

BIOSYNTHESIS OF NOBLE METAL NANOPARTICLES. PART 1. USE OF FUNGI, YEAST AND BACTERIA

O. Skrotska, V. Marchenko

National University of Food Technologies

Key words:

Nanoparticles

Noble metals

Fungi

Yeast

Bacteria

Article history:

Received 03.07.2022

Received in revised form

19.07.2022

Accepted 13.08.2022

Corresponding author:

O. Skrotska

E-mail:

skrotska@ukr.net

Citation: Скроцька О. І.,
Марченко В. В. (2023).
Біосинтез наночастинок
благородних металів. Ча-
стина І. Використання
грибів, дріжджів і бакте-
рій. *Наукові праці НУХТ*,
29(3), 50—72.

DOI: 10.24263/2225-
2924-2023-29-3-6

ABSTRACT

Noble metal nanoparticles namely gold (AuNPs), silver (AgNPs), platinum (PtNPs), palladium (PdNPs), rhodium (RhNPs) and ruthenium (RuNPs) can be prepared by chemical, physical and biological methods. Biosynthesis of nanoparticles of these metals using fungi, yeast and bacteria were considered in the article.

The biosynthesis of noble metal nanoparticles using fungi of the genus *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cordyceps*, *Fusarium*, *Neurospora*, etc. were studied. Information was given on the possibilities of using yeast for the biosynthesis of nanoparticles namely the results of research using the genera *Saccharomyces*, *Rhodotorula*, *Phaffia*, *Candida*, *Yarrowia*, *Pichia* and others. Genera of gram-positive (*Staphylococcus*, *Streptomyces*, *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Corynebacterium*) and gram-negative bacteria (*Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Vibrio*, *Escherichia*, *Shewanella*) were used for the biosynthesis of noble metal nanoparticles. The biosynthesis of nanoparticles using bacteria in aerobic and anaerobic conditions was also shown.

Information on the role of various biomolecules (proteins, enzymes, polysaccharides, amino acids) and their active groups (carboxyl, hydroxyl, amide, amine, methyl) in the reduction of metal ions, the formation of nanoparticles and their stabilization was provided. The article also contains material on various biological properties of nanoparticles — antibacterial, antifungal, antitumor, catalytic, etc., which will allow their use in various fields in the future.

When using microorganisms for the biosynthesis of noble metal nanoparticles, both their intracellular and extracellular synthesis is possible. It was also possible to synthesize nanoparticles using exo- and endogenous cellular metabolites when culture fluid supernatant, cell-free aqueous extract or lysate are used. At the same time depending on the biological object and the method of biosynthesis nanoparticles of different shapes (spherical, cubic, icosahedral, triangular, pentagonal, hexagonal) and sizes were formed, which affects their biological properties.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-3-6

БІОСИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ. ЧАСТИНА 1. ВИКОРИСТАННЯ ГРИБІВ, ДРІЖДЖІВ І БАКТЕРІЙ

О. І. Скроцька, В. В. Марченко

Національний університет харчових технологій

Наночастинки благородних металів, зокрема золота (AuNPs), срібла (AgNPs), платини (PtNPs), паладію (PdNPs), родію (RhNPs) та рутенію (RuNPs), можна отримати хімічними, фізичними та біологічними методами. У статті приділено увагу саме біосинтезу наночастинок вказаних металів з використанням грибів, дріжджів і бактерій.

Досліджено біосинтез наночастинок благородних металів з використанням грибів роду *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cordyceps*, *Fusarium*, *Neurospora* тощо. Наведено інформацію щодо можливостей застосування дріжджів для біосинтезу наночастинок, зокрема результати досліджень при використанні родів *Saccharomyces*, *Rhodotorula*, *Phaffia*, *Candida*, *Yarrowia*, *Pichia* тощо. Для біосинтезу наночастинок благородних металів використовують роди грампозитивних (*Staphylococcus*, *Streptomyces*, *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Corynebacterium*) і грамнегативних бактерій (*Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Vibrio*, *Escherichia*, *Shewanella*). Також показаний біосинтез наночастинок з використанням бактерій в аеробних та анаеробних умовах.

Наведено інформацію щодо ролі різних біомолекул (білків, ферментів, полісахаридів, амінокислот) та їхніх активних груп (карбоксильні, гідроксильні, амідні, амінні, метильні) у відновленні іонів металів, формуванні наночастинок та їх стабілізації, щодо різних біологічних властивостей наночастинок — антибактеріальних, протигрибкових, антипухлинних, каталітичних тощо, що в подальшому дасть змогу використовувати їх у різних галузях.

При використанні мікроорганізмів для біосинтезу наночастинок благородних металів можливий їх як внутрішньоклітинний, так і позаклітинний синтез. Також можливий синтез наночастинок з використанням екзо- та ендогенних клітинних метаболітів, коли використовують супернатант культуральної рідини, безклітинний водний екстракт або лізат. При цьому залежно від біологічного об'єкта та способу біосинтезу формуються наночастинки різної форми (сферичні, кубічні, ікосаедричні, трикутні, п'ятикутні, шестикутні) та розмірів, що впливає на їх біологічні властивості.

Ключові слова: наночастинки, благородні метали, гриби, дріжджі, бактерії.

Постановка проблеми. До благородних металів відносять дорогоцінні метали — золото і срібло, а також метали платинової групи — платину, паладій, родій, іридій, рутеній та осмій. Наночастинки вказаних металів використовують у різних галузях. У харчовій промисловості можна використовувати пакувальні матеріали з наночастинками для запобігання розвитку патогенних мікроорганізмів у продуктах харчування. Також наночастинки металів можна використовувати для

зnezараження води. Є дослідження щодо їх застосування у сільському господарстві як протигрибкових та антибактеріальних засобів, пестицидів, засобів для біоремедіації ґрунтів. Їх можна використовувати у медицині як антибактеріальні, антигрибкові, антивірусні та антипухлинні сполуки. Досліджуються можливості використання наночастинок для діагностики різних захворювань (Koul, Poonia, Yadav, & Jin, 2021).

Традиційні методи синтезу наночастинок (хімічні і фізичні) є тривалими, трудомісткими та ґрунтуються на використанні токсичних сполук, які в подальшому забруднюють навколишнє середовище (Joudeh, Saragliadis, Koster, Mikheenko, & Linke, 2022). Саме тому нині активно вивчаються нанобіотехнології наночастинок благородних металів з використанням різних біологічних об'єктів. Зважаючи на вищевикладене, **метою цього огляду** є аналіз наукових публікацій щодо можливостей використання грибів, дріжджів і бактерій для біосинтезу даних металевих наночастинок.

Матеріали і методи. Для написання огляду були використані сучасні наукові публікації зарубіжних і вітчизняних вчених у міжнародних та українських виданнях. Проаналізовані публікації стосуються використання грибів, дріжджів і бактерій для біосинтезу наночастинок благородних металів. Пошук публікацій здійснювали з використанням світових наукометричних баз даних PubMed та Google Scholar.

Викладення основних результатів дослідження. *Можливості застосування грибів.* При використанні грибів для біосинтезу наночастинок золота (AuNPs), срібла (AgNPs), платини (PtNPs) та паладію (PdNPs), крім самої біомаси (Syed, 2012; Castro-Longoria, 2012), можна використовувати грибний фільтрат (Birla, 2013; Vala, 2015; Sarkar, 2017), або безклітинний водний екстракт (Mishra, 2012; Mohana, 2020). Якщо наночастинки синтезують з використанням грибної біомаси, то можливий як позаклітинний їх синтез (Syed, 2012; Du, 2015; Costa Silva, 2017), так і внутрішньоклітинний (Castro-Longoria, 2012; Du, 2011; Gupta, 2013).

AuNPs. Для біосинтезу наночастинок золота ряд авторів використовують безклітинні фільтрати або супернатанти міцеліальних грибів. Так, Vala з цією метою використовувала гриби морського походження *Aspergillus sydowii*, які були виділені з вод затоки Хамбхат (західне узбережжя Індії). Гриби культивували впродовж чотирьох діб, після чого отримували грибний фільтрат для синтезу AuNPs (Vala, 2015). В іншому випадку використовували ендоефітні гриби *Aspergillus terreus* AREF023. Штам виділили з кореня *Datura metel* (дурман індійський). У цьому дослідженні з метою отримання грибного фільтрату штам AREF023 культивували впродовж 10 діб (Mishra, Kalra, Dilawari, Goel & Barrow, 2022). Barabadi зі співавторами виділили з ґрунту *Penicillium crustosum*, клітини якого культивували 10 діб, після чого отримували супернатант культуральної рідини для подальшого синтезу AuNPs (Barabadi та ін., 2014).

Mishra зі співавторами у своїх дослідженнях використовували *Penicillium rugulosum* KCCM 11686, який культивували упродовж 72 годин. Далі біомасу гриба використовували для отримання безклітинного водного екстракту з живої та інактивованої автоклавуванням при 121 °C біомаси з метою біосинтезу наночастинок золота (Mishra, Tripathy, & Yun, 2012). Також показано синтез AuNPs з використанням біомаси *Cordyceps militaris*, яку обробляли ультразвуком протягом

30 хв, після чого центрифугували та використовували для біосинтезу AuNPs отриманий супернатант (Ji, Cao, & Song, 2019).

Цікавим є дослідження, в якому для біосинтезу наночастинок золота використовують феноли і поліфеноли, що були виділені з клітин висушених трутовиків — *Ganoderma applanatum* (Abdul-Hadi, Owaed, Rabeea, Abdul Aziz, & Jameel, 2020).

