,2\%$) та уронових кислот, що зумовлює його поліаніонну природу і здатність ефективно зв'язувати іони металів. Біосинтезовані наночастинки характеризувалися значною морфологічною різноманітністю та мали різні розміри. При концентрації ЕПС 2 мг/мл розмір AuNPs становив близько 80 нм, тоді як при 3 мг/мл — близько 97 нм. Біомедичний потенціал отриманих AuNPs підтверджено їх протираковою активністю (фототермічна абляція ракових клітин). Відомо, що ракові клітини є більш чутливими до гіпертермії порівняно з нормальними клітинами через підвищений рівень метаболізму, що робить такі наночастинки ефективними агентами для локалізованої гіпертермії ракових клітин (Raveendran та ін., 2015).

У праці (Ahmed та ін., 2014) встановлено можливість одержання AuNPs з використанням екзополісахариду левану, синтезованого *Acetobacter xylinum* NCIM 2526. Суттєвою перевагою біосинтезованих AuNPs є їх висока стабільність, оскільки наночастинки не проявляли ознак агрегації навіть після зберігання упродовж двох місяців.

Узагальнена інформація щодо використання екзополісахаридів мікробного походження для біосинтезу наночастинок золота наведена в табл. 4.

Таблиця 4. Мікробні екзополісахариди для біосинтезу наночастинок золота

Продуцент ЕПС	Умови біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
<i>Lactobacillus plantarum</i>	1% розчин ЕПС, 1 мМ $\text{HAuCl}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$, 1 год	Сферичні та еліпсоїдні, 10 — 20 нм	Vidya та ін., 2016
<i>Lactobacillus fermentum</i>	1 мМ HAuCl_4 Розчин ЕПС (10 мг/мл), рН 2 , 100 °С, 3 год	Сфери, стрижні та призми різних розмірів (2 — 80 нм)	González та ін., 2019
<i>Halomonas maura</i> ATCC 700099	Розчин ЕПС (3 мг/мл), 2 мМ HAuCl_4 , 80 °С, 24 год	Сферичні, багатокутні, трикутні, пентагональні, складні дендритні (розгалужені) структури	Raveendran та ін., 2015
<i>Bacillus licheniformis</i> В3-15	Розчин ЕПС (2 мг/мл), HAuCl_4 , 100 °С, 3 год	Неправильної форми, 170 нм	Scala та ін., 2019

<i>Acetobacter xyli-</i> <i>num</i> NCIM 2526	Лужний розчин ЕПС, 1 мМ AuCl ₃ , 100 °С, 30 хв	Сферичні, 10—12 нм	Ahmed та ін., 2014
<i>Natronotalea samb-</i> <i>harensis</i> sp. nov. AK103T	ЕПС (0,5%), HАuCl ₄ , (50, 70, 90 °С)	Середній розмір 55 нм	Singh та ін., 2019
Симбіотична культура бактерій та дріжджів для виробництва комбучі	40 мг бактеріальної целюлози на 10 мл води, свіжого солодкого чорного чаю чи напою комбучі, 5 мМ HАuCl ₄ ·3H ₂ O, 120 об/хв, кімнатна температура 24 год	Неправильної форми, 15—45 нм	Dediu та ін., 2025

Практичне застосування наночастинок золота. Практичне застосування AuNPs охоплює широкий спектр напрямів, серед яких провідне місце займає біомедицина. Завдяки низькій цитотоксичності, високій біосумісності та унікальним оптичним і біологічним властивостям AuNPs широко використовуються як функціональні наноматеріали (Скροцька та ін., 2022). Вони демонструють значний потенціал як носії для доставки генів, білків, лікарських препаратів і малих молекул. Нанорозмір забезпечує їх проникнення у клітини, однак для підвищення ефективності таргетної доставки поверхню наночастинок модифікують різноманітними лігандами та біомолекулами, що покращує їх взаємодію із клітинними структурами (Khan, 2014; Song, 2024).

Наночастинки золота можуть мати різну форму (сферичну, стрижнеподібну, кубічну тощо) і розміри в діапазоні від 1 до десятків нанометрів. Їх біомедичне використання зумовлене можливістю контрольованого синтезу, легкою функціоналізацією (зокрема за участю амінів, тіолів і фосфінів), стійкістю до окиснення, біосумісністю та унікальними оптичними й електронними властивостями, які залежать від розміру, форми та ступеня агрегації (Nejati та ін., 2022).

Біоелектронні технології. У галузі біоелектроніки та сенсорики AuNPs використовують завдяки їх поверхневому плазмонному резонансу, який зумовлює інтенсивне поглинання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Це забезпечує високу чутливість у методах оптичного детектування порівняно з традиційними барвниками. Такі властивості роблять AuNPs перспективними для біомолекулярного детектування, хімічного і біологічного зондування, маркування клітин і білків, молекулярної візуалізації, а також доставки терапевтичних агентів (Nejati та ін., 2022).

