УДК 579.66:620.3

BIOSYNTHESIS OF SELENIUM NANOPARTICLES USING BACTERIA: CHARACTERISTICS, PROPERTIES AND MECHANISMS

O. Skrotska, M. Protsenko, O. Zholobko
National University of Food Technologies

Key words:
Selenium nanoparticles
Biosynthesis
Biotechnology
Bacteria
Microorganisms

Article history:
Received 15.05.2025
Received in revised form 29.05.2025
Accepted 16.06.2025

Corresponding author:
O. Skrotska
E-mail:
skrotska@ukr.net

Citation: Скроцька О. І., Проценко М. Д., Жолобко О. В. (2025). Біосинтез наночастинок селену при використанні бактерій: характеристика, властивості та механізми. *Наукові праці НУХТ*, 31(3), 88—105. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-3-8

ABSTRACT

Various bacterial genera have been investigated for the biosynthesis of selenium nanoparticles (SeNPs). These include representatives of the genera *Bacillus*, *Lysinibacillus*, *Paenibacillus*, *Halomonas*, *Lactobacillus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus*, *Stenotrophomonas*, *Streptomyces*, among others. Most biosynthesized SeNPs exhibit a spherical morphology, and their sizes vary widely (2—700 nm), depending on the specific biosynthesis conditions and the bacterial strain.

Biosynthesized SeNPs display a broad spectrum of biological activities, which underpins their potential applications in diverse fields. In particular, they exhibit pronounced antimicrobial activity against a range of pathogenic bacteria, including *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Salmonella typhi*, *Pseudomonas aeruginosa*, as well as antifungal activity against *Rhizoctonia solani*, *Candida albicans* та *Aspergillus* spp. Antitumor activity of SeNPs has also been demonstrated *in vitro* using experimental models of various cancers, including breast cancer (MCF-7), colorectal cancer (HT-29), liver cancer (HepG2), and kidney cancer (CAKI-1). Among other biological effects, SeNPs have been reported to stimulate plant growth and suppress the development of phytopathogens, suggesting their potential applications in agrobiotechnology.

The mechanisms underlying the bacterial biosynthesis of SeNPs remain insufficiently understood; however, current research has identified several key stages in this process. The core step involves the biological reduction of selenite or selenate to elemental selenium, a process that can occur both intracellularly and extracellularly. This transformation is mediated by various enzymes and proteins, including oxidoreductases, cytoplasmic and membrane-associated proteins. The stability of biogenic SeNPs is maintained by biomolecules bearing specific functional groups such as amino, carboxyl, hydroxyl, and amide groups. In addition, bacterial proteins, amino acids, polysaccharides, and lipids contribute to the stabilization of nanoparticles by forming a biological coating on the SeNP surface, preventing aggregation and ensuring colloidal stability.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-3-8

БІОСИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК СЕЛЕНУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БАКТЕРІЙ: ХАРАКТЕРИСТИКА, ВЛАСТИВОСТІ ТА МЕХАНІЗМИ

О. І. Скроцька, М. Д. Проценко, О. В. Жолобко
Національний університет харчових технологій

Для біосинтезу наночастинок селену (SeNPs) досліджені різні роди бактерій. До них відносяться представники родів Bacillus, Lysinibacillus, Paenibacillus, Halomonas, Lactobacillus, Pseudomonas, Acinetobacter, Staphylococcus, Stenotrophomonas, Streptomyces та інші. Більшість біосинтезованих SeNPs мають сферичну форму, а їх розміри варіюють у широких межах (2—700 нм) залежно від умов біосинтезу та штаму бактерій.

Біосинтезовані SeNPs демонструють широкий спектр біологічної активності, що обумовлює потенціал їх застосування у різних сферах. Зокрема, вони виявляють виражену антимікробну дію проти ряду патогенних бактерій, включаючи Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Bacillus subtilis, Salmonella typhi, Pseudomonas aeruginosa, а також протигрибкову активність щодо Rhizoctonia solani, Candida albicans та Aspergillus spp. Крім того, SeNPs здатні пригнічувати утворення біоплівок патогенних мікроорганізмів. Також продемонстрована протипухлинна дія SeNPs in vitro на експериментальних моделях різних видів пухлин: раку молочної залози (MCF7), товстої кишки (HT-29), печінки (Hep-G2), нирок (CAKI-1). Серед інших біологічних ефектів варто зазначити здатність SeNPs стимулювати ріст рослин та інгібувати розвиток фітопатогенів, що відкриває перспективи для їх застосування в агробіотехнологіях.

Механізми біосинтезу SeNPs за участі бактерій наразі залишаються недостатньо вивченими, проте на основі сучасних досліджень можна виділити кілька ключових етапів цього процесу. Основу становить біологічне відновлення селеніту або селенату до елементарного селену, що відбувається як внутрішньоклітинно, так і позаклітинно. У цьому процесі беруть участь різні ферменти та білки, зокрема оксидоредуктази, цитоплазматичні та мембранні білки, а також арсенатредуктаза, лігніпероксидаза, NAD(P)-залежна алкогольдегідрогеназа, глутатіонредуктаза, тіоредоксинредуктаза. Стабільність біогенних SeNPs забезпечується за рахунок біомолекул із специфічними функціональними групами, наприклад, амінними, карбоксильними, гідроксильними, амідними. Крім того, важливу роль у стабілізації наночастинок відіграють бактеріальні білки, амінокислоти, полісахариди, ліпіди, які формують біологічну оболонку на поверхні SeNPs, запобігаючи їх агрегації й забезпечуючи колоїдну стабільність.