Що стосується механізмів біосинтезу AuNPs, то встановлено, що біовідновлення іонів золота ініціюється перенесенням електрона від НАДФН-залежної редуктази як електронного переносника. У свою чергу, ароматичні амінокислоти білків (триптофан і тирозин) як відновники можуть брати участь у біосинтезі наночастинок золота (Barabadi та ін., 2014). Також показано, що присутність рутину, курцетину, епігену, кемферолу та галової кислоти як відновників і стабілізаторів призводить до синтезу AuNPs (Abdul-Hadi, Owaed, Rabeea, Abdul Aziz, & Jameel, 2020). Крім того, доведено, що присутність гідроксильних та алкінових груп у біомолекулах відіграє важливу роль в синтезі наночастинок золота (Ji, Cao & Song, 2019). А наявність карбоксильних, фенольних кислот та амідних зв'язків є важливим для стабілізації та покриття AuNPs (Mishra, Kalra, Dilawari, Goel, & Barrow, 2022).

AgNPs. У багатьох дослідженнях з метою синтезу наночастинок срібла використовують безклітинний фільтрат грибів (Binupriya, 2010; Jain, 2011; Nithya, 2009; Birla, 2013). Проте є дослідження, де використовується фільтрат *Aspergillus oryzae* var. *viridis*, клітини яких попередньо інактивували автоклавуванням при 121 °C протягом 15 хвилин. Отримані AgNPs з використанням саме такого фільтрату мали малі розміри та були однорідними (Binupriya, Sathishkumar, & Yun, 2010).

Цікаво, що у більшості випадків синтез наночастинок срібла з використанням грибів здійснюється у темряві без доступу світла (Jain, 2011; Nithya, 2009). Але Birla зі співавторами показали можливість використання сонячного світла під час біосинтезу AgNPs. Так, отримані наночастинок з середнім розміром 42 нм та максимальним піком поглинання при 449 нм були синтезовані упродовж 10 хвилин. Також біосинтез спостерігався з використанням УФ-світла, де через 24 год утворились AgNPs з адсорбційним піком при 407 нм (Birla, Gaikwad, Gade & Rai, 2013).

Нині відомо, що порівняно з бактеріями грибам більш притаманний позаклітинний механізм біосинтезу AgNPs (Binupriya, 2010; Jain, 2011; Nithya, 2009; Birla, 2013). Причому важливу роль у цих механізмах в основному відіграють різні білки (Jain, 2011; Nithya, 2009; Birla, 2013). Так, було показано, що за використання патогенних цвілевих грибів *Aspergillus flavus* в синтезі наночастинок беруть участь два білка з різною молекулярною масою (32 та 35 кДа). Вказано, що білок з молекулярною масою 32 кДа може бути ферментом редуктазою (Jain, Bhargava, Majumdar, Tarafdar, & Panwar, 2011). Під час біосинтезу AgNPs з використанням патогенних недосконалих грибів *Fusarium oxysporum*, що були виділені з плоду банана, який почав розкладатись, автори виявили у реакційній суміші присутність різних функціональних груп амінокислот, а також фермент редуктазу (Birla, Gaikwad, Gade & Rai, 2013). В іншому дослідженні з *Pleurotus sajor-caju* (глива звичайна сіра) автори встановили, що триптофан, тирозин або фенілаланін беруть участь у процесах біосинтезу наночастинок срібла (Nithya & Ragunathan, 2009).

PtNPs. Досліджено позаклітинний синтез PtNPs з використанням біомаси мезофільних грибів *Fusarium oxysporum*. При чому культивування грибів з метою отримання біомаси відбувалось упродовж 5 днів при 25 °C та pH 7 (Syed & Ahmad, 2012). Інші автори для біосинтезу наночастинок платини використовували біомасу та екстракт міцеліальних грибів *Neurospora crassa*. Культивування грибів здійснювали упродовж 24 годин при 28 °C. При цьому при використанні біомаси *N. crassa* відбувається внутрішньоклітинний синтез PtNPs (Castro-Longoria, Moreno-Velasquez, Vilchis-Nestor, Berumen, & Borja, 2012). Також біосинтез PtNPs спостерігали при використанні фільтрату недосконалих грибів *Alternaria alternata* MAMP/C/51, які культивували 15 діб при 30 °C та pH 5 (Sarkar & Acharya, 2017). Досліджено біосинтез наночастинок платини при використанні безклітинного фільтрату *Penicillium chrysogenum* KACC 425892. При цьому гриби культивували 48 год при 37 °C у змодельованих умовах мікрогравітації (Subramaniyan та ін. 2018).

Стосовно механізму біосинтезу наночастинок платини ряд авторів зазначають, що важливу роль при цьому мають поверхнево-зв'язані білкові молекули, які позаклітинно виділяються грибами. Так, присутність гідроксильних та альдегідних зв'язків в досліджуваних розчинах свідчить про наявність білків та інших органічних сполук, які беруть участь у синтезі PtNPs (Sarkar & Acharya, 2017). Крім цього, білки можуть зв'язуватися з наночастинками платини або через вільні амінні групи, або через залишки цистеїну в білках з метою стабілізації утворених наночастинок (Syed & Ahmad, 2012).

PdNPs. Для біосинтезу наночастинок паладію можна використовувати безклітинний водний екстракт *Inonotus obliquus*. Гриб паразитує на деревах, викликаючи білу серцевинну гниль деревини. Досліджуючи біосинтез PdNPs при використанні *I. obliquus*, автори встановили, що саме сполуки фенольних кислот беруть участь у формуванні наночастинок. (Gil та ін., 2018). Також показано можливість використання істівних грибів для біосинтезу PdNPs. Зокрема, вперше про можливість використання печериці садової для біосинтезу наночастинок паладію було повідомлено у 2020 році. При цьому для самого біосинтезу автори використовували водний екстракт грибів. Є дослідження біосинтезу наночастинок паладію з використанням водного екстракту печериці садової — *Agaricus bisporus*. Показано, що біосинтез PdNPs відбувається за участі полісахаридів, амідів і фенольних кислот, що відновлюють паладій і стабілізують наночастинки. Були досліджені різні біологічні властивості наночастинок паладію. При цьому вони мали значно більшу антибактеріальну активність щодо грампозитивних бактерій, ніж до грамнегативних, що пов'язано із особливостями будови клітинних стінок цих груп бактерій (Mohana, & Sumathi, 2020).

При використанні біомаси *Phanerochaete chrysosporium* був показаний позаклітинний синтез наночастинок паладію. Авторі дослідження передбачають, що на основі вказаних грибів можна буде розробляти мембрани для очищення промислових стічних вод з метою видалення з них іонів паладію та перетворення їх у наночастинки (Tarver та ін., 2019).

Узагальнена інформація щодо біосинтезу наночастинок благородних металів з використанням грибів наведена в табл. 1.

Таблиця 1. Використання грибів для біосинтезу наночастинок благородних металів

Гриби	Характеристика наночастинок		Біологічні властивості наночастинок		Джерело
	Форма, розміри	Параметри біосинтезу			
AuNPs					
<i>Aspergillus sydowii</i>	Сферичні, 7-15 нм	27 °C, 72 год	*		Vala, 2015
<i>Aspergillus terreus</i> AREF023	Сферичні, 10 нм	40 °C, 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> MTCC737, <i>Vibrio cholera</i> N16961; антифунгальна активність щодо <i>Fusarium oxysporum</i> ITCC 6709, <i>Rhizoctonia solani</i> AG1-IA		Mishra, Kalra, Dilawari, Goel, & Barrow, 2022
<i>Penicillium rugulosum</i> KCCM 11686	Сферичні, 20—40 нм	30 °C, 72 год	Кон’югація з геномною ДНК бактерій <i>Escherichia coli</i> та <i>Staphylococcus aureus</i>		Mishra, Tripathy, & Yun, 2012
<i>Penicillium crustosum</i>	Сферичні, 100 нм	28 °C, 24 год	*		Barabadi та ін., 2014
<i>Cordyceps militaris</i>	Кубічні, 15—20 нм	25 °C, 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин HepG2 (гепатоцелюлярна карцинома)		Ji, Cao & Song, 2019
<i>Ganoderma applanatum</i>	Кубічні, ≈ 18 нм	80 °C, 15 хв	*		Abdul-Hadi, Owaid, Rabeea, Abdul Aziz, & Jameel, 2020
AgNPs					
<i>Aspergillus oryzae</i> var. <i>viridis</i> KCCM 11372	Сферичні, 5—50 нм	25 °C, 72 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> KCCM 12256		Binupriya, Sathishkumar, & Yun, 2010
<i>Pleurotus sajor-caju</i>	Сферичні, 5—50 нм	25 °C, 72 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Escherichia coli</i>		Nithya, & Ragunathan, 2009
<i>Aspergillus flavus</i> NJP08	Сферичні, 10—35 нм	28 °C, 72 год	*		Jain, Bhargava, Majumdar, Tarafdar, & Panwar, 2011
<i>Fusarium oxysporum</i>	Сферичні, 15-35 нм	22—25 °C (кімнатна), 45 хв	*	Birla, Gaikwad, Gade, & Rai, 2013	
PtNPs					
<i>Fusarium oxysporum</i>	Сферичні, 5—30 нм	25—27 °C, 96 год	*		Syed, & Ahmad, 2012

Продовження таблиці 1

<i>Penicillium chrysogenum</i> KACC 425892	Сферичні, ≈ 8,5 нм	100 °С, 12 год	Антиоксидантна активність; протипухлинна дія щодо ракових клітин C2C12; антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Streptococcus pyogenes</i> , <i>Enterococcus faecalis</i>	Subramaniyan та ін. 2018
<i>Neurospora crassa</i>	Сферичні, 20—110 нм	28 °С, 24 год	*	Castro-Longoria, Moreno-Velasquez, Vilchis-Nestor, Berumen, & Borja, 2012
<i>Alternaria alternata</i> MAMP/C/51	Різної форми (квазісферичні, прямокутні, тетраедричні, гексагональні, багатокутники), 50—315 нм	30 °С, 24 год	*	Sarkar, & Acharya, 2017
PdNPs				
<i>Agaricus bisporus</i>	Сферичні, ≈ 15 нм	22—25 °С (кімнатна), 30 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Enterobacter aerogenes</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Streptococcus pyrogens</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Proteus vulgaris</i> ; протипухлинна активність щодо клітин РК13 (рак нирок); антиоксидантна активність	Mohana, & Sumathi, 2020
<i>Inonotus obliquus</i>	Сферичні з пористою структурою, 70-100 нм	60 °С, 3 год	Протипухлинна активність щодо клітин HeLa (рак шийки матки)	Gil та ін., 2018
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Кубічні, 10-14 нм	37 °С, 48 год	Каталітична активність у реакціях Хека і Судзукі	Tarver та ін., 2019

Примітка: * — автори не досліджували біологічну активність наночастинок.