Наночастинки золота також застосовують у методах візуалізації. Зокрема, показано ефективність AuNPs розміром близько 15 нм для мічення моноцитів і відстеження їх міграції на ранніх стадіях атеросклерозу за допомогою комп'ютерної томографії. Важливо, що такі наночастинки не впливають на життєздатність клітин і не змінюють їх запальний профіль. Дослідження показують, що частинки з розмірами до 150 нм загалом є безпечними, хоча найбільші з них можуть проявляти певну токсичність. Крім того, наночастинки золота, що були покриті негативно зарядженою карбоною кислотою, виявляли краще поглинання моноцитами.

AuNPs також використовують в інших методах біовізуалізації, зокрема у фотоакустичній томографії, фототермічній мікроскопії та рентгенофлуоресцентній томографії (Lopes та ін., 2019).

Медицина. У фотодинамічній терапії наночастинки золота підсилюють ефективність фотосенсибілізаторів, сприяючи генерації активних форм кисню, які індукують апоптоз або некроз пухлинних клітин. У фототермічній терапії AuNPs поглинають світло (особливо у ближньому інфрачервоному діапазоні) і перетворюють його на тепло, що призводить до локального руйнування пухлинних тканин. Особливо ефективними є сферичні наночастинки діаметром понад 50 нм, а також кон'югати AuNPs з антитілами, які забезпечують специфічність дії (Elahi та ін., 2018).

Важливим напрямом є створення наносенсорів. Наприклад, розроблено високочутливі системи для детекції гамма-випромінювання, де наночастинки золота виконують роль сигнал-репортерів, а фрагменти ДНК — чутливих елементів. Такі сенсори демонструють високу лінійність у широкому діапазоні доз (0—100 Гр). Крім того, AuNPs використовують у біосенсорах для виявлення мікроРНК — важливих біомаркерів, що відкриває перспективи ранньої діагностики захворювань, зокрема діабетичної нефропатії. Позитивно заряджені AuNPs значно підвищують ефективність таких систем (Hammami та Alabdallah, 2021).

Одним із найбільш перспективних напрямів є використання AuNPs у системах доставки лікарських засобів. Традиційна хіміотерапія характеризується низькою селективністю, тоді як наночастинки золота дозволяють здійснювати таргетну доставку препаратів до пухлинних тканин, знижуючи системну токсичність. Лікарські сполуки можуть бути зв'язані з AuNPs шляхом фізичної інкапсуляції або ковалентних/нековалентних взаємодій. Водночас функціоналізація поверхні може впливати на токсичність і біодоступність системи, що потребує ретельної оптимізації (Hu та ін., 2020).

AuNPs також розглядаються як ефективні носії в генній терапії. На відміну від вірусних векторів, вони не викликають значної імунної відповіді та можуть бути легко модифіковані. Наночастинки здатні захищати нуклеїнові кислоти від деградації та забезпечувати їх ефективну доставку до клітин. Кон'югати AuNPs з олігонуклеотидами демонструють високий потенціал у створенні нових систем генної терапії.

Перспективним є також використання AuNPs як носіїв білків. Наприклад, показано, що інсулін, ковалентно зв'язаний із наночастинками золота, проявляє вищу ефективність при трансмукозальній доставці порівняно з традиційними формами. Покриття наночастинок біополімерами додатково підвищує ефективність адсорбції та стабільність білків (Hu та ін., 2020).

У тканинній інженерії AuNPs застосовують для стимуляції регенеративних процесів. Зокрема, продемонстровано їх використання як носіїв хондроїтинсульфату для лікування остеоартриту. Така система сприяє підвищенню проліферації хондроцитів, а також збільшенню синтезу глікозаміногліканів і колагену, що свідчить про стимуляцію формування позаклітинного матриксу (Dwivedi та ін., 2015).

Сільське господарство. Встановлено, що наночастинки золота можуть стимулювати проростання насіння та ріст рослин. Наприклад, AuNPs, що були синтезовані з використанням рослинних екстрактів, позитивно впливають на проростання

Gloriosa superba та підвищують вміст хлорофілу у *Brassica juncea*. Ефект залежить від концентрації наночастинок у середовищі (Hammami та Alabdallah, 2021).

Одержання наночастинок інших металів за участю мікробних екзополісахаридів. Наночастишки цинку та нікелю. У праці Garza-Cervantes із співавт. (2019) встановлено можливість використання ЕПС *Rhodotorula mucilaginosa* UANL-001L для біосинтезу наночастинок цинку (ZnNPs) та наночастинок нікелю (NiNPs). Отримані ZnNPs та NiNPs характеризувалися максимумами поглинання при 347 і 348 нм відповідно. Біогенні наночастишки цинку мали поліморфну форму з переважно гексагональною геометрією. Їх розміри становили 4—11 нм (середній діаметр 8,32 нм). Наночастишки нікелю мали ромбоєдричну структуру та розміри 17—52 нм (середній діаметр 26,73 нм). Значення дзета-потенціалу становили –84,3 мВ для ZnNPs та –8,6 мВ для NiNPs, що свідчить про різний ступінь колоїдної стабільності цих систем. Наночастишки нікелю виявляли антимікробну та антибіоплівкову активність щодо *S. aureus* і *P. aeruginosa* (інгібування 80—90%) при концентрації 3 і 2 мг/мл відповідно. ZnNPs при концентрації 1 мг/мл на 90% інгібували ріст *S. aureus*. Біосинтезовані за участі ЕПС наночастишки не проявляли токсичності *in vivo*: їх введення у концентрації 24 мг/кг маси тіла лабораторним щурам не спричиняло порушень функції нирок (Garza-Cervantes та ін., 2019).