Ключові слова: *наночастинки селену, біосинтез, біотехнологія, бактерії, мікроорганізми.*

Постановка проблеми. Селен є життєво важливим мікроелементом, який виконує численні біологічні функції в організмі людини, тварин і рослин. У формі наночастинок (SeNPs) він демонструє підвищену біодоступність, стабільність і широкий спектр біологічної активності, включаючи антибактеріальні, протигриб-

кові, антиоксидантні та протипухлинні властивості. Однак традиційні методи отримання SeNPs часто супроводжуються використанням токсичних реагентів і складних фізико-хімічних умов (Qin, Wang, Lai, Liang, & Qian, 2025).

У зв'язку з цим останнім часом зростає інтерес до біологічних методів синтезу наночастинок селену, зокрема за допомогою мікроорганізмів. Бактерії різних родів здатні відновлювати селеніт або селенат до елементарного селену, формуючи стабільні наночастинки. Біосинтез SeNPs за допомогою бактерій вважається екологічно безпечним, економічно доцільним та ефективним способом отримання наноматеріалів з унікальними властивостями (Senthamarai, Hillary, Rajan, & Ceasar, 2024).

Метою дослідження є узагальнення сучасних наукових даних щодо різних родів бактерій, які потенційно можна використовувати для біосинтезу наночастинок селену, умов біосинтезу наночастинок, їх морфологічних характеристик, біологічної активності та можливих механізмів біосинтезу.

Матеріали і методи. У цьому огляді розглянуто наукові дослідження, присвячені використанню різних родів бактерій для біосинтезу наночастинок селену. Під час підготовки огляду було проаналізовано сучасні наукові публікації переважно останнього десятиліття. Основна частина використаних джерел охоплює період 2018—2025 років. Для збору інформації використовувалися провідні наукометричні бази даних, зокрема PubMed та Google Scholar.

Викладення основних результатів дослідження. *Бактерії роду Bacillus*. Бактерії роду *Bacillus*, що були ізольовані з різних джерел (ґрунт, солоні озера, водойми, відходи), можна використовувати для біосинтезу наночастинок селену (табл. 1). Зокрема — це бактерії *Bacillus subtilis* AL43, *Bacillus amyloliquefaciens* SRB04, *Bacillus cereus* AJK3, *Bacillus altitudinis* LH18, *Bacillus megaterium*, *Bacillus niabensis* OAB2, *Bacillus oceanisediminis* D54, *Bacillus paramycoides* SP3, *Bacillus licheniformis* F1, *Bacillus safensis* JG-B5T, *Bacillus paralicheniformis* Y4 та ін. (Abdel-Moneim, 2022; Abdollahnia, 2020; Al-Hagar, 2021; Ashengroph, 2021; Bhattacharjee, 2019; Borah, 2021; Kora, 2018a; Li, 2024; Fischer, 2020; Wang, 2022; Wang, 2024). При цьому можливий як внутрішньоклітинний (цитоплазма, клітинна стінка), так і позаклітинний біосинтез наночастинок (Abdollahnia, 2020; Abdel-Moneim, 2022; Borah, 2021; Wang, 2022). Слід наголосити, що під час цього процесу ключову роль відіграє оптимізація умов біосинтезу SeNPs: джерела вуглецевого й азотного живлення для культивування бактерій, концентрація попередника, pH, температура, тривалість біосинтезу тощо (Akçay, 2020; Al-Hagar, 2021; Ashengroph, 2021).

Таблиця 1. **Синтез наночастинок селену при використанні бактерій роду *Bacillus***

Бактерії	Параметри біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
Культуральна рідина			
Bacillus subtilis AL43	1 мМ Na_2SeO_3, pH 7,2, 30 °C, 150 об/хв, 24 год	Внутрішньоклітинні сферичні 45—80 нм; ζ-потенціал –22,7 мВ	Abdel-Moneim та ін., 2022
Bacillus oceanisediminis D54	5 мМ Na_2SeO_3, 40 °C, 150 об/хв, 72 год	Внутрішньоклітинні сферичні 25,7—708,1 нм; ζ-потенціал –29,34 мВ	Abdollahnia, Makhdoumi, Mashreghi, & Eshghi, 2020