Дріжджі у біосинтезі наночастинок. Для біосинтезу наночастинок благородних металів можна використовувати біомасу дріжджів (Borse, 2015; Zhang, 2016; Alamri, 2018), супернатант (Jalal, 2018; Gayda, 2019; Liu, 2021), безклітинний лізат (Qu, 2018; Ronavari, 2018; Eramabadi, 2020) та безклітинний водний екстракт (Bolbanabad, 2020; Soliman, 2018; Skrotska, 2021). Нижче охарактеризовані різні можливості використання дріжджів для біосинтезу наночастинок.

AuNPs. Наночастинки золота можна отримати за допомогою біомаси дріжджів. Так, у 2016 р. вперше був досліджений біосинтез AuNPs з використанням біомаси морських дріжджів *Magnusiomyces ingens* LH-F1. При цьому біосинтезовані AuNPs не були зв'язані з клітинними компонентами і знаходились у позаклітинному середовищі (Zhang та ін., 2016). У подальшому був досліджений синтез наночастинок золота з використанням безклітинного лізату *M. ingens* LH-F1. Його готували шляхом заморожування та розморожування культуральної рідини з подальшою обробкою ультразвуком, після чого центрифугували і фільтрували надосадову рідину (Qu та ін., 2018).

Ronavari зі співавтор. досліджували можливість використання безклітинного лізату дріжджів *Phaffia rhodozyma* ATCC 24203 з високим вмістом антиоксиданту атаксантину для біосинтезу AuNPs. Автори отримували дріжджовий лізат шляхом механічного руйнування клітин дріжджів у дистильованій воді з подальшим відділенням клітинних залишків (Ronavari, Igaz & Gopisetty, 2018). Krishnan зі співавтор. по-іншому отримували лізат для біосинтезу наночастинок золота. Дослідники до клітинної суспензії *Candida parapsilosis* ATCC 7330 у фосфатному буфері добавляли фенілметилсульфонілфторид (інгібітор протеази), після чого обробляли клітини ультразвуком і центрифугували (Krishnan, Narayan & Chadha, 2016).

Також описаний біосинтез наночастинок золота з використанням розчину піомеланіну, який був виділений з дріжджів *Yarrowia lipolytica* W29 (Tahar та ін., 2019).

Щодо механізмів біосинтезу AuNPs, то встановлено, що при використанні біомаси дріжджів іони золота (Au^{3+}) відновлюються (Au^0) за участі специфічних біомолекул на поверхні клітини або у її цитоплазмі. Далі відбувається формування наночастинок та їх стабілізація за участі інших біомолекул, після чого відбувається вихід AuNPs з клітини в середовище. При цьому амідні, карбоксильні на гідроксильні групи білків можуть брати участь у відновленні золота та формуванні наночастинок (Zhang та ін., 2016). Білки, що містять амідні та гідроксильні групи, можуть адсорбуватися на поверхні AuNPs, спричиняючи зменшення концентрації Au^{3+} та стабілізації AuNPs (Zhang та ін., 2016). Крім того, показано, що саме амінні та карбоксильні групи білків, а не цілісні білкові молекули беруть участь у біосинтезі наночастинок золота (Qu та ін., 2018). Також встановлено, що НАДН бере участь у відновленні Au^{3+} до Au^0 , але він не бере участі у стабілізації вже утворених наночастинок. Зроблено припущення, що за стабілізацію наночастинок золота відповідають вуглеводи і цукри (Kumar, Karthik, Kumar & Roa, 2011). Показано, що біосинтез AuNPs може здійснюватись і без участі активних ферментів, оскільки в безклітинних екстрактах *Candida parapsilosis* ATCC 7330, які не мали редуктазної активності теж спостерігали біосинтез наночастинок. Тобто можлива неспецифічна редукція іонів золота з використанням інших відновників, які є у дріжджовій клітині (Krishnan, Jayakumar, Madhyastha & Chadha, 2021). Іншим механізмом біосинтезу наночастинок золота з використанням дріжджів може бути редукція іонів Au^{3+} та стабілізація AuNPs за допомогою амінокислот, особливо глутамінової кислоти, а також органічних кислот — бурштинової, яблучної та молочної (Yang та ін., 2017).

AgNPs. Показаний внутрішньоклітинний біосинтез наночастинок срібла в аеробних та анаеробних умовах з використанням біомаси *Meyerozyma guilliermondii* KX008616. AgNPs формувались у вигляді кластерів у цитоплазмі, або у внутрішніх і зовнішніх шарах клітинної стінки *M. guilliermondii* KX008616 (Alamgi та ін., 2018).

Досліджено біосинтез AgNPs при використанні супернатанту культуральної рідини *Candida glabrata*. Дріжджі були виділені з ротоглотки осіб, що хворіли на кандидоз ротової порожнини (Jalal та ін., 2018). Також встановлено можливість синтезу наночастинок срібла з використанням супернатанту дріжджів *Metschnikowia* sp. HX-YS, які були виділені з поверхні глоду *Crataegus pinnatifida* (Liu та ін., 2021). Досліджений біосинтез наночастинок срібла з використанням супернатанту культуральної рідини та безклітинного екстракту *Saccharomyces cerevisiae* M437. При цьому AgNPs, які були отримані з використанням безклітинного водного екстракту, були більш стабільними в процесі зберігання, ніж наночастинки, отримані з використанням супернатанту (Skrotska, Kharchenko, Laziuka, Marynin, & Kharchuk, 2021).

Bolbanabad зі співавтор. показали біосинтез AgNPs з використанням клітин та безклітинних водних екстрактів *Yarrowia lipolytica* DSM 3286. При використанні клітин наночастинки синтезуються в клітині, після чого секретиуються назовні. При використанні безклітинного екстракту біосинтез AgNPs відбувався у 5 разів швидше, ніж при використанні біомаси, але наночастинки мали вдвічі більший розмір (Bolbanabad, Ashengroph & Darvishi, 2020).

Іншими авторами також досліджений біосинтез наночастинок срібла з використанням безклітинного водного екстракту дріжджів: *Aureobasidium pullulans* RYLF 10 (Rahi, Manhas, Kaur, Malik, & Rahi, 2018), *Rhodotorula glutinis* і *Rhodotorula mucilaginosa* (Cunha та ін., 2018), *Rhodotorula* sp. ATL72 (Soliman, Elsayed, & Dyaa, 2018).

Якщо розглядати механізми біосинтезу наночастинок срібла за допомогою дріжджів, то вважається, що білки, амінокислоти, ферменти, вітаміни, полісахариди діють як відновники і стабілізатори AgNPs. При використанні безклітинного водного дріжджового екстракту формування наночастинок срібла розпочинається з відновлення іонів Ag^+ до Ag^0 сполуками, що містяться в самому екстракті, включаючи амінокислоти, вітаміни та вуглеводи. А далі відбувається стабілізація утворених AgNPs (Shu та ін., 2020). Однак найбільш широко прийнятий механізм біосинтезу наночастинок срібла при використанні дріжджів, що обумовлений НАДН-залежною нітратредуктазою. Встановлено, що відновлення іонів срібла відбувається за допомогою перенесення електронів з НАДН. Після чого відбувається стабілізація AgNPs за рахунок наявних у реакційній суміші біомолекул (Shabbir, & Mohammad, 2018).

Під час внутрішньоклітинного синтезу наночастинок срібла можливі різні варіанти їх формування. Перший — участь системи ферментів нітратредуктаз, які каталізують реакції відновлення іонів срібла в присутності АТФ і НАДН. Другий — активація специфічного поліпептиду, який може зв'язуватись з катіонами срібла, утворюючи при цьому специфічний комплекс, що транспортується у клітинні вакуолі, де й відбувається відновлення іонів срібла. Третій — утворення

AgNPs на поверхні клітин. Це може бути обумовлено електростатичною взаємодією між Ag^+ і наявними на поверхні дріжджових клітин негативно зарядженими карбоксилатними групами специфічних ферментів або білків (Alamri та ін., 2018).

PtNPs. Показано внутрішньоклітинний синтез наночастинок платини з використанням біомаси пробіотичних дріжджів *Saccharomyces boulardii*, а також можливість використання безклітинного водного екстракту для біосинтезу PtNPs. Автори встановили, що саме амідні і гідроксильні групи білкових молекул беруть участь у відновленні іонів платини, а також формуванні та стабілізації наночастинок платини (Borse, Kaler, & Banerjee, 2015).

Eramabadi із співавтор. використовували клітинний лізат *Rhodotorula mucilaginosa* CCV1 для біосинтезу PtNPs. Для цього дріжджі культивували 7 діб, після чого відділяли клітини, промивали дистильованою водою і руйнували ультразвуком, а далі відділяли клітинний дебрис і для біосинтезу наночастинок використовували супернатант клітинного лізату. Також доведена ключову роль різних груп білкових молекул у біосинтезі наночастинок платини (Eramabadi, Masoudi, Makhdoumi, & Mashreghi, 2020).