Наноконізити нікелю з ЕПС *R. mucilaginosa* UANL-001L посилювали антимікробну дію чотирьох різних антибіотиків (ампіциліну, канаміцину, хлорамфеніколу та ципрофлоксацину) (Garza-Cervantes та ін., 2023). За наявності Ni-конізиту мінімальні інгібуючі концентрації канаміцину та хлорамфеніколу щодо полірезистентного золотистого стафілокока та *P. aeruginosa*, а також ампіциліну щодо полірезистентного золотистого стафілокока та ципрофлоксацину проти полірезистентної *P. aeruginosa* знижувалися у вісім разів.

Наночастишки кадмію. Біосинтез наночастинок кадмію (CdNPs) за участю ЕПС *Pseudomonas aeruginosa* JP-11 було досліджено Raj із співавт. (2016). Штам JP-11 культивували у середовищі MBD, а для синтезу CdNPs використовували ЕПС, нітрат кадмію як джерело іонів Cd²⁺ та сульфід натрію (Na₂S) як джерело сульфід-іонів S²⁻. При цьому формувалися сферичні наночастишки кадмію із розмірами 20—40 нм.

Наночастишки заліза. У праці (Vignesh та ін., 2015) встановлено можливість утворення наночастинок оксиду заліза (FeONPs) з використанням ЕПС, синтезованого *B. subtilis* VT03 у середовищі з глюкозою (15 г/л). Концентрація ЕПС при цьому становила 2 мг/мл. Як попередники використовували водний розчин 3М FeCl₃ (безводний) і 3М FeSO₄ у молярному співвідношенні 2:3 для Fe³⁺/Fe²⁺. Отримані FeONPs мали розміри 60—80 нм та проявляли антимікробну активність щодо *Aeromonas hydrophila* ATCC 49140, *A. hydrophila* MTCC 1739, *Aeromonas sobria* MTCC 3613, *Aeromonas hydrophila* (лабораторний штам): при концентрації FeONPs 100—400 мкг/мл зони затримки росту становили 1,33—7,66 мм. Крім того, встановлено цитотоксичний ефект біосинтезованих FeONPs щодо лінії клітин епідермоїдної карциноми людини A431. Значення IC₅₀ становило 62,946 мг/мл після 24 год експозиції (Vignesh та ін., 2015).

Gholamrooz із співавт. (2015) досліджували біосинтез наночастинок заліза (FeNPs) за участю ЕПС *Microbacterium hominis* та *B. licheniformis*. Для цього використовували 300 мкл очищеного ЕПС, який додавали до 1 мМ розчину хлориду

заліза. Біосинтез FeNPs відбувався при кімнатній температурі упродовж 12 год. Для отриманих наночастинок були виявлені характерні максимуми поглинання при 283 та 368 нм. Наночастинки мали кубічну форму та розміри у діапазоні 29—42 нм.

Наночастинки селену. У науковій літературі є публікації щодо біосинтезу наночастинок селену (SeNPs) (Skrotska та ін., 2025), проте мало публікацій щодо використання мікробних ЕПС для даного процесу. У праці (Concórdio-Reis та ін., 2023) для отримання SeNPs використовували новий ЕПС, що продукується морською бактерією *Alteromonas macleodii* Mo 169. Синтезовані наночастинки були добре диспергованими та сферичними із середнім розміром частинок 32 нм. Встановлено, що наноккомпозит у концентрації 0,5 та 1 г/л проявляє цитотоксичний ефект щодо клітинних ліній людських кератиноцитів (HaCaT) та фібробластів (CCD-1079Sk). Експерименти *in vitro* показали, що нецитотоксичні концентрації наноккомпозиту спричиняють значний клітинний антиоксидантний ефект на клітинну лінію HaCaT, знижуючи рівень активних форм кисню до 33,8%.

Shehata із співавт. у 2024 р. повідомили про одержання наночастинок селену (SeNPs) за участю ЕПС, синтезованого *Azotobacter vinelandii* OP218383 (умовна назва полісахариду AZEPS). Синтезовані AZEPS-SeNPs продемонстрували цитотоксичний ефект щодо клітин аденокарциноми легень A549 (1,724 мкг/мл), проапоптотичний ефект на лінію клітин A549, стимулюючи каспазу 3 та Вах (у 7,08 та 6,505 разів відповідно), пригнічуючи антиапоптотичний ген Bcl2 та зупиняючи клітинний цикл у S-фазі.

Практичне застосування наночастинок інших металів. Наночастинки цинку. Як відомо, цинк є одним з найважливіших мікроелементів, необхідних для життєдіяльності організмів. Цинк входить до складу металоферментів і гормональних комплексів. Водночас його дефіцит часто зумовлений патологічними станами, а зниження концентрації катіонів цинку може впливати на процеси життєдіяльності в клітинах. Наприклад, цинк відіграє важливу роль у таких біологічних процесах, як ріст і поділ клітин, цератогенез, остеогенез, імунна відповідь, загоєння післяопераційних ран, у функціонуванні підшлункової залози. При цьому цинк у наночастинках характеризується унікальними фізико-хімічними властивостями, що розширює спектр їх застосування в біомедицині. Зокрема, здатність поглинати ультрафіолетове, інфрачервоне та інші види випромінювання зумовлює використання наночастинок оксиду цинку (ZnONPs) у складі сонцезахисних кремів і дерматологічних засобів (Bogutska та ін., 2013).