Продовження таблиці 1

Bacillus subtilis T5	5 мМ Na_2SeO_3, 200 об/хв, 37 °C, 12 год	Внутрішньоклітинні сферичні 100—200 нм; ζ-потенціал –31,1 мВ	Duan та ін., 2022
Bacillus paralicheniformis Y4	50 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, 180 об/хв, 48 год	Позаклітинні сферичні 70—120 нм; ζ-потенціал –35,8 мВ	Wang та ін., 2022
Bacillus cereus AJK3	1,0 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, 24—72 год	Позаклітинні сферичні 50—150 нм; ζ-потенціал –31,1 мВ	Kora, 2018a
Bacillus safensis JG-B5T	2,5 мМ Na_2SeO_3, 30 °C, 120 об/хв, 336 год	Позаклітинні сферичні 85—450 нм; ζ-потенціал –44,2 мВ	Fischer та ін., 2020
Bacillus paramycoides SP3	10 мМ Na_2SeO_3, 30° C, 150 об/хв, 72 год	Позаклітинні сферичні 120—170 нм; ζ-потенціал –29,9 мВ	Borah та ін., 2021
Bacillus subtilis MTCC441	2 мМ Na_2SeO_3, 32 °C, 24 год	Сферичні 334 нм; ζ-потенціал –35,7 мВ	Chandramohan, Sundar, & Muthukumaran, 2018
Bacillus altitudinis LH18	5 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, 180 об/хв	Сферичні 228,5 нм; ζ-потенціал –31,5 мВ	Li та ін., 2024
Bacillus paramycoides 24522	2 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, pH 6, 140 об/хв, 24 год	Сферичні 100—180 нм	Liu та ін., 2023
Bacillus licheniformis F1	5 мМ Na_2SeO_3, 180 об/хв, 37 °C, 36 год	Сферичні 110—170 нм; ζ-потенціал –46,59	Wang та ін., 2024
Bacillus niabensis OAB2	5 мМ Na_2SeO_4, 30 °C, 72 год	Сферичні 200 нм; ζ-потенціал –18,3 мВ	Al-Hagar, Abol-Fotouh, Abdelkhalek, Elsoud, & Sidkey, 2021
Біомаса			
Bacillus amyloliquefaciens SRB04	2 мМ Na_2SeO_3, 60 год	Позаклітинні сферичні 45,4—68,3 нм	Ashengroph & Hosseini, 2021
Bacillus subtilis AS12	5 мМ Na_2SeO_3, 30 °C, 180 об/хв, 72 год	Сферичні 25—85 нм; ζ-потенціал –26,33 мВ	Saad, Sitohy, Sultan-Alolama, El-Tarabily, & El-Saadony, 2022
Супернатант			
Bacillus cereus EKT1	6,4 мМ SeO_2, pH 9, 33 °C, 120 об/хв, 72 год	Позаклітинні сферичні 31—335 нм	Akçay, & Avcı, 2020
Bacillus clausii	0,004 г Na_2SeO_3 на кожні 5 мл, pH 8,3, 150 об/хв, 37 °C, 24 год	Позаклітинні сферичні, 40—150 нм	Al-Shemmary, Malallah, Al-Mashhadi, Jaber, & Shaker, 2022
Bacillus sp. B2	5 мМ Na_2SeO_3, 18—20 °C	Позаклітинні сферичні 20—50 нм	Bharathi та ін., 2020
Bacillus megaterium	1 мМ H_2SeO_3, 25 °C	Сферичні 29,72—74,36 нм	Hashem та ін., 2021
Безклітинний водний екстракт			
Bacillus sp. Q33	5 мМ Na_2SeO_3, 33 °C, 180 об/хв, 48 год	Тетрагональні 218,6 нм; ζ-потенціал –40,9 мВ	Zhang та ін., 2022

Біосинтезовані SeNPs з використанням бактерій роду *Bacillus* здебільшого мають сферичну форму (Li, 2024; Saad, 2022), їх розміри варіюють від 25 до 700 нм залежно від умов біосинтезу (Greeshma, 2019; Abdollahnia, 2020). Ці наночастинки переважно аморфної структури, що підтверджується даними рентгенівської дифракції, а їх стабільність забезпечується білками, амінокислотами, полісахаридами, фенолами, які покривають їх поверхню (Abdel-Moneim та ін., 2022).

Щодо біологічних властивостей біогенних SeNPs, встановлено їх антибактеріальну дію проти *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Salmonella typhi*, протигрибкову активність щодо *Rhizoctonia solani* (Al-Shemmary, 2022; Al-Hagar, 2021; Hashem, 2021). Також досліджено їх антиоксидантну активність, що пов'язана з наявністю на поверхні наночастинок фенольних сполук та інших біомолекул (Abdel-Moneim, 2022; Duan, 2022; Greeshma, 2019; Ullah, 2021). Показано, що біосинтезовані SeNPs з використанням бактерій роду *Bacillus* стимулюють ріст рослин та інгібують розвиток фітопатогенів (Hashem та ін., 2021), а також підвищують активність ферментів травлення у риб (Saad, Sitohy, Sultan-Alolama, El-Tarabily, & El-Saadony, 2022).

Механізми біосинтезу наночастинок селену при використанні бактерій роду *Bacillus* до кінця не досліджені. Одним із можливих механізмів є відновлення селеніту (SeO_3^{2-}) або селенату (SeO_4^{2-}) до елементарного селену (Se^0) через утворення проміжних селенідів, які далі гідролізуються (Borah та ін., 2021). Також у цьому процесі беруть участь оксидоредуктази, цитоплазматичні та мембранні білки (Kora, 2018a). Стабілізація наночастинок можлива за допомогою таких функціональних груп як амінні, карбоксильні, гідроксильні, альдегідні, а також за допомогою екзополісахаридів (Ashengroph, & Hosseini, 2021).

Бактерії родів Lysinibacillus та Paenibacillus. Бактерії роду *Lysinibacillus* відносяться до бактерій родини *Bacillaceae*. Раніше рід *Lysinibacillus* класифікувався як *Bacillus*, але у бактерій роду *Lysinibacillus* до складу клітинної стінки входить пептидоглікан і лізин як діамінокислота. А в типових представників бактерій роду *Bacillus* у складі клітинної стінки міститься діамінопімелінова кислота. Також у бактерій роду *Lysinibacillus* у складі клітинної стінки виявлено аспарагінову, глутамінову кислоти й аланін. Представники бактерій *Paenibacillus* також відносились до роду *Bacillus*, але у 1993 р. на основі філогенетичного аналізу 16S рРНК їх виділили в окремий рід (Jamal, & Ahmad, 2022).