PdNPs. Встановлено можливість біосинтезу PdNPs з використанням супернатанту рекомбінантних термотолерантних дріжджів *Ogataea polymorpha* NCYC495-pGAP1-HsARG1. На моделі амперометричних біоелектродів на основі лакази та алкогольоксидази для визначення фенольних сполук і спиртів було показано можливість застосування PdNPs у біосенсорах. Також показано, що з використанням супернатанту вказаних дріжджів можна синтезувати наночастинки інших благородних металів — золота, срібла та платини. Автори встановили, що амідні, метильні, метиленові та гідроксильні групи біомолекул, що містяться у супернатанті, беруть участь у біосинтезі наночастинок (Gayda та ін., 2019).

Sriramulu та Sumathi для біосинтезу PdNPs використали сухі хлібопекарські дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*. Їх упродовж 30 хв витримували у воді при кімнатній температурі, після чого відбирали водний розчин, вносили в нього ацетат паладію і досліджували біосинтез наночастинок. Показано, що гідроксильні та інші функціональні групи білків беруть участь у біосинтезі та стабілізації і стабілізують PdNPs (Sriramulu & Sumathi, 2018).

Для отримання наночастинок паладію Chen зі співавтор. у своїх дослідженнях використовували висушені дріжджі *Pichia pastoris* GS115 (Chen та ін., 2014; Chen та ін., 2021). При цьому автори порівнювали синтез наночастинок без попереднього оброблення клітин та з попередньою обробкою водними розчинами соляної кислоти та гідроксиду натрію, а також метилюванням аміногруп шляхом додавання мурашиної кислоти та формальдегіду. В результаті PdNPs, які були отримані за попередньої обробки клітин, демонстрували вищу стабільність, були меншими за розмірами та більш диспергованими. Дослідження механізму синтезу наночастинок показали, що саме біомолекули із амідними зв'язками беруть у цьому безпосередню участь (Chen та ін., 2014). В іншому дослідженні автори синтезували наночастинки паладію за допомогою невеликої кількості відновленого оксиду графену для покриття та стабілізації Pd^{2+} за рахунок електростатичного притягання з метою подальшого відновлення до Pd^0 . При цьому функціональні групи (гідроксильні, карбоксильні, аміногрупи) на поверхні клітин беруть

участь в адсорбції та відновленні іонів паладію та відіграють важливу роль у синтезі наночастинок (Chen та ін., 2021).

Різні параметри біосинтезу наночастинок благородних металів з використанням дріжджів та їх біологічна активність вказані у табл. 2.

Таблиця 2. Дріжджі для біосинтезу наночастинок

Дріжджі	Характеристика наночастинок		Біологічні властивості наночастинок	Джерело
	Форма, розміри	Параметри біосинтезу		
AuNPs				
<i>Phaffia rhodozyma</i> ATCC 24203	Сферичні, 4—7 нм	22 °C, 24 год	Нетоксичні по відношенню до нормальних клітин HaCaT (кератиноцити шкіри); протигрибкова активність щодо <i>Cryptococcus neoformans</i> IFM 5844	Ronavari, Igaz, & Gopisetty, 2018
<i>Candida parapsilosis</i> ATCC 7330	Сферичні, 50—60 нм	37 °C, 72 год	Каталітична активність щодо відновлення 4-нітрофенолу	Krishnan, Narayan, & Chadha, 2016
<i>Yarrowia lipolytica</i> W29	Сферичні, 104 нм	50 °C, 24 год	Відсутність цитотоксичності щодо клітин NIH3T3 (фібробласти миші) та U2OS (остеосаркома людини)	Tahar та ін., 2019
<i>Magnusiomyces ingens</i> LH-F1	Більшість — сферичні або майже сферичні, 20—30 нм	30 °C, 48 год	Каталітична активність щодо відновлення нітрофенолів до амінофенолів	Qu та ін., 2018
	Різної форми (сферичні, трикутні, п'ятикутні, шестигнутні, неправильної форми), ≈ 80 нм	30 °C, 24 год		Zhang та ін., 2016
AgNPs				
<i>Candida glabrata</i>	Сферичні, овальні, 2—15 нм	22-25 °C (кімнатна), 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Salmonella typhimurium</i> , <i>Shigella flexneri</i> ; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i> , <i>Candida tropicalis</i> , <i>Candida parapsilosis</i> , <i>Candida dubliniensis</i> , <i>Candida krusei</i> , <i>Candida glabrata</i>	Jalal та ін., 2018

<i>Aureobasidium pullulans</i> RYLF 10	Сферичні, 2—54 нм	27 °C, 120 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella typhi</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Moraxella</i> sp.	Rahi, Manhas, Kaur, Malik, & Rahi, 2018
<i>Meyerozyma guilliermondii</i> KX008616	Сферичні, 2,5—30 нм	30 °C, 24 год	*	Alamri та ін., 2018
<i>Rhodotorula</i> sp. ATL72	Сферичні, овальні, 9—21 нм	22-25 °C (кімнатна), 24 год	Антимікробна активність щодо <i>Streptococcus</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp., <i>Shigella</i> sp., <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Klebsiella</i> sp., <i>Candida</i> sp.	Soliman, Elsayed, & Dyaa, 2018
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	Сферичні, 11—30	25 °C, 168 год	Протикандидозна активність щодо <i>Candida parapsilosis</i> ; каталітична активність щодо деградації 4-нітрофенолу та метиленового синього	Cunha та ін., 2018
<i>Rhodotorula glutinis</i>	Сферичні, 14—60 нм			
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> M437	Сферичні, овальні, 15—30 нм	45 °C, 72 год	*	Skrotska, Kharchenko, Laziuka, Marynin, & Kharchuk, 2021
<i>Yarrowia lipolytica</i> DSM 3286	Сферичні, 24 нм	30 °C, 16 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC33591, <i>Escherichia coli</i> ATCC25922, <i>Enterococcus faecalis</i> ATCC29212, <i>Proteus vulgaris</i> ATCC49132, <i>Streptococcus pyogenes</i> ATCC19615, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC27853	Bolbanabad, Ashengroph, & Darvishi, 2020
<i>Metschnikowia</i> sp. HX-YS	Сферичні, 50—100 нм	28 °C, 96 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Escherichia coli</i> ATCC8099, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC6538; протипухлинна активність по відношенню до клітин A549, H1975 (карцинома легень); відсутність цитотоксичності щодо клітин Beas 2B (епітеліальні клітини легень людини)	Liu та ін., 2021
PtNPs				
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i> CCV1	Сферичні, 3 нм	90 °C, 1 год	Антиоксидантна активність; антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	Eramabadi, Masoudi, Makhdoumi, & Mashreghi, 2020
<i>Saccharomyces boulardii</i>	Сферичні, 80—150 нм	35 °C, 36 год	Протипухлинна активність щодо клітин A431 (епідермальна карцинома) і MCF-7 (аденокарцинома молочної залози)	Borse, Kaler, & Banerjee, 2015

PdNPs				
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Різної форми (сферичні, трикутні, кубічні, шестикутні), 32 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Фотокалітична активність щодо текстильного барвника прямого синього	Sriramulu, & Sumathi, 2018
<i>Ogataea polymorpha</i> NCYC495-pGAP1-HsARG1	Різної форми	37 °C, 120 год	*	Gayda та ін., 2019
<i>Pichia pastoris</i> GS115	Сферичні, 2—17 нм	30 °C, 2 год	Каталітична активність щодо деградації 4-нітрофенолу	Chen та ін., 2014
	Сферичні, 15—21 нм	30 °C, 5 год	Каталітична активність щодо деградації 4-нітрофенолу та метиленового синього	Chen та ін., 2021

Примітка: * — автори не досліджували біологічну активність наночастинок.

Використання бактерій та продуктів їх біосинтезу. Для біосинтезу наночастинок благородних металів використовують як супернатант культуральної рідини (Juibari, 2011; Syed, 2016; Baskaran, 2017; Shunmugam, 2021; Sharma, 2022;), так і самі клітини бактерій (Korbekandi, 2012; Srivastava, 2012; Martins, 2017). При використанні супернатанту відбувається безклітинний синтез наночастинок за участі екзогенних бактеріальних метаболітів. Коли ж використовують біомасу бактерій, то можливий як внутрішньоклітинний (Gaidhani, 2014; Omajali, 2015; Cui, 2017), так і позаклітинний (Soltani, 2015; Gowtamma, 2015; Ahmed, 2018) біосинтез. Розглянемо детальніше можливі варіанти біосинтезу наночастинок різних благородних металів з використанням бактерій та їх метаболітів.

AuNPs. Дослідники довели, що для біосинтезу наночастинок золота можна використовувати супернатант культуральної рідини бактерій. Зокрема, досліджено біосинтез наночастинок золота з використанням супернатанту після 24-годинного культивування грамнегативних бактерій *Klebsiella pneumoniae* MTCC-4030 (Prema, Iniya & Immanuel, 2016). Безклітинний біосинтез AuNPs спостерігали при використанні супернатанту після 24-годинного культивування бактерій *Pseudomonas denitrificans*. До речі, ці мікроорганізми є грамнегативними факультативно-анаеробними денітрифікуючими бактеріями. Автори дослідили два температурних режими біосинтезу: 37 та 100 °C. При цьому при вищій температурі біосинтезу швидкість реакції відновлення золота була на порядок вищою, але наночастинок при цьому формували конгломерати. Слід наголосити, що рН реакційної суміші становив 3,0. (Mewada, Oza, Pandey & Sharon, 2012). Також показано біосинтез AuNPs при використанні супернатанту культуральної рідини ендofітних бактерій *Pseudomonas fluorescens* CA 417 (Syed, Prasad & Satish, 2016). Встановлено біосинтез AuNPs при використанні супернатанту грампозитивних бактерій *Staphylococcus epidermidis* MTCC-435, які є представниками нормальної мікро-

флори шкіри людини (Srinath & Ravishankar, 2015). Крім того, морські мікроорганізми здатні до біосинтезу наночастинок золота, зокрема, досліджено біосинтез AuNPs при використанні супернатанту грамнегативних морських бактерій *Vibrio alginolyticus* (Shunmugam та ін., 2021).