Крім того, ZnONPs з розмірами 20—30 нм проявляють виражені антибактеріальні властивості, що широко використовується у текстильній промисловості для створення матеріалів з антимікробним ефектом. При контакті з тілом людини одяг служить субстратом, на якому можуть рости мікроорганізми — цьому росту можна запобігти, використовуючи наночастинки ZnONPs у виробництві тканин (Bogutska та ін., 2013).

Важливим напрямом є також онкологія: показано, що наночастинки ZnONPs можуть виступати як біосумісні та біорозкладні платформи для лікування раку. Їх механізм дії пов'язаний з внутрішньоклітинним вивільненням іонів цинку, що призводить до підвищеного утворення активних форм кисню, порушення функцій мітохондрій і запуску апоптозу пухлинних клітин (Jiang та ін., 2018).

У стоматології, зокрема в ортодонції, ZnONPs застосовуються для покращення властивостей матеріалів. Включення ZnONPs до складу ортодонтичних адгезивів, дуг і брекетів сприяє зменшенню бактеріальної адгезії, запобігає демінералізації емалі та забезпечує ремінералізуючий ефект (Pushpalatha та ін., 2022).

Наночастинки нікелю. Ці наночастинки використовують у виробництві електродів акумуляторів, фотоелектронних пристроїв, сенсорів (зокрема газових), магнітних матеріалів, термоелектричних систем, каталізаторів і паливних елементів. Крім того, наночастинки нікелю (NiNPs) мають антибактеріальну активність щодо грампозитивних і грамнегативних мікроорганізмів (Anand та ін., 2020). Встановлено, що функціоналізовані NiNPs можуть підвищувати проникність клітинних мембран і сприяти транспортуванню молекул у клітини, що відкриває перспективи їх використання у протипухлинній терапії, зокрема при лейкемії (Jaji та ін., 2020).

Наночастинки нікелю також можна використовувати для очищення довкілля. Магнітні NiNPs та їх композити здатні адсорбувати органічні барвники зі стічних вод. Завдяки високій площі поверхні та пористості такі матеріали можуть ефективно зв'язувати токсичні сполуки, а їх магнітні властивості дозволяють легко відокремлювати адсорбент з розчину за допомогою зовнішнього магнітного поля. Зокрема, описано використання композитів на основі сульфиду нікелю та активованого вугілля для видалення метиленового синього та сафраніну-О (Jaji та ін., 2020).

Наночастинки заліза. FeNPs характеризуються магнітними властивостями. Вони демонструють явище суперпарамагнетизму, що робить їх придатними для використання в магнітному розділенні, біомаркуванні та цільовій доставці лікарських засобів. Наночастинки заліза можна використовувати як контрастні агенти в магнітно-резонансній томографії, а також у технологіях локального нагрівання пухлин (магнітна гіпертермія) (Iqbal та ін., 2017).

Наночастинки заліза можуть бути функціоналізовані специфічними лігандами для селективного розпізнавання пухлинних клітин, що підвищує ефективність їх терапевтичного впливу. У системах цільової доставки лікарських засобів використовується градієнт магнітного поля, який дозволяє спрямовано переміщувати наночастинки до ураженої ділянки після їх внутрішньовенного введення. Суперпарамагнітні наночастинки оксиду заліза також можуть нагріватися під дією високочастотного електромагнітного поля, що використовується для руйнування пухлинних клітин (Iqbal та ін., 2017).

Наночастинки заліза й матеріали на основі наночастинок заліза завдяки здатності видаляти кисень та антимікробній активності можуть бути використані для активного пакування продуктів харчування, іммобілізації ферментів, очищення білків, аналізу харчових продуктів та видалення з них мікотоксинів і гістаміну (Góral та ін., 2023).

Важливим є екологічний аспект застосування наночастинок заліза. Вони ефективно використовуються для видалення токсичних забруднювачів, таких як іони хрому, свинцю, миш'яку та хлоровані органічні сполуки. Завдяки високій реакційній здатності наночастинки заліза можуть виступати як відновники та каталі-

затори у процесах деградації ксенобіотиків. Запропоновано їх безпосереднє введення у забруднені середовища для локальної ремедіації ґрунтів і вод (Peng, 2019; Xu, 2022).

Висновки

Отже, мікробні екзополісахариди є ефективними сполуками для синтезу металевих наночастинок. Вони виконують подвійну функцію — виступають як відновники іонів металів та як стабілізатори утворених наноструктур. Найбільш дослідженими є наночастишки срібла, які можна отримати під час біосинтезу за участю екзополісахаридів різних груп мікроорганізмів: бактерій, ціанобактерій, мікроводоростей, грибів і дріжджів. Разом з тим екзополісахариди грамнегативних бактерій залишаються недостатньо дослідженими у контексті біосинтезу наночастинок. При цьому грамнегативні бактерії здатні синтезувати значні кількості полісахаридів з унікальними фізико-хімічними характеристиками.