Нині показано, що бактерії родів *Lysinibacillus* та *Paenibacillus* можна використовувати як для внутрішньоклітинного, так і позаклітинного біосинтезу SeNPs (табл. 2). Так, при використанні супернатанту *Lysinibacillus* sp. NOSK були синтезовані наночастинки селену. При цьому автори показали важливість pH для успішної реалізації даного процесу (San Keskin, Akbal Vural, & Abaci, 2020). Штами *Lysinibacillus xylanilyticus* DS3 та *Lysinibacillus macrolides* DS15, що були ізольовані з ґрунтів Китаю, проявили високу толерантність до селеніту (МІК 120 та 220 ммоль/л відповідно) та відновлювали понад 99,9% селеніту за 36 год (Zhang та ін., 2019). При використанні бактерій *Paenibacillus motobuensis* LY5201, що були виділені з ферментованої капусти та *Paenibacillus terreus*, які, у свою чергу, були виділені з гірського ґрунту, також був успішно реалізований біосинтез SeNPs (Long, 2023; Nile, 2023).

Таблиця 2. **Бактерії родів *Lysinibacillus* та *Paenibacillus* для синтезу наночастинок селену**

Бактерії	Параметри біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
Культуральна рідина			
Paenibacillus motobuensis LY5201	5,0 г/л Na_2SeO_3, 37 °C, 200 об/хв, 24 год	Позаклітинні сферичні 100 нм; ζ-потенціал –21,6 мВ	Long та ін., 2023
Paenibacillus terreus	1 мМ Na_2SeO_3, 150 об/хв, 37 °C, 24 год	Сферичні 200 нм; ζ-потенціал –37,44 мВ	Nile та ін., 2023
Lysinibacillus macroides DS15, *Lysinibacillus xylanilyticus* DS3	1 мМ Na_2SeO_3, 35 °C, 180 об/хв, 36 год	Внутрішньоклітинні та позаклітинні сферичні, 80—200 нм	Zhang та ін., 2019
Супернатант			
Lysinibacillus sp. NOSK	1 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, 150 об/хв, 72 год	Сферичні 130 нм; ζ-потенціал –28,8 мВ	San Keskin, Akbal Vural, & Abaci, 2020

Біологічні властивості біосинтезованих за допомогою бактерій роду *Lysinibacillus* та *Paenibacillus* наночастинок селену: антибактеріальна активність проти *Staphylococcus aureus* і *Escherichia*, антибіоплівкова дія щодо патогенного штаму *Pseudomonas aeruginosa*, протикандидозна активність щодо *Candida albicans* (Nile, 2023; San Keskin, 2020). Також показано, що синтезовані з використанням *Lysinibacillus* SeNPs є перспективними для біофортифікації та очищення забруднених середовищ (Zhang та ін., 2019).

Механізми біосинтезу наночастинок селену з використанням бактерій *Lysinibacillus* на сьогодні до кінця не вивчені. Проте показано, що на поверхні SeNPs виявлено такі стабілізуючі біомолекули, як білки, полісахариди, ліпіди. Саме вони і забезпечують колоїдну стабільність біосинтезованих частинок селену (San, 2020; Long, 2023).

Бактерії роду роду Halomonas. Галофільні бактерії, зокрема представники роду *Halomonas*, мають великий потенціал у відновленні селенітів до елементарного селену, що робить їх привабливими об'єктами для біосинтезу SeNPs (табл. 3).

Таблиця 3. **Біосинтез наночастинок селену за допомогою бактерій роду *Halomonas***

Бактерії	Параметри біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
Культуральна рідина			
Halomonas boliviensis H-10	0,5 мМ Na_2SeO_3, 25 °C, 24 год	Внутрішньоклітинні та позаклітинні сферичні, 80—300 нм	Bravo та ін., 2024
Halomonas elongata 10214	8 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, 150 об/хв, 72 год	Сферичні, 30—100 нм	Tabibi, Agaei, Amoozegar, Nazari, & Zolfaghari, 2020
Halomonas elongata IBRC-M 10214	6 мМ Na_2SeO_3, 30 °C, 150 об/хв, 72 год	Внутрішньоклітинні сферичні, 50—100 нм; ζ-потенціал –51,2 мВ	Tabibi, Agaei, Amoozegar, Nazari, & Zolfaghari, 2023

Продовження таблиці 3

Супернатант			
Halomonas elongate	0,8 мг/мл Na_2SeO_3, 30 °C, 140 об/хв, 48 год	Сферичні, 5—25 нм	Safaei та ін., 2022

Синтезовані з використанням бактерій роду *Halomonas* SeNPs мають сферичну морфологію з широким діапазоном розмірів (табл. 3). У випадку з *Halomonas boliviensis* наночастинки накопичувалися як внутрішньо-, так і позаклітинно. SEM-EDS аналіз виявив наявність піків селену, натрію, хлору, вуглецю та кисню, що вказує на взаємодію наночастинок із клітинними ексудатами (Bravo та ін., 2024). Спектроскопія UV-Vis зафіксувала характерні піки поглинання при 267 нм (Safaei та ін., 2022) та 294 нм (Tabibi, Agaei, Amoozegar, Nazari, & Zolfaghari, 2023), що підтверджує формування наночастинок селену.