Цікавим є дослідження біосинтезу AuNPs з використанням мембранної фракції інактивованих автоклавуванням клітин *Escherichia coli* K12. При цьому pH реакційної суміші (мембранна фракція бактеріальних клітин, тетрахлороаурат водню, дистильована вода) був на рівні 2,8. Автори зробили припущення, що саме мембраннозв'язані білки можуть брати участь у процесі біосинтезу AuNPs, оскільки при використанні розчинної фракції автоклавованих клітин біосинтезу наночастинок золота не спостерігалось (Srivastava, Yamada, Ogino & Kondo, 2013).

Показано синтез наночастинок золота при використанні живої біомаси ґрунтових грампозитивних клітин *Streptomyces fulvissimus* U, які були виділені із рисових полів. При цьому наночастинок синтезувались позаклітинно (Soltani, Shahidi & Khaleghi, 2015).

Щодо механізмів біосинтезу наночастинок золота, то показано, що в позаклітинному біосинтезі AuNPs бере участь нітратредуктаза (Mewada, Oza, Pandey & Sharon, 2012). Також встановлено, що у відновленні іонів золота та формуванні наночастинок беруть участь бактеріальні сполуки, присутні у супернатанті, зокрема такі, що містять CH_3^- , OH^- , CF^- , CBr^- та карбонільні групи (Syed, 2016; Shunmugam, 2021).

AgNPs. На сьогодні досліджено біосинтез наночастинок срібла при використанні супернатанту культуральної рідини грамнегативних бактерій *Escherichia coli* DH5 (Gurunathan та ін., 2009), термофільних бактерій *Ureibacillus thermosphaericus* (Juibari, Abbasalizadeh, Jouzani & Noruzi, 2011), пробіотичних бактерій *Lactobacillus crustorum* F11 (Sharma, Sharma & Kaushal, 2022). Зазвичай, біосинтез AgNPs проводять у темноті, проте при використанні супернатанту грампозитивних бактерій *Staphylococcus aureus* на початку біосинтезу реакційну суміш витримували 5 хв при яскравому освітленні (Nanda & Saravanan, 2009).

Показано синтез AgNPs при використанні біомаси ендofітних бактерій *Bacillus cereus*. При цьому наночастинок синтезувались позаклітинно. У випадку використання супернатанту автори не спостерігали біосинтезу наночастинок, що говорить про те, що саме бактеріальні клітини відповідальні за їх біосинтез (Sunkar & Nachiyar, 2012). Також позаклітинний синтез наночастинок срібла показаний при використанні біомаси ґрунтових грампозитивних бактерій *Corynebacterium glutamicum* (Gowramma, Keerthi, Rafi, & Rao, 2015). Разом з тим досліджено внутрішньоклітинний синтез AgNPs при використанні ґрунтових грампозитивних бактерій *Bacillus cereus* PGN1. Штам було виділено зі стічних вод гальванічного виробництва (Babu, & Gunasekaran, 2009). Також показаний внутрішньоклітинний синтез наночастинок срібла при використанні біомаси молочнокислих бактерій *Lactobacillus casei* subsp. *casei*. Автори припустили, що іони срібла проникають всередину бактеріальних клітин, а потім відновлюються ферментами, що присутні у цитоплазмі (Korbekandi, Iravani & Abbasi, 2012).

Досліджуючи біомолекули, які можуть брати участь у біосинтезі AgNPs, вчені довели, що вільні амінні та карбонільні групи, які наявні у бактеріальних білках можуть брати участь у формування та стабілізації наночастинок срібла (Babu &

Gunasekaran, 2009). Також OH-, CH- та NH-групи білків можуть зв'язуватись з іонами срібла і брати участь у його відновленні та формуванні наночастинок (Sunkar, & Nachiyar, 2012). Гідроксильні, білкові та карбоксильні групи беруть участь у біосинтезі AgNPs при використанні пробіотичних штамів бактерій (Sharma, Sharma & Kaushal, 2022).

PtNPs. Одне із перших повідомлень про біосинтез наночастинок платини стосується використання біомаси грамнегативних морських бактерій *Shewanella algae* ATCC 51181, які є факультативними анаеробами. При цьому PtNPs були локалізовані у периплазмі клітин між внутрішньою та зовнішньою цитоплазматичною мембраною. Вважається, що іони платини поглинаються із водного розчину клітинами і в периплазмі відбувається їх ферментативне відновлення (Konishi та ін., 2007).

Досліджено біосинтез PtNPs з використанням біомаси сульфатредукуючих анаеробних бактерій *Desulfovibrio vulgaris* DSM 644. Наночастинки синтезувались у периплазматичному просторі, після чого проходили через зовнішню цитоплазматичну мембрану і накопичувались на поверхні клітин. Можливо саме клітинні гідрогенази, які функціонують у периплазмі і беруть участь у відновленні іонів платини (Martins та ін., 2017).

Також показано внутрішньоклітинний синтез PtNPs при використанні бактерій *Acinetobacter calcoaceticus* PUCM 101, які були виділені з африканського проса *Pennisetum glaucum*. Було встановлено, що в клітинах *A. calcoaceticus* PUCM 101, в яких відбувається біосинтез PtNPs синтезуються чотири типи білків з молекулярною масою 29, 43, 66 і 97 кДа. Автори виділили їх та реалізували біосинтез PtNPs з використанням різних комбінацій цих білків у безклітинному середовищі. При цьому при використанні кожного з білків окремо не відбувався біосинтез PtNPs. Тож автори припустили, що в досліджуваних бактеріальних клітинах відбувається багатостадійний процес відновлення іонів платини (IV) до платини (0) та формування PtNPs за рахунок участі більш, ніж одного білка. Ці білки не тільки беруть участь у синтезі наночастинок, але й стабілізують їх, утворюючи стабільний неколоїдний розчин (Gaidhani, Yeshvekar, Shedbalkar, Bellare, & Chopade, 2014).

Є повідомлення про безклітинний синтез PtNPs з використанням супернатанту культуральної рідини морських актинобактерій *Streptomyces* sp. Автори запропонували механізм синтезу PtNPs, який полягає у відновленні іонів платини ферментом хлоридредуктазою (Baskaran та ін., 2017).

PdNPs. Досліджено внутрішньоклітинний біосинтез PdNPs грамположитивними бактеріями *Enterococcus faecalis* CTCCC M2012445, який складається з кількох етапів: біосорбція іонів паладію (II) з розчину в середину клітини, біовідновлення та формування наночастинок паладію. Автори встановили, що карбоксильні та гідроксильні групи, а також аміногрупи є основними функціональними групами, що беруть участь у внутрішньоклітинному біосинтезі PdNPs (Cui та ін., 2017). Також досліджено внутрішньоклітинний біосинтез наночастинок паладію при використанні грамположитивних аеробних бактерій *Bacillus benzeovorans* NCIMB 12555 та грамнегативних анаеробних бактерій *Desulfovibrio desulfuricans* NCIMB 8307 та NCIMB 8326 (Omajali, Mikheenko, Merroun, Wood, & Macaskie, 2015). Показано можливість біосинтезу PdNPs в анаеробних умовах за допомогою біомаси

грамнегативних бактерій *Shewanella oneidensis* MR-1. При цьому наночастинки локалізувались у зовнішній та внутрішній цитоплазматичній мембрані та периплазматичному просторі. Дослідники встановили ключову роль НАДН-дегідрогеназ та гідрогеназ (HydA и HydB) у біосинтезі внутрішньоклітинних наночастинок паладію (Yang та ін., 2020).

Ahmed зі співавторами дослідили позаклітинний біосинтез PdNPs при використанні електрохімічно активної біоплівки анаеробних бактерій *Shewanella loihica* PV-4. Також було показано здатність даного штаму бактерій до позаклітинного біосинтезу золота і платини (Ahmed, Kalathil, Shi, Alharbi & Wang, 2018).

Наночастинки родію (RhNPs) і рутенію (RuNPs). З використанням грамнегативних аеробних клітин *Pseudomonas aeruginosa* SM1 був реалізований біосинтез наночастинок родію та рутенію. Слід відмітити, що автори дослідили здатність даних бактерій до біосинтезу і інших наночастинок — срібла, паладію, платини, заліза, нікелю, кобальту і літію. При цьому спостерігали внутрішньоклітинний біосинтез лише для наночастинок кобальту і нікелю, а наночастинки інших металів синтезувались позаклітинно. Автори зробили припущення, що саме первинні та вторинні аміни беруть участь у відновленні металів, формуванні наночастинок та їх подальшій стабілізації (Srivastava, & Constanti, 2012).

У табл. 3 наведена узагальнена інформація щодо можливостей використання бактерій для біосинтезу наночастинок різних благородних металів.