Біосинтез наночастинок золота з використанням мікробних ЕПС на сьогодні є менш дослідженим порівняно з біосинтезом наночастинок срібла. Водночас наведені в огляді дані свідчать про високу стабільність, біосумісність і значний потенціал таких наночастинок у медицині, зокрема для таргетної доставки лікарських засобів, діагностики та терапії.

Екзополісахариди можуть бути використані і для біосинтезу наночастинок інших металів, таких як цинк, нікель і кадмій, які володіють перспективними фізико-хімічними та біологічними властивостями, включаючи антимікробну активність і відносно низьку токсичність.

Фізико-хімічні характеристики наночастинок, зокрема їх розмір, форма, поверхневий заряд і ступінь агрегації, суттєво впливають на їх властивості і подальше практичне використання. Це обумовлює необхідність ретельного контролю умов біосинтезу та стандартизації отриманих матеріалів. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на глибше розуміння механізмів біосинтезу наночастинок, оптимізацію умов їх отримання, а також оцінку безпечності.

Фінансування досліджень

Робота виконана без джерел зовнішнього фінансування.

Етичні аспекти

Ця публікація ґрунтується виключно на аналізі та узагальненні даних наукових джерел. Під час виконання роботи дослідження за участю людей чи тварин не проводилися.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Внесок авторів

Концептуалізація — Т. Пирог, М. Качківська; курування даними — М. Качківська; методологія — Т. Пирог; написання — оригінальна чернетка — М. Качківська; написання — рецензування та редагування — Т. Пирог.

Література

- Скороцька, О. І., Лазюка, Ю. В. & Харченко, Є. В. (2022). Наночастки срібла та золота: практичне застосування, біосинтез з використанням дріжджів, біологічна активність. *Наукові праці НУХТ*, 28(1), 18—31. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-1-4>.
- Adeyemi, J. O. & Fawole, O. A. (2023). Metal-based nanoparticles in food packaging and coating technologies: a review. *Biomolecules*, 13(7), 1092. <https://doi.org/10.3390/biom13071092>.
- Ahmed, K. B. A., Kalla, D., Uppuluri, K. B. & Anbazhagan, V. (2014). Green synthesis of silver and gold nanoparticles employing levan, a biopolymer from *Acetobacter xylinum* NCIM 2526, as a reducing agent and capping agent. *Carbohydrate polymers*, 112, 539—545. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.033>.
- Ahmadi, S. (2020). The importance of silver nanoparticles in human life. *Advances in Applied Nano-Bio Technologies*, 1(1), 5—9. [https://doi.org/10.47277/AANB/1\(1\)9](https://doi.org/10.47277/AANB/1(1)9).
- Aletayeb, P., Ghadam, P. & Mohammadi, P. (2020). Green synthesis of AgCl/Ag₃PO₄ nanoparticle using cyanobacteria and assessment of its antibacterial, colorimetric detection of heavy metals and antioxidant properties. *IET nanobiotechnology*, 14(8), 707—713. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.0077>.
- Altemimi, A. B., Farag, H. A. M., Salih, T. H., Awlqadr, F. H., Al-Manhel, A. J. A., Vieira, I. R. S. & Conte-Junior, C. A. (2024). Application of nanoparticles in human nutrition: a review. *Nutrients*, 16(5), 636. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.007710.3390/nu16050636>.
- Anand, G. T., Nithiyavathi, R., Ramesh, R., Sundaram, S. J. & Kaviyarasu, K. (2020). Structural and optical properties of nickel oxide nanoparticles: Investigation of antimicrobial applications. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100460. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100460>.
- Ansari, A., Pervez, S., Javed, U., Abro, M. I., Nawaz, M. A., Qader, S. A. U. & Aman, A. (2018). Characterization and interplay of bacteriocin and exopolysaccharide-mediated silver nanoparticles as an antibacterial agent. *International journal of biological macromolecules*, 115, 643—650. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.104>.
- Bilesky-Jose, N. & Lima, R. (2025). Biogenic nanoparticles from bacteria: a perspective on integrated applications in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1724288. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.007710.3389/fmicb.2025.1724288>.
- Bogutska, K. I., Sklyarov, Y. P. & Prylutsky, Y. I. (2013). Zinc and zinc nanoparticles: biological role and application in biomedicine. *Ukrainica bioorganica acta*, 1, 9—16. https://www.bioorganica.org.ua/UBAdenovo/pubs_11_1_13/Bogutska.pdf.
- Concórdio-Reis, P., Macedo, A. C., Carneira, M., Moppert, X., Guézennec, J., Sevrin, C., ... & Freitas, F. (2023). Selenium bio-nanocomposite based on *Alteromonas macleodii* Mo169 exopolysaccharide: Synthesis, characterization, and in vitro antioxidant activity. *Bioengineering*, 10(2), 193. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.007710.3390/bioengineering10020193>.
- Couto, C. & Almeida, A. (2022). Metallic nanoparticles in the food sector: A mini-review. *Foods*, 11(3), 402. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.007710.3390/foods11030402>.
- Cui, Y., Ma, J., Gao, G., Duan, X., Ying, M., Huang, L. & Li, M. (2025). Synthesis of nano silver particles using extracellular polysaccharide of *Pseudoduganella armeniaca* ZMN-3: antibacterial activity, antibacterial mechanism and antibacterial application as coating. *BMC biotechnology*, 25(1), 1—19. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.007710.1186/s12896-025-01052-7>.
- Dediu, V., Bușilă, M., Ungureanu, C., Grigore-Gurgu, L., Cotârlet, M., Romanitan, C., ... & Bahrim, G. E. (2025). Cellulose-silver and cellulose-gold bioactive nanocomposites obtained using SCOBY purified membranes. *ACS Applied Bio Materials*, 8(11), 9650—9663. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.007710.1021/acsbam.5c00395>.
- Dwivedi, P., Nayak, V. & Kowshik, M. (2015). Role of gold nanoparticles as drug delivery vehicles for chondroitin sulfate in the treatment of osteoarthritis. *Biotechnology progress*, 31(5), 1416—1422. <https://doi.org/10.1002/btpr.2147>.
- Elahi, N., Kamali, M. & Baghersad, M. H. (2018). Recent biomedical applications of gold nanoparticles: a review. *Talanta*, 184, 537—556. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.02.088>.
- El-Naggar, N. E. A., Hussein, M. H., Shaaban-Dessuuki, S. A. & Dalal, S. R. (2020). Production, extraction and characterization of *Chlorella vulgaris* soluble polysaccharides and their applications in