Біосинтезовані SeNPs мають широкий спектр біологічної активності. Зокрема, виявлено протигрибкову активність проти *Candida albicans* із пригніченням росту понад 70% (Safaei та ін., 2022). Крім того, SeNPs проявляли антибактеріальну дію проти *Staphylococcus aureus* та *Salmonella enterica*, а також антиоксидантний ефект (Tabibi, Agaei, Amoozegar, Nazari, & Zolfaghari, 2020). Важливою є також протиракова активність — наночастинки пригнічували ріст клітин ліній MCF7 (рак молочної залози) та HT-29 (рак товстої кишки), причому ефективність залежала від концентрації (Tabibi, Agaei, Amoozegar, Nazari, & Zolfaghari, 2020).

Процес біосинтезу SeNPs включає біологічне відновлення селеніту до елементарного селену за участі метаболітів *Halomonas*. У синтезі беруть участь білкові компоненти клітинної стінки, що сприяють стабілізації та нуклеації наночастинок (Safaei та ін., 2022). FTIR-аналіз виявив наявність на поверхні біосинтезованих SeNPs гідроксильних, амідних, карбонільних груп, а також біополімерів клітинної стінки, які забезпечують стабільність наночастинок (Tabibi, Agaei, Amoozegar, Nazari, & Zolfaghari, 2023).

Бактерії роду Lactobacillus. Сучасні дослідження все більше зосереджуються на біогенному синтезі наночастинок селену з використанням безпечних та екологічних мікроорганізмів (Stabnikova, Khonkiv, Kovshar, & Stabnikov, 2023). Серед таких мікроорганізмів особливу увагу привертають молочнокислі бактерії, які мають статус GRAS (Generally Recognized As Safe) і широко застосовуються в харчовій та медичній галузях. Їх здатність до відновлення селеніту та формування стабільних SeNPs відкриває перспективи у створенні біосумісних наноматеріалів для медицини та біотехнологій (Ghosh, Sarkar, Kaushik, & Mostafavi, 2022). Одним із перспективних напрямів є використання супернатанту *Lactobacillus acidophilus* для позаклітинного синтезу SeNPs (табл. 4). Максимальне утворення наночастинок відбувалося в супернатанті, отриманому під час логарифмічної фази росту бактерій, а самі наночастинки залишалися стабільними до двох місяців (Alam та ін., 2020). Штам *Lactobacillus acidophilus* DSMZ20079T також продемонстрував здатність відновлювати селеніт натрію до SeNPs за концентрацій до 10 мМ селеніту (El-Mahallawy, Allam, El-Kemary, & Azab, 2023). За використання *Lactobacillus casei* ATCC 393 показано, що SeNPs накопичувалися внутрішньоклітинно під час експоненційної фази росту та вивільнялися на стаціонарній фазі (Xu, Qiao, Guo, Ma, & Cheng, 2018).

Таблиця 4. **Використання бактерій роду *Lactobacillus* для отримання наночастинок селену**

Бактерії	Параметри біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
Культуральна рідина			
Lactobacillus acidophilus DSMZ20079T	9 мМ Na_2SeO_3, 35 °C, 170 об/хв, 48 год	Внутрішньоклітинні сферичні, 8,6—23,2 нм	El-Mahallawy, Allam, El-Kemary, & Azab, 2023
Lactobacillus casei ATCC 393	1,2 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, 24 год	Внутрішньоклітинні сферичні, 50—80 нм	Xu, Qiao, Guo, Ma, & Cheng, 2018
Супернатант			
Lactobacillus acidophilus	15 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, 180 об/хв, 48 год	Сферичні, 2—15 нм	Alam та ін., 2020

SeNPs, що були синтезовані з використанням *Lactobacillus acidophilus*, виявили здатність до деградації біоплівок, пригнічення росту патогенних бактерій, а також активували окислювальні ферменти через генерацію реактивних форм кисню (Alam та ін., 2020). SeNPs проявляли слабку антибактеріальну активність проти *Staphylococcus aureus*, при цьому наночастинки не виявили антимікробної дії проти *Pseudomonas aeruginosa* та *Escherichia coli* (El-Mahallawy, Allam, El-Kemary, & Azab, 2023). SeNPs, отримані за допомогою *Lactobacillus casei*, проявляли антиоксидантну активність, а також здатність до індукції апоптозу в ракових клітинах через окисний стрес і порушення функцій мітохондрій. Вони активували експресію проапоптотичних білків (каспаза-3, p53, bax) і знижували рівень антиапоптотичного білка bcl-2. Також спостерігалося підвищення активності глутатіонпероксидази (GPx), що захищає клітини від пошкоджень вільними радикалами (Xu, Qiao, Guo, Ma, & Cheng, 2018).

Біосинтез SeNPs за участі молочнокислих бактерій включає як позаклітинні, так і внутрішньоклітинні процеси. У випадку з *Lactobacillus acidophilus* важливу роль відіграють білки, що сприяють відновленню селеніту та стабілізації наночастинок (Alam та ін., 2020). FTIR-аналіз підтвердив присутність фенольних сполук і амідних зв'язків, що свідчить про участь білків у стабілізації наночастинок. Аналогічно і у випадку з *Lactobacillus casei* було виявлено функціональні групи, пов'язані з білками й полісахаридами, а також хімічні елементи: вуглець, азот, сірка, фосфор і селен (Xu, Qiao, Guo, Ma, & Cheng, 2018). При використанні *Lactobacillus acidophilus* DSMZ20079T було встановлено, що синтез наночастинок відбувається через взаємодію селеніту з глутатіоном, утворення селенодиглутатіону та його подальше перетворення в елементарний селен. Одержані SeNPs були покриті білками, полісахаридами та ліпідами (El-Mahallawy, Allam, El-Kemary, & Azab, 2023).