Таблиця 3. Синтез наночастинок благородних металів з використанням бактерій

Бактерії	Характеристика наночастинок		Біологічні властивості наночастинок	Джерело
	Форма, розміри	Параметри біосинтезу		
AuNPs				
<i>Klebsiella pneumoniae</i> MTCC-4030	Сферичні, 10—15 нм	37 °C, 24 год	Антимікробна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Prema, Iniya, & Immanuel, 2016
<i>Staphylococcus epidermidis</i> MTCC-435	Сферичні, 20—25 нм	100 °C, 10 хв	Каталітична активність щодо деградації метиленового синього	Srinath, & Ravishankar, 2015
<i>Escherichia coli</i> K12	Сферичні, ≈ 50 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Каталітична активність щодо деградації 4-нітрофенолу	Srivastava, Yamada, Ogino, & Kondo, 2013
<i>Pseudomonas denitrificans</i>	Кубічні, 25—30 нм	37 °C, 4 год	*	Mewada, Oza, Pandey, & Sharon, 2012
<i>Pseudomonas fluorescens</i> CA 417	Полідисперсні різної форми (сферичні, трикутні, шестигруні), 5—50 нм	22—25 °C (кімнатна), 20 хв	Антимікробна активність щодо клінічних штамів <i>Pseudomonas aeruginosa</i> MTCC 7903, <i>Escherichia coli</i> MTCC 7410, <i>Staphylococcus aureus</i> MTCC 7443, <i>Bacillus subtilis</i> MTCC 121, <i>Klebsiella pneumoniae</i> MTCC 7407	Syed, Prasad, & Satish, 2016

Продовження таблиці 3

<i>Streptomyces fulvissimus</i> U	Різної форми (трикутні, сферичні), 20-50 нм	30 °C, 48 год	*	Soltani, Shahidi, & Khaleghi, 2015
<i>Vibrio alginolyticus</i>	Монодисперсні неправильної форми, 50—100 нм	40 °C, 24 год	Протипухлинна активність по відношенню до клітин HCA-7 (карцинома товстої кишки людини); антиоксидантна активність; металохелатуюча активність	Shunmugam та ін., 2021
AgNPs				
<i>Bacillus cereus</i> PGN1	Сферичні, 4-5 нм	37 °C, 120 год	*	Babu, & Gunasekaran, 2009
<i>Lactobacillus crustorum</i> F11	Сферичні, 5 нм	30 °C, 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> IGMC, <i>Listeria monocytogenes</i> MTCC839, <i>Bacillus cereus</i> CRI; протигрибкова активність щодо <i>Pythium aphanidermatum</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Phytophthora parasitica</i>	Sharma, Sharma, & Kaushal, 2022
<i>Escherichia coli</i> DH5	Сферичні, 10—15 нм	60 °C, 30 хв	*	Gurunathan та ін., 2009
<i>Bacillus cereus</i>	Сферичні, 11—16 нм	22-25 °C (кімнатна), 72—120 год	Антимікробна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> та <i>Staphylococcus aureus</i>	Sunkar, & Nachiyar, 2012
<i>Corynebacterium glutamicum</i>	Сферичні, 15 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Антимікробна активність щодо <i>Escherichia coli</i> MTCC40, <i>Klebsiella pneumonia</i> MTCC3384, <i>Shigella flexneri</i> MTCC1457, <i>Salmonella enterica</i> MTCC3917, <i>Staphylococcus aureus</i> MTCC3160, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> MTCC424, <i>Bacillus flexus</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Gowramma, Keerthi, Rafi, & Rao, 2015
<i>Lactobacillus casei</i> subsp. <i>casei</i>	Сферичні поодинокі (25—50 нм) або в агрегатах (≈ 100 нм)	25 °C, 84 год	*	Korbekandi, Irvani, & Abbasi, 2012
<i>Ureibacillus thermosphaericus</i>	Сферичні, 10—100 нм	80 °C, 24 год	*	Juibari, Abbasalizadeh, Jouzani, & Noruzi, 2011
<i>Staphylococcus aureus</i>	Агломеровані наноструктури, 160—180 нм	22—25 °C (кімнатна), 72 год	Антимікробна активність щодо резистентних до метициліну <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Streptococcus pyogenes</i>	Nanda, & Saravanan, 2009

Продовження таблиці 3

PtNPs				
<i>Desulfovibrio vulgaris</i> DSM 644	**	37 °C, 1 год	Каталітична активність щодо деградації ципрофлоксацину, сульфаметоксазолу, ібупрофену та 17β-естрадіолу	Martins та ін., 2017
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> PUCM 101	Кубоподібні, 2—3 нм	30 °C, 72 год	*	Gaidhani, Yeshvekar, Shedbalkar, Bellare, & Chopade, 2014
<i>Shewanella algae</i> ATCC 51181	Сферичні, еліпсоподібні, ≈ 5 нм	25 °C, 1 год	*	Konishi та ін., 2007
<i>Streptomyces</i> sp.	Сферичні, 20—50 нм	30 °C, 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин MCF-7 (рак молочної залози)	Baskaran та ін., 2017
PdNPs				
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i> NCIMB 8307 та NCIMB 8326, <i>Bacillus benzeovorans</i> NCIMB 12555	Ікосаедри, 1—8 нм	30 °C, 12 год	*	Omajali, Mikheenko, Merroun, Wood, & Macaskie, 2015
<i>Enterococcus faecalis</i> CTCCC M2012445	Сферичні	40 °C, 48 год	*	Cui та ін., 2017
<i>Shewanella loihica</i> PV-4	Сферичні, 2—6 нм	30 °C, 48 год	Каталітична активність щодо деградації барвника метилового оранжевого	Ahmed, Kalathil, Shi, Alharbi, & Wang, 2018
<i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	Сферичні, 1—30 нм	30 °C, 24 год	*	Yang та ін., 2020
RhNPs, RuNPs				
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> SM1	RhNPs (багатокутники, 1—3 нм), RuNPs (сферичні, 3—13 нм)	25 °C, 24 год	*	Srivastava, & Constanti, 2012

Примітка: * — автори не досліджували біологічну активність наночастинок; ** — автори не навели даних щодо форми та розміру наночастинок.

Висновки

Наночастинки благородних металів можна отримати біологічним способом з використанням грибів, дріжджів і бактерій. При цьому для біосинтезу використовують різні варіанти біологічних об'єктів: біомасу, культуральну рідину, біомасу, безклітинний екстракт та лізат, супернатант. Залежно від біологічного об'єкта, його умов культивування, а також параметрів біогенного синтезу можуть формуватися наночастинки різного розміру та форми, що впливатиме на їхні подальші біологічні властивості та можливість використання в різних галузях.

Слід наголосити, що на сьогодні є багато досліджень, що стосуються використання грибів, дріжджів і бактерій для біосинтезу таких благородних металів, як золото та срібло. При цьому дуже мало наукових публікацій щодо можливостей біосинтезу таких благородних металів, як платина, паладій, родій і рутеній з використанням вказаних мікроорганізмів. Що стосується іридію та осмію, то нам не вдалось знайти публікацій щодо можливостей використання грибів, дріжджів і бактерій для їх біосинтезу.

Література

- Abdul-Hadi, S. Y., Owaid, M. N., Rabeea, M. A., Abdul Aziz, A., Jameel, M. S. (2020). Rapid mycosynthesis and characterization of phenols-capped crystal gold nanoparticles from *Ganoderma applanatum*, *Ganodermataceae*. *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 27, 101683. doi: 10.1016/j.bcab.2020.101683.
- Ahmed, E., Kalathil, S., Shi, L., Alharbi, O., Wang, P. (2018). Synthesis of ultra-small platinum, palladium and gold nanoparticles by *Shewanella loihica* PV-4 electrochemically active biofilms and their enhanced catalytic activities. *J. Saudi Chem. Soc.*, 22(8), 919—929. doi: 10.1016/j.jscs.2018.02.002.
- Alamri, S. A., Hashem, M. A., Nafady, N. A., Sayed, M. A., Alshehri, A. A., El-Alshaboury, G. A. (2018). Controllable biogenic synthesis of intracellular silver/silver chloride nanoparticles by *Meyerozyma guilliermondii* KX008616. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 28 (6): 917—930. doi: 10.4014/jmb.1802.02010.
- Babu, M. M. G., Gunasekaran, P. (2009) Production and structural characterization of crystalline silver nanoparticles from *Bacillus cereus* isolate. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 74(1), 191—195. doi: 10.1016/j.colsurfb.2009.07.016.
- Barabadi, H., Honary, S., Ebrahimi, P., Mohammadi, M. A., Alizadeh, A., Naghibi, F. (2014). Microbial mediated preparation, characterization and optimization of gold nanoparticles. *Braz. J. Microbiol.*, 45(4), 1493—1501. doi: 10.1590/S1517-83822014000400046.
- Baskaran, B., Muthukumarasamy, A., Chidambaram, S., Sugumaran, A., Ramachandran, K., Rasu Manimuthu, T. (2017). Cytotoxic potentials of biologically fabricated platinum nanoparticles from *Streptomyces* sp. on MCF-7 breast cancer cells. *IET Nanobiotechnol.*, 11 (3), 241—246. doi:10.1049/iet-nbt.2016.0040.
- Binupriya, A. R., Sathishkumar, M., Yun, S. I. (2010). Myco-crystallization of silver ions to nanosized particles by live and dead cell filtrates of *Aspergillus oryzae* var *viridis* and its bacterial activity toward *Staphylococcus aureus* KCCM 12256. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 852—858. doi: 10.1021/ie9014183.
- Birla, S. S., Gaikwad, S. C., Gade, A. K., Rai, M. K. (2013). Rapid synthesis of silver nanoparticles from *Fusarium oxysporum* by optimizing physiocultural conditions. *Sci. World J.*, 2013. doi: 10.1155/2013/796018.
- Bolbanabad, E. M., Ashengroph, M., Darvishi, F. (2020). Development and evaluation of different strategies for the clean synthesis of silver nanoparticles using *Yarrowia lipolytica* and their antibacterial activity. *Process Biochem.*, 94: 319—328. doi: 10.1016/j.procbio.2020.03.024.