AgNPs biosynthesis and biostimulation of plant growth. *Scientific Reports*, 10(1), 3011. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59945-w>.

Gahlawat, G. & Choudhury, A. R. (2019). A review on the biosynthesis of metal and metal salt nanoparticles by microbes. *RSC advances*, 9(23), 12944—12967. <https://doi.org/10.1039/C8RA10483B>.

Garza-Cervantes, J. A., Escárcega-González, C. E., Barriga Castro, E. D., Mendiola-Garza, G., Marichal-Cancino, B. A., López-Vázquez, M. A. & Morones-Ramírez, J. R. (2019). Antimicrobial and antibiofilm activity of biopolymer-Ni, Zn nanoparticle biocomposites synthesized using *R. mucilaginosa* UANL-001L exopolysaccharide as a capping agent. *International journal of nanomedicine*, 2557—2571. <https://doi.org/10.2147/IJN.S196470>.

Garza-Cervantes, J. A., Mendiola-Garza, G., León-Buitimea, A. & Morones-Ramírez, J. R. (2023). Synergistic antibacterial effects of exopolysaccharides/nickel-nanoparticles composites against multi-drug-resistant bacteria. *Scientific Reports*, 13(1), 21519. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.007710.1038/s41598-023-48821-y>.

Gholampoor, N., Emtiazi, G. & Emami, Z. (2015). The influence of *Microbacterium hominis* and *Bacillus licheniformis* extracellular polymers on silver and iron oxide nanoparticles production; green biosynthesis and mechanism of bacterial nano production. *The Journal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology*, 4, 2. <http://dx.doi.org/10.4172/2324-8777.1000160>.

Gomaa, E. Z. (2016). Exopolysaccharide-mediated silver nanoparticles produced by *Lactobacillus brevis* NM101-1 as antibiotic adjuvant. *Microbiology*, 85(2), 207—219. <https://doi.org/10.1134/S0026261716020077>.

González, A., Garcés, V., Sabio, L., Velando, F., López-Haro, M., Gálvez, N., ... & Dominguez-Vera, J. M. (2019). Optical and tomography studies of water-soluble gold nanoparticles on bacterial exopolysaccharides. *Journal of Applied Physics*, 126(5). <https://doi.org/10.1063/1.5090879>.

Góral, D., Marczuk, A., Góral-Kowalczyk, M., Koval, I. & Andrejko, D. (2023). Application of iron nanoparticle-based materials in the food industry. *Materials*, 16(2), 780. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.007710.3390/ma16020780>.

Hammami, I. & Alabdallah, N. M. (2021). Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *Journal of king Saud university — science*, 33(7), 101560. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101560>.

Hawa Jasni, A., Akbar Ali, A., Sagadevan, S. & Wahid, Z. (2021). Silver nanoparticles in various new applications. In silver micro-nanoparticles — properties, synthesis, characterization, and applications. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96105>.

Husain, S., Nandi, A., Simmani, F. Z., Saha, U., Ghosh, A., Sinha, ... & Verma, S. K. (2023). Emerging trends in advanced translational applications of silver nanoparticles: a progressing dawn of nanotechnology. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(1), 47. <https://doi.org/10.3390/jfb14010047>.

Hu, X., Zhang, Y., Ding, T., Liu, J. & Zhao, H. (2020). Multifunctional gold nanoparticles: a novel nanomaterial for various medical applications and biological activities. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 990. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00990>.

İspirli, H., Sagdic, O. & Dertli, E. (2021). Synthesis of silver nanoparticles prepared with a dextran-type exopolysaccharide from *Weissella cibaria* MED17 with antimicrobial functions. *Preparative biochemistry & biotechnology*, 51(2), 112—119. <https://doi.org/10.1080/10826068.2020.1795673>.