Бактерії роду Pseudomonas. При використанні *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 можливий як внутрішньоклітинний біосинтез SeNPs (табл. 5), так і позаклітинний (Shakeri, Zaboli, Fattahi, & Babavalian, 2022). Також показано можливість використання бактерій *Pseudomonas stutzeri* MH191156 для біосинтезу SeNPs (Raj-

kumar, Mvs, Koganti, & Burgula, 2020). Позаклітинний синтез сферичних наночастинок селену досліджений при використанні *Pseudomonas stutzeri* NT-I (Tendenedzai, Brink, & Chirwa, 2021). Наночастинки селену, які були отримані при використанні бактерій роду *Pseudomonas,* характеризуються антимікробною дією щодо *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Candida albicans*, бактерій роду *Bacillus*, *Staphylococcus* (Jassim, & Al-Shibly, 2024). Встановлено протипухлинну дію біосинтезованих SeNPs *in vitro* на моделі раку шийки матки (Rajkumar та ін., 2020).

Таблиця 5. **Синтез наночастинок селену при використанні бактерій родів *Acinetobacter* і *Pseudomonas***

Бактерії	Параметри біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
Культуральна рідина			
Pseudomonas stutzeri MH191156	2 мМ Na_2SeO_3, pH 6,5, 48 год	Сферичні, 75—200 нм; ζ-потенціал –46,2 мВ	Rajkumar, Mvs, Koganti, & Burgula, 2020
Pseudomonas aeruginosa ATCC 9027	5 мМ Na_2SeO_3, 40 °C, 24 год	Внутрішньоклітинні сферичні, 260 нм	Shakeri, Zaboli, Fattahi, & Babavalian, 2022
Біомаса			
Acinetobacter sp. SW30	1,5/3,0 мМ Na_2SeO_3, 30 °C, 180 об/хв, 24 год	Внутрішньоклітинні сферичні або у вигляді стрижнів, 78 нм; ζ-потенціал +10 мВ	Wadhwani та ін., 2017
Acinetobacter sp. SW30	1 мМ Na_2SeO_3, pH 7, 37 °C, 24 год	Сферичні, 100 нм	Wadhwani, Shedbalkar, Singh, & Chopade, 2018
Pseudomonas stutzeri NT-i	0,5, 2, 10 мМ Na_2SeO_3, 35 °C, pH≥7, 120 об/хв, 36 год	Позаклітинні сферичні, 400 нм	Tendenedzai, Brink, & Chirwa, 2021

Бактерії роду Acinetobacter. При використанні *Acinetobacter* sp. SW30 були синтезовані наночастинки селену (табл. 5), при цьому як попередник використовували селеніт натрію, концентрація якого впливала на кінцевий результат біосинтезу наночастинок. Так, при використанні 1,5 мМ селеніту натрію утворювалися сферичні наночастинки, що мали розмір 78 нм, а при використанні вищих концентрацій селеніту натрію формувались стрижневі наноструктури. Крім того, біосинтез SeNPs був реалізований за допомогою лігнінпероксидази *Acinetobacter* sp. SW30. Синтез наночастинок селену розміром 100 нм за допомогою очищеного ферменту відбувався за 10 год при 37 °C (Wadhwani, Shedbalkar, Singh, & Chopade, 2018). В іншому дослідженні показаний біосинтез наночастинок селену за допомогою бактеріоцину *Acinetobacter bumannii* (Salman, Al-Mudallal, & Ahmed, 2025). Із забрудненого Se(IV) ґрунту був виділений штам *Acinetobacter* sp. SX5. Цей штам продемонстрував ефективне відновлення селеніту, продукуючи SeNPs як всередині, так і зовні клітин (Huang та ін., 2025).

Щодо механізмів біосинтезу наночастинок селену при використанні бактерій роду *Acinetobacter* показано, що арсенатредуктаза та лігнінпероксидаза каталізує

відновлення селеніту до наночастинок Se(0), NAD(P)-залежна алкогольдегідрогеназа може каталізувати відновлення Se(IV). Також підтверджено, що аміни та амідні групи білків беруть участь у процесі відновлення іонів селену (Huang, 2025; Wadhwani, 2018; Wadhwani, 2017).

Бактерії роду Staphylococcus. У науковій літературі досить мало інформації щодо біосинтезу SeNPs бактеріями роду *Staphylococcus* (табл. 6). Біосинтез наночастинок селену був досліджений при використанні *Staphylococcus aureus* ATCC 49834 при концентраціях селеніту 0,25—1 мМ, з ефективністю відновлення елементного селену до 85,7% упродовж 72 год (Kora, 2018b). Цікавим є дослідження біосинтезу SeNPs при використанні бактеріоцинів *Staphylococcus warneri* (Fawzi, & Ahmed, 2025).