- Borse, V., Kaler, A., Banerjee, U. C. (2015). Microbial synthesis of platinum nanoparticles and evaluation of their anticancer activity. *Int. J. Emerg. Trends Electr. Electron.*, 11, 26—31.
- Castro-Longoria, E., Moreno-Velasquez, S. D., Vilchis-Nestor, A. R., Berumen, E. A., Borja, M. A. (2012). Production of platinum nanoparticles and nanoaggregates using *Neurospora crassa*. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 22(7), 1000—1004. doi: 10.4014/jmb.1110.10085.
- Chen, H., Huang, D., Lin, L., Odoom-Wubah, T., Huang, J., Sun, D., Li, Q. (2014). Facile fabrication of Pd nanoparticle/*Pichia pastoris* catalysts through adsorption–reduction method: a study into effect of chemical pretreatment. *J. Colloid Interface Sci.*, 433, 204–210. doi: 10.1016/j.jcis.2014.07.038.
- Chen, H., Zhou, Z., Chen, W., Xiang, Z., Nie, H., Yu, W. (2021). Construction of stable bio-Pd catalysts for environmental pollutant remediation. *RSC Adv.*, 11(57), 36174—36180. doi: 10.1039/D1RA06465G.
- Costa Silva, L. P., Oliveira, J. P., Keijok, W. J., Silva, A. R., Aguiar, A. R., Guimaraes, M. C. C., ..., Braga F. R. (2017). Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using the cell-free filtrate of nematophagus fungus *Duddingtonia flagans*. *Int. J. Nanomed.*, 12, 6373—6381. doi: 10.2147/IJN.S137703.
- Cui, J., Zhu, N., Kang, N., Ha, C., Shi, C., Wu, P. (2017). Biorecovery mechanism of palladium as nanoparticles by *Enterococcus faecalis*: from biosorption to bioreduction. *Chem. Eng. J.*, 328, 1051—1057.
- Cunha, F. A., da Cunha, M. C. S. O., da Frota, S. M., Mallmann, E. J., Freire, T. M., Costa, L. S., ..., Fachine, P. B. (2018). Biogenic synthesis of multifunctional silver nanoparticles from *Rhodotorula glutinis* and *Rhodotorula mucilaginosa*: antifungal, catalytic and cytotoxicity activities. *World. J. Microbiol. Biotechnol.*, 34, 127. doi: 10.1007/s11274-018-2514-8.
- Du, L., Xian, L., Feng, J. X. (2011). Rapid extra-/intracellular biosynthesis of gold nanoparticles by the fungus *Penicillium* sp. *J. Nanopart. Res.*, 13, 921—930. doi: 10.1007/s11051-010-0165-2.
- Du, L., Xu, Q., Huang, M., Xian, L., Feng, J.-X. (2015). Synthesis of small silver nanoparticles under light radiation by fungus *Penicillium oxalicum* and its application for the catalytic reduction of methylene blue. *Mater. Chem. Phys.*, 160, 40—47. doi: 10.1016/j.matchemphys.2015.04.003.
- Eramabadi, P., Masoudi, M., Makhdoumi, A., and Mashreghi, M. (2020). Microbial cell lysate supernatant (CLS) alteration impact on platinum nanoparticles fabrication, characterization, antioxidant and antibacterial activity. *Mater. Sci. Eng. C.*, 117, 111292. doi: 10.1016/j.msec.2020.111292.
- Gaidhani, S. V., Yeshvekar, R. K., Shedbalkar, U. U., Bellare, J. H., Chopade, B. A. (2014). Bio-reduction of hexachloroplatinic acid to platinum nanoparticles employing *Acinetobacter calcoaceticus*. *Process Biochemistry*, 49(12), 2313—2319. doi: 10.1016/j.procbio.2014.10.002.
- Gayda, G. Z., Demkiv, O. M., Stasyuk, N. Y., Serkiz, R. Y., Lootsik, M. D., Errachid, A., ..., Nisnevitch, M. (2019). Metallic nanoparticles obtained via “green” synthesis as a platform for biosensor construction. *Appl. Sci.*, 9, 720. doi: 10.3390/app9040720.
- Gil Y.-G., Kang S., Chae A., Kim Y.-K., Min D.-H., Jang H. (2018). Synthesis of porous Pd nanoparticles by therapeutic chaga extract for highly efficient tri-modal cancer treatment. *Nanoscale*, 10, 19810—19817. doi: 10.1039/c8nr07172a.
- Gowramma, B., Keerthi, U., Rafi, M., Rao, D. M. (2015). Biogenic silver nanoparticles production and characterization from native stain of *Corynebacterium species* and its antimicrobial activity. *3 Biotech*, 5, 195—201. doi: 10.1007/s13205-014-0210-4.
- Gupta, S., Bector, S. (2013). Biosynthesis of extracellular and intracellular gold nanoparticles by *Aspergillus fumigatus* and *A. flavus*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 103, 1113—1123. doi: 10.1007/s10482-013-9892-6.
- Gurunathan, S., Kalishwaralal, K., Vaidyanathan, R., Venkataraman, D., Pandian, S. R. K., Muniyandi, J., ... Eom, S. H. (2009). Biosynthesis, purification and characterization of silver nanoparticles using *Escherichia coli*. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 74(1), 328—335. doi: 10.1016/j.colsurf.2009.07.048.
- Jain, N., Bhargava, A., Majumdar, S., Tarafdar, J. C., Panwar, J. (2011). Extracellular biosynthesis and characterization of silver nanoparticles using *Aspergillus flavus* NJP08: a mechanism perspective. *Nanoscale*, 3, 635—641. doi: 10.1039/C0NR00656D.

- Jalal, M., Ansari, M. A., Alzohairy, M. A., Ali, S. G., Khan, H. M., Almatroudi, A., Raees, K. (2018). Biosynthesis of silver nanoparticles from oropharyngeal *Candida glabrata* isolates and their antimicrobial activity against clinical strains of bacteria and fungi. *Nanomaterials*, 8(8), 586. doi: 10.3390/nano8080586.
- Ji, Y., Cao, Y., Song, Y. (2019). Green synthesis of gold nanoparticles using a *Cordyceps militaris* extract and their antiproliferative effect in liver cancer cells (HepG2). *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 47(1), 2737—2745. doi: 10.1080/21691401.2019.1629952.
- Joudeh, N., Saragliadis, A., Koster, G., Mikheenko, P., Linke, D. (2022). Synthesis methods and applications of palladium nanoparticles: a review. *Front. Nanotechnol.*, 4, 92. doi: 10.3389/fnano.2022.1062608.
- Juibari, M. M., Abbasalizadeh, S., Jouzani, G. S., Noruzi, M. (2011). Intensified biosynthesis of silver nanoparticles using a native extremophilic *Ureibacillus thermosphaericus* strain. *Materials Letters*, 65(6), 1014—1017. doi: 10.1016/j.matlet.2010.12.056.
- Konishi, Y., Ohno, K., Saitoh, N., Nomura, T., Nagamine, S., Hishida, H., ..., Uruga, T. (2007). Bio-reductive deposition of platinum nanoparticles on the bacterium *Shewanella algae*. *J. Biotechnol.*, 128, 648—653. doi: 10.1016/j.jbiotec.2006.11.014.
- Korbekandi, H., Irvani, S., Abbasi, S. (2012). Optimization of biological synthesis of silver nanoparticles using *Lactobacillus casei* subsp. *casei*. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 87(7), 932—937. doi: 10.1002/jctb.3702.
- Koul, B., Poonia, A. K., Yadav, D., Jin, J.-O. (2021). Microbe-mediated biosynthesis of nanoparticles: applications and future prospects. *Biomolecules*, 11, 886. doi: 10.3390/biom11060886.
- Krishnan, S., Jayakumar, D., Madhyastha, H., Chadha, A. (2021). The complexity of microbial metal nanoparticle synthesis: a study of *Candida parapsilosis* ATCC 7330 mediated gold nanoparticles formation. *BioNanoScience*, 11, 336—344. doi: 10.1007/s12668-021-00825-6.
- Krishnan, S., Narayan, S., Chadha, A. (2016). Whole resting cells vs. cell free extracts of *Candida parapsilosis* ATCC 7330 for the synthesis of gold nanoparticles. *AMB Express*, 6:92. doi: 10.1186/s13568-016-0268-y.
- Kumar, D., Karthik, L., Kumar, G., Roa, K.B. (2011). Biosynthesis of silver nanoparticles from marine yeast and their antimicrobial activity against multidrug resistant pathogens. *Pharmacology-online*, 3: 1100—1111.
- Liu, X., Chen, J.-L., Yang, W.-Y., Qian, Y.-C., Pan, J.-Y., Zhu, C.-N., ..., Zhang, D.-P. (2021). Biosynthesis of silver nanoparticles with antimicrobial and anticancer properties using two novel yeasts. *Sci. Rep.*, 11: 15795. doi: 10.1038/s41598-021-95262-6.
- Martins, M., Mourato, C., Sanches, S., Noronha, J. P., Crespo, M. T. B., Pereira, I. A. C. (2017). Biogenic platinum and palladium nanoparticles as new catalysts for the removal of pharmaceutical compounds. *Water Res.*, 108, 160—168. doi: 10.1016/j.watres.2016.10.071.
- Mewada, A., Oza, G., Pandey, S., Sharon, M. (2012). Extracellular synthesis of gold nanoparticles using *Pseudomonas denitrificans* and comprehending its stability. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 2(4), 493—499.
- Mishra, A., Tripathy, S. K., Yuna, S. I. (2012). Fungus mediated synthesis of gold nanoparticles and their conjugation with genomic DNA isolated from *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Process. Biochem.*, 47(5), 701—711. doi: 10.1016/j.procbio.2012.01.017.
- Mishra, R. C., Kalra, R., Dilawari, R., Goel, M., Barrow, C. J. (2022). Bio-synthesis of *Aspergillus terreus* mediated gold nanoparticle: antimicrobial, antioxidant, antifungal and in vitro cytotoxicity studies. *Materials*, 15(11), 3877. doi: 10.3390/ma15113877.
- Mohana, S., Sumathi, S. (2020). Multi-functional biological effects of palladium nanoparticles synthesized using *Aqaricus bisporus*. *J. Clust. Sci.*, 31, 391—400. doi: 10.1007/s10876-019-01652-2.
- Nanda, A., Saravanan, M. (2009). Biosynthesis of silver nanoparticles from *Staphylococcus aureus* and its antimicrobial activity against MRSA and MRSE. *Nanomed.: Nanotechnol. Biol. Med.*, 5(4), 452—456. doi: 10.1016/j.nano.2009.01.012.