Iqbal, A., Iqbal, K., Li, B., Gong, D. & Qin, W. (2017). Recent advances in iron nanoparticles: preparation, properties, biological and environmental application. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 17(7), 4386—4409. <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.14196>.

Jaji, N. D., Lee, H. L., Hussin, M. H., Akil, H. M., Zakaria, M. R. & Othman, M. B. H. (2020). Advanced nickel nanoparticles technology: From synthesis to applications. *Nanotechnology reviews*, 9(1), 1456—1480. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0109>.

Jiang, J., Pi, J. & Cai, J. (2018). The advancing of zinc oxide nanoparticles for biomedical applications. *Bioinorganic chemistry and applications*, 2018(1), 1062562. <https://doi.org/10.1155/2018/1062562>.

Joshi, N. C., Negi, P. B. & Gururani, P. (2024). A review on metal/metal oxide nanoparticles in food processing and packaging. *Food Science and Biotechnology*, 33(6), 1307—1322. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01500-0>.

- Kanmani, P. & Lim, S. T. (2013). Synthesis and structural characterization of silver nanoparticles using bacterial exopolysaccharide and its antimicrobial activity against food and multidrug resistant pathogens. *Process Biochemistry*, 48(7), 1099—1106. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.05.011>.
- Khan, A. K., Rashid, R., Murtaza, G. & Zahra, A. (2014). Gold nanoparticles: synthesis and applications in drug delivery. *Tropical journal of pharmaceutical research*, 13(7). <http://dx.doi.org/10.4314/tjpr.v13i7.23>.
- Li, S. W., Zhang, X. & Sheng, G. P. (2016). Silver nanoparticles formation by extracellular polymeric substances (EPS) from electroactive bacteria. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(9), 8627—8633. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6105-7>.
- Lopes, T. S., Alves, G. G., Pereira, M. R., Granjeiro, J. M. & Leite, P. E. C. (2019). Advances and potential application of gold nanoparticles in nanomedicine. *Journal of cellular biochemistry*, 120(10), 16370—16378. <https://doi.org/10.1002/jcb.29044>.
- Mehta, A., Sidhu, C., Pinnaka, A. K. & Roy Choudhury, A. (2014). Extracellular polysaccharide production by a novel osmotolerant marine strain of *Alteromonas macleodii* and its application towards biomineralization of silver. *PLoS One*, 9(6), e98798. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098798>.
- Nejati, K., Dadashpour, M., Gharibi, T., Mellatyar, H. & Akbarzadeh, A. (2022). Biomedical applications of functionalized gold nanoparticles: a review. *Journal of Cluster Science*, 33(1), 1—16. <https://doi.org/10.1007/s10876-020-01955-9>.
- Patel, V., Berthold, D., Puranik, P. & Gantar, M. (2015). Screening of cyanobacteria and microalgae for their ability to synthesize silver nanoparticles with antibacterial activity. *Biotechnology Reports*, 5, 112—119. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.12.001>.
- Peng, D., Wu, B., Tan, H., Hou, S., Liu, M., Tang, H., ... & Xu, H. (2019). Effect of multiple iron-based nanoparticles on availability of lead and iron, and micro-ecology in lead contaminated soil. *Chemosphere*, 228, 44—53. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.106>.
- Pushpalatha, C., Suresh, J., Gayathri, V. S., Sowmya, S. V., Augustine, D., Alamoudi, ... & Patil, S. (2022). Zinc oxide nanoparticles: a review on its applications in dentistry. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 917990. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.917990>.
- Qais, F. A., Ahmad, I., Altaf, M. & Alotaibi, S. H. (2021). Biofabrication of gold nanoparticles using *Capsicum annum* extract and its anti-quorum sensing and antibiofilm activity against bacterial pathogens. *ACS omega*, 6(25), 16670—16682. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02297>.
- Raj, R., Dalei, K., Chakraborty, J. & Das, S. (2016). Extracellular polymeric substances of a marine bacterium mediated synthesis of CdS nanoparticles for removal of cadmium from aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 462, 166—175. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.10.004>.
- Rajkumari, J., Meena, H., Gangatharan, M. & Busi, S. (2017). Green synthesis of anisotropic gold nanoparticles using hordenine and their antibiofilm efficacy against *Pseudomonas aeruginosa*. *IET nanobiotechnology*, 11(8), 987—994. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2017.0069>.
- Rajoka, M. S. R., Mehwish, H. M., Zhang, H., Ashraf, M., Fang, H., Zeng, X., ... & He, Z. (2020). Antibacterial and antioxidant activity of exopolysaccharide mediated silver nanoparticle synthesized by *Lactobacillus brevis* isolated from Chinese koumiss. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 186, 110734. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110734>.
- Raveendran, S., Chauhan, N., Palaninathan, V., Nagaoka, Y., Yoshida, Y., Maekawa, T. & Kumar, D. S. (2015). Extremophilic polysaccharide for biosynthesis and passivation of gold nanoparticles and photothermal ablation of cancer cells. *Particle & Particle Systems Characterization*, 32(1), 54—64. <https://doi.org/10.1002/ppsc.201400081>.
- Raza, S., Ansari, A., Siddiqui, N. N., Ibrahim, F., Abro, M. I. & Aman, A. (2021). Biosynthesis of silver nanoparticles for the fabrication of non cytotoxic and antibacterial metallic polymer based nanocomposite system. *Scientific Reports*, 11(1), 10500. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90016-w>.
- Saravanan, C., Rajesh, R., Kaviarasan, T., Muthukumar, K., Kavitha, D. & Shetty, P. H. (2017). Synthesis of silver nanoparticles using bacterial exopolysaccharide and its application for degradation of azo-dyes. *Biotechnology Reports*, 15, 33—40. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.02.006>.
- Sarkar, S., Banerjee, A. & Bandopadhyay, R. (2024). Bacterial polysaccharide-stabilized silver nanoparticles photocatalytically decolorize azo dyes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196(5), 2466—2486. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04648-x>.