Таблиця 6. **Синтез наночастинок селену при використанні бактерій родів *Staphylococcus*, *Stenotrophomonas* і *Streptomyces***

Бактерії	Параметри біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
Культуральна рідина			
Staphylococcus aureus	75 мМ Na_2SeO_4, 37 °C, 120 об/хв, 48 год	Сферичні, середній розмір: 119 нм; ζ-потенціал –47,1 мВ	Sahoo, Panigrahi, Jena, Jha, & Arakha, 2023
Staphylococcus aureus	1 М Na_2SeO_3, 37 °C, 150 об/хв, 48 год	Сферичні, 119,59 нм; ζ-потенціал –77,4 мВ	Salimi, Hajarian, Karamisha-bankareh & Soltani, 2024
Stenotrophomonas maltophilia SeITE02	2 мМ Na_2SeO_3, 27 °C, 150 об/хв, 24 год	Сферичні, 170,6 нм; ζ-потенціал –80 мВ	Cremonini та ін., 2016
Stenotrophomonas maltophilia SeITE02	0,5 мМ Na_2SeO_3, 27 °C, 200 об/хв, 24/48 год	Позаклітинні сферичні, 100—300 нм; ζ-потенціал –85 мВ	Lampis та ін., 2017
Stenotrophomonas bentonitica BII-R7	Культуральна рідина, 2 мМ Na_2SeO_3, 28 °C, 144 год	Внутрішньоклітинні та позаклітинні сферичні, 30—200 нм; нанодроти, шестикутники, багатокутники тощо 30—400 нм	Ruiz-Fresneda та ін., 2018
Streptomyces bikiniensis Ess_amA-1	1 мМ SeO_2, 30 °C, 150 об/хв, 48 год	Сферичні, 50—100 нм та стрижнеподібні, 600 нм	Ahmad, Yasser, Sholkamy, Ali, & Mehanni, 2015
Супернатант			
Streptomyces parvulus MAR4	4 мМ Na_2SeO_4, 37 °C, 48 год	Позаклітинні напівсферичні, 39,7—98,1 нм; ζ-потенціал 55,91 мВ	Hassan, Hawwa, Baraka, El-Shora, & Hamed, 2024
Streptomyces griseoruber	1 мМ Na_2SeO_3, 37 °C, 72 год	Позаклітинні сферичні, 100—250 нм	Ranjitha, & Ravishankar, 2018
Біомаса			
Streptomyces sp M10A65	1 мМ Na_2SeO_3, 24—48 год	Позаклітинні сферичні, 20—150 нм	Ramya, Shanmugasundaram, & Balagurunathan, 2020

SeNPs, синтезовані *Staphylococcus aureus*, проявили високу протимікробну активність проти грампозитивних і грамнегативних бактерій. Механізм антибактеріальної дії наночастинок полягає в індукції окислювального стресу, що призводить до руйнування клітинної мембрани, витоку цитоплазми та загибелі бактерій. Також SeNPs призводять до збільшення продукції реактивних форм кисню, що підсилює їх антимікробну дію (Sahoo, Panigrahi, Jena, Jha, & Arakha, 2023).

Механізм біосинтезу SeNPs включає відновлення селеніту бактеріальними ферментами та стабілізацію наночастинок за участі білків та інших біомолекул клітинної стінки (Kora, 2018b). Було встановлено, що амідні, карбонільні, метиленові та карбоксилатні групи беруть участь у процесі біосинтезу SeNPs при використанні бактерій роду *Staphylococcus*, що підтверджує участь білків у формуванні та стабілізації наночастинок (Kora, 2018b; Salimi, 2024).

Бактерії роду Stenotrophomonas. Бактерії *Stenotrophomonas maltophilia* SeITE02 були ізольовані із ризосфери трав'янистої рослини *Astragalus bisulcatus*, що росла на багатому селеном ґрунті. Штам SeITE02 здатен ефективно відновлювати селеніт до елементарного селену (табл. 6), особливо при концентрації 0,5 мМ (до 94% за 72 год). Вищі концентрації селеніту знижують ефективність біосинтезу наночастинок селену (Lampis та ін., 2017). Інший штам — *Stenotrophomonas bentonitica* BII-R7, що був ізольований з іспанських бентонітів, також здатний ефективно відновлювати іони селену. При цьому утворення SeNPs відбувається як внутрішньо-, так і позаклітинно (Ruiz-Fresneda та ін., 2020). Штам BII-R7 є високостійким до селеніту (до 400 мМ) і за його участі синтезуються аморфні SeNPs, які з часом трансформуються у тригональні наноструктури (Ruiz-Fresneda та ін., 2018).

SeNPs, які були синтезовані з використанням бактерій роду *Stenotrophomonas*, виявили високу антимікробну та антибіоплівкову активність щодо штамів *Pseudomonas aeruginosa* (CFC20, CFC21, CFCA) при концентраціях 50—100 мкг/мл. При цьому біогенні SeNPs не токсичні для дендритних клітин та фібробластів. Також показана їх здатність стимулювати продукцію цитокінів (Cremonini та ін., 2016).

Механізм біосинтезу SeNPs при використанні *Stenotrophomonas* включає ферментативне відновлення селеніту до елементарного селену за участі глутатіонредуктази, тіоредоксинредуктази та білків джгутикової системи, що сприяють їх формуванню й кристалізації Se (Ruiz-Fresneda та ін., 2018). Органічні компоненти (білки, ліпіди, вуглеводи), виявлені на поверхні SeNPs, утворюють стабілізуючу оболонку навколо частинок. Ця оболонка відповідає за стабільність і біоактивність SeNPs (Lampis, 2017; Cremonini, 2018).

Бактерії роду Streptomyces. На сьогодні досліджено біосинтез наночастинок селену за допомогою морських актиноміцетів *Streptomyces parvulus* MAR4 (Hassan, Hawwa, Baraka, El-Shora, & Hamed, 2024), *Streptomyces bikiniensis* Ess_amA-1, які були виділені з мурах *Tapinoma simrothi* (Ahmad, Yasser, Sholkamy, Ali, & Mehanni, 2015), екстремофільних *Streptomyces* sp. M10A65 (Ramya, Shanmugasundaram, & Balagurunathan, 2020) та інших (табл. 6).

Біосинтезовані наночастинки селену з використанням бактерій роду *Streptomyces* показали протипухлинну активність *in vitro* на моделі раку печінки (Hep-G2), молочної залози (MCF-7), товстої кишки (HT-29), нирок (CAKI-1) (Ahmad, 2015;

Ranjitha, 2018; Hassan, 2024). Також встановлена їх антимікробна активність стосовно *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Candida albicans*, *Aspergillus* spp. (Hassan, 2024; Ramya, 2020).

Щодо механізмів біосинтезу SeNPs, показано, що редукція іонів селену відбувається за участі білків та амінокислот (Hassan, Hawwa, Baraka, El-Shora, & Hamed, 2024), зокрема їх SH-група відіграє важливу роль у цьому процесі (Ramya, Shanmugasundaram, & Balagurunathan, 2020). Також показано, що глікозиди, амідні групи, ліганди (Ranjitha, & Ravishankar, 2018), а також глутатіон і інші ферменти (Tan та ін., 2016), що синтезуються бактеріями роду *Streptomyces*, беруть участь у біосинтезі наночастинок селену.

Інші роди бактерій. На сьогодні досліджений біосинтез наночастинок селену з використанням і інших бактерій (табл. 7), зокрема, *Enterococcus* spp. (Tendenedzai, Chirwa, & Brink, 2022), *Lacticaseibacillus paracasei* SCFF20 (Hu та ін., 2023), *Providencia rettgeri* HF16-A (Huang, Wang, Tang, Jia, & Wu, 2021), *Proteus penneri* LAB-1 (Wang, Jiang, & Huang, 2022), *Limosilactobacillus fermentum* ATCC 14931 (Aminisough, Daneshjou, & Khajeh, 2024).

Таблиця 7. **Використання інших родів бактерій для біосинтезу наночастинок селену**

Бактерії	Параметри біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Джерело
Культуральна рідина			
Vibrio natriegens ATCC14048	1 мМ Na_2SeO_3, 30 °С, 24 год	Внутрішньоклітинні та позаклітинні сферичні, 136 нм	Fernández-Llamosas, Castro, Blázquez, Díaz, & Carmona, 2017
Lacticaseibacillus paracasei SCFF20	120 мкг/мл Na_2SeO_3, 37 °С, 180 об/хв, 24 год	Сферичні, 500 нм	Hu та ін., 2023
Providencia rettgeri HF16-A	5 мМ Na_2SeO_3, pH 7,0, 30 °С, 180 об/хв, 24 год	Позаклітинні сферичні, 295,9 нм; ζ-потенціал –23,5 мВ	Huang, Wang, Tang, Jia, & Wu, 2021
Citrobacter fruendii KP6	60 мМ Na_2SeO_3, 150 об/хв, 30 °С, 24 год	Позаклітинні сферичні, 45—70 нм	Samant, Naik, Parulekar, Charya, & Vaigankar, 2018
Proteus penneri LAB-1	2 мМ SeO_3, 30 °С, 150 об/хв, 24 год	Позаклітинні сферичні, 274,9 нм	Wang, Jiang, & Huang, 2022
Супернатант			
Limosilactobacillus fermentum ATCC 14931	0,75 мМ Na_2SeO_3, pH 7,4, 37 °С	Сферичні 92,52 нм; ζ-потенціал –32,2 мВ	Aminisough, Daneshjou, & Khajeh, 2024
Enterococcus spp.	1/3/5 мМ Na_2SeO_3, pH 8,5—9,5, 35 °С; 120 об/хв, 96 год	Сферичні, <200 нм	Tendenedzai, Chirwa, & Brink, 2022
Безклітинний водний екстракт			
Geobacillus sp. ARB04	10 мМ Na_2SeO_3, 24 год	Сферичні, 30—60 нм	Kumar, Prasad, Manjhi, & Prasad, 2020
Alborzia kermanshahica	1 мМ Na_2SeO_3, 32 °С	Сферичні, 30—100 нм	Eydelkhani, Kiabi, & Nowruzi, 2024

Біосинтез SeNPs при використанні *Enterococcus faecalis* досягає свого піку через 24 год при низьких концентраціях селеніту (0,19 мМ), тоді як вищі концентрації селеніту спричиняють токсичні ефекти, зокрема утворення реактивних форм кисню (ROS), які пошкоджують ДНК і знижують виживаність бактерій (Shoeibi, & Mashreghi, 2017). Аналіз відновлення селеніту та утворення SeNPs бактеріями *Enterococcus* spp. проводили у два етапи: біотичний, із використанням біомаси, та абіотичний, після видалення біомаси. Процес відновлення значно активніше відбувався за присутності біомаси, причому швидкість відновлення зростала зі збільшенням початкової концентрації селеніту (Tendenedzai, Chirwa, & Brink, 2022).

При використанні супернатанту *Limosilactobacillus fermentum* ATCC 14931 були синтезовані SeNPs, які характеризувались антиоксидантними властивостями (Aminisough, Daneshjou, & Khajeh, 2024). Також антиоксидантні властивості мають наночастинки селену, що отримані з використанням безклітинного водного екстракту *Geobacillus* sp. (Kumar, Prasad, Manjhi, & Prasad