- Nithya, R., Ragunathan, R. (2009). Synthesis of silver nanoparticle using *Pleurotus sajor caju* and its antimicrobial study. *Digest J. Nanomater. Biostruct.*, 4(4), 623—629.
- Omajali, J. B., Mikheenko, I. P., Merroun, M. L., Wood, J., Macaskie, L. E. (2015). Characterization of intracellular palladium nanoparticles synthesized by *Desulfovibrio desulfuricans* and *Bacillus benzeovorans*. *J. Nanopart. Res.*, 17(6), 264. doi: 10.1007/s11051-015-3067-5.
- Prema, P., Iniya, P. A., Immanuel, G. (2016). Microbial mediated synthesis, characterization, antibacterial and synergistic effect of gold nanoparticles using *Klebsiella pneumoniae* (MTCC-4030). *RSC Advances*, 6(6), 4601—4607. doi: 10.1039/c5ra23982f.
- Qu, Y., You, S., Zhang, X., Pei, X., Shen, W., Li, Z., Li, S. (2018). Biosynthesis of gold nanoparticles using cell-free extracts of *Magnusiomyces ingens* LH-F1 for nitrophenols reduction. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 41: 359—367. doi: 10.1007/s00449-017-1869-9.
- Rahi, D. K., Manhas, L., Kaur, M., Malik, D., Rahi, S. (2018). Extracellular synthesis of silver nanoparticles by an indigenous yeast *Aureobasidium pullulans* RYLF 10: characterization and evaluation of antibacterial potential. *Int. J. Pharm. Biol. Sci.*, 8(3), 312—321.
- Ronavari, A., Igaz, N., Gopisetty, M.K. (2018). Biosynthesized silver and gold nanoparticles are potent antimycotics against opportunistic pathogenic yeasts and dermatophytes. *Int. J. Nanomedicine*, 13: 695—703. doi: 10.2147/IJN.S152010.
- Sarkar, J., Acharya, K. (2017). *Alternaria alternata* culture filtrate mediated bioreduction of chloroplatinate to platinum nanoparticles. *Inorg. Nano Metal. Chem.*, 47(3), 365—369. doi: 10.1080/15533174.2016.1186062.
- Shabbir, M., Mohammad, F. (2018). Multifunctional AgNPs@Wool: colored, UV-protective and antioxidant functional textiles. *Appl. Nanosci.*, 8: 545—555. doi: 10.1007/s13204-018-0668-1.
- Sharma, S., Sharma, N., Kaushal, N. (2022). Comparative account of biogenic synthesis of silver nanoparticles using probiotics and their antimicrobial activity against challenging pathogens. *BioNanoSci.*, 12, 833—840. doi: 10.1007/s12668-022-01004-x.
- Shu, M., He, F., Li, Z., Zhu, X., Ma, Y., Zhou, Z., ..., Zeng M. (2020). Biosynthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles using yeast extract as reducing and capping agents. *Nanoscale Res. Lett.*, 15, 14. doi: 10.1186/s11671-019-3244-z.
- Shunmugam, R., Renukadevi Balusamy, S., Kumar, V., Menon, S., Lakshmi, T., Perumalsamy, H. (2021). Biosynthesis of gold nanoparticles using marine microbe (*Vibrio alginolyticus*) and its anticancer and antioxidant analysis. *J. King Saud Univ. — Sci.*, 33, 101260. doi: 10.1016/j.jksus.2020.101260.
- Skrotska, O., Kharchenko, Y., Laziuka, Y., Marynin, A., Kharchuk, M. (2021). Biosynthesis and characteristics of silver nanoparticles obtained using *Saccharomyces cerevisiae* M437. *Ukrainian Food Journal*, 10(3), 615—631. doi: 10.24263/2304-974X-2021-10-3-14.
- Soliman, H., Elsayed, A., Dyaa, A. (2018). Antimicrobial activity of silver nanoparticles biosynthesized by *Rhodotorula* sp. strain ATL72. *Egypt. J. Basic. Appl. Sci.*, 5(3), 228—233. doi: 10.1016/j.ejbas.2018.05.005.
- Soltani, N. M., Shahidi, B. G. H., Khaleghi, N. (2015). Biosynthesis of gold nanoparticles using *Streptomyces fulvissimus* isolate. *Nanomed. J.*, 2(2), 153—159.
- Srinath, B. S., Ravishankar, R. V. (2015). Rapid biosynthesis of gold nanoparticles by staphylococcus epidermidis: its characterization and catalytic activity. *Mater. Lett.*, 146, 23—25. doi: 10.1016/j.matlet.2015.01.151.
- Sriramulu, M., Sumathi, S. (2018). Biosynthesis of palladium nanoparticles using *Saccharomyces cerevisiae* extract and its photocatalytic degradation behaviour. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, 9(2), 025018. doi: 10.1088/2043-6254/aac506.
- Srivastava, S. K., Constanti, M. (2012). Room temperature biogenic synthesis of multiple nanoparticles (Ag, Pd, Fe, Rh, Ni, Ru, Pt, Co, and Li) by *Pseudomonas aeruginosa* SM1. *J. Nanopart. Res.*, 14, 831. doi: 10.1007/s11051-012-0831-7.
- Srivastava, S. K., Yamada, R., Ogino, C., Kondo, A. (2013). Biogenic synthesis and characterization of gold nanoparticles by *Escherichia coli* K12 and its heterogeneous catalysis in degradation of 4-nitrophenol. *Nanoscale Res. Lett.*, 8(1), 70. doi: 10.1186/1556-276x-8-70.

Subramaniyan, S. A., Sheet, S., Vinothkannan, M., Yoo, D. J., Lee, Y. S., Belal, S. A., Shim, K. S. (2018). One-pot facile synthesis of Pt nanoparticles using cultural filtrate of microgravity simulated grown *P. chrysogenum* and their activity on bacteria and cancer cells. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 18, 3110—3125. doi: 10.1166/jnn.2018.14661.

Sunkar, S., Nachiyar, V. C. (2012). Microbial synthesis and characterization of silver nanoparticles using the endophytic bacterium *Bacillus cereus*: a novel source in the benign synthesis. *Glob J of Med Res.*, 12, 2249—4618.

Syed, A., Ahmad, A. (2012). Extracellular biosynthesis of platinum nanoparticles using the fungus *Fusarium oxysporum*. *Colloids Surf. B Biointerfaces.*, 97, 27—31. doi: 10.1016/j.colsurfb. 2012. 03.026.

Syed, B., Prasad, N. M., Satish, S. (2016). Endogenic mediated synthesis of gold nanoparticles bearing bactericidal activity. *J. Microsc. Ultrastruct.*, 4, 162—166. doi: 10.1016/j.jmau.2016.01.004.

Tahar, I. B., Fickers, P., Dziedzic, A., Ploch, D., Skora, B., Kus-Liskiewicz, M. (2019). Green pyomelanin-mediated synthesis of gold nanoparticles: modelling and design, physico-chemical and biological characteristics. *Microb. Cell. Fact.*, 18, 210. doi: 10.1186/s12934-019-1254-2.

Tarver, S., Gray, D., Loponov, K., Das, D. B., Sun, T., Sotenko, M. (2019). Biomineralization of Pd nanoparticles using *Phanerochaete chrysosporium* as a sustainable approach to turn platinum group metals (PGMs) wastes into catalysts. *Int. Biodeterior. Biodegr.*, 143:104724. doi: 10.1016/j.ibiod.2019.104724.

Vala, A. K. (2015). Exploration on green synthesis of gold nanoparticles by a marine-derived fungus *Aspergillus sydowii*. *Environ. Prog. Sustain. Energy.*, 34(1), 194—197. doi: 10.1002/ep.11949.

Yang, Z., Li, Z., Lu, X., He, F., Zhu, X., Ma, ..., Gao, F. (2017). Controllable biosynthesis and properties of gold nanoplates using yeast extract. *Nanomicro Lett.*, 9(5). doi: 10.1007/s40820-016-0102-8.

Yang, Z.-N., Hou, Y.-N., Zhang, B., Cheng, H.-Y., Yong, Y.-C., Liu, W.-Z., ..., Wang, A.-J. (2020). Insights into palladium nanoparticles produced by *Shewanella oneidensis* MR-1: roles of NADH dehydrogenases and hydrogenases. *Environ. Res.*, 191:110196. doi: 10.1016/j.envres. 2020.110196.

Zhang, X., Qu, Y., Shen, W., Wang, J., Li, H., Zhang, Z., Li, S., Zhou, J. (2016). Biogenic synthesis of gold nanoparticles by yeast *Magnusiomyces ingens* LH-F1 for catalytic reduction of nitrophenols. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 497, 280—285. doi: 10.1016/j.colsurfa. 2016. 02.033.