Scala, A., Piperno, A., Hada, A., Astilean, S., Vulpoi, A., Ginestra, G., ... & Gugliandolo, C. (2019). Marine bacterial exopolymers-mediated green synthesis of noble metal nanoparticles with antimicrobial properties. *Polymers*, 11(7), 1157. <https://doi.org/10.3390/polym11071157>.

Shehata, N. S., Elwakil, B. H., Elshewemi, S. S., Ghareeb, D. A. & Olama, Z. A. (2024). In vitro and in vivo studies of selenium nanoparticles coated bacterial polysaccharide as anti-lung cancer agents. *Microbial Cell Factories*, 23(1), 339. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02601-z>.

Singh, S., Sran, K. S., Pinnaka, A. K. & Choudhury, A. R. (2019). Purification, characterization and functional properties of exopolysaccharide from a novel halophilic *Natronotalea sambharensis* sp. nov. *International journal of biological macromolecules*, 136, 547—558. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.080>.

Skrotska, O., Protsenko, M., Zhobolko, O. & Marynin, A. (2025). Biosynthesis and characterization of selenium nanoparticles by *Saccharomyces cerevisiae* M437. *Ukrainian Journal of Food Science*, 13(1), 91—110. <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2025-13-1-10>.

Song, M., Aipire, A., Dilxat, E., Li, J., Xia, G., Jiang, Z., ... & Li, J. (2024). Research progress of polysaccharide-gold nanocomplexes in drug delivery. *Pharmaceutics*, 16(1), 88. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16010088>.

Suganya, K. U., Govindaraju, K., Kumar, V. G., Dhas, T. S., Karthick, V., Singaravelu, G. & Elanchezhian, M. (2015). Blue green alga mediated synthesis of gold nanoparticles and its antibacterial efficacy against Gram positive organisms. *Materials Science and Engineering: C*, 47, 351—356. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.11.043>.

Tijani, N. A., Hokello, J., Eilu, E., Akinola, S. A., Afolabi, A. O., Makeri, D., ... & Adebayo, I. A. (2025). Metallic nanoparticles: a promising novel therapeutic tool against antimicrobial resistance and spread of superbugs. *BioMetals*, 38(1), 55—88. <https://doi.org/10.1007/s10534-024-00647-5>.

Thota, S. C. & Sreelatha, B. (2020). Biosynthesis of silver nanoparticles and exopolysaccharide using novel thermophilic strain (Ts-1) of *Bacillus amyloliquefaciens*. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.06.04.134742>.

Vidya, S. M., Mutalik, S., Bhat, K. U., Huilgol, P. & Avadhani, K. (2016). Preparation of gold nanoparticles by novel bacterial exopolysaccharide for antibiotic delivery. *Life sciences*, 153, 171—179. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2016.04.022>.

Vignesh, V., Sathiyarayanan, G., Sathishkumar, G., Parthiban, K., Sathish-Kumar, K. & Thirumurugan, R. (2015). Formulation of iron oxide nanoparticles using exopolysaccharide: evaluation of their antibacterial and anticancer activities. *RSC advances*, 5(35), 27794—27804. <https://doi.org/10.1039/C5RA03134F>.

Xu, W., Yang, T., Liu, S., Du, L., Chen, Q., Li, X., ... & Tan, X. (2022). Insights into the synthesis, types and application of iron nanoparticles: the overlooked significance of environmental effects. *Environment International*, 158, 106980. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106980>.

Yumei, L., Yamei, L., Qiang, L. & Jie, B. (2017). Rapid biosynthesis of silver nanoparticles based on flocculation and reduction of an exopolysaccharide from *Arthrobacter* sp. B4: its antimicrobial activity and phytotoxicity. *Journal of Nanomaterials*, 2017(1), 9703614. <https://doi.org/10.1155/2017/9703614>.

Zaki, S., Etarahony, M., Elkady, M. & Abd-El-Haleem, D. (2014). The use of bioflocculant and bioflocculant-producing *Bacillus mojavenensis* strain 32A to synthesize silver nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2014(1), 431089. <https://doi.org/10.1155/2014/431089>.

Zhang, X. F., Liu, Z. G., Shen, W. & Gurnathan, S. (2016). Silver nanoparticles: synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. *International journal of molecular sciences*, 17(9), 1534. <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>.

Zang, W., Cao, H., Ge, J. & Zhao, D. (2024). Structures, physical properties and antibacterial activity of silver nanoparticles of *Lactiplantibacillus plantarum* exopolysaccharide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130083. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130083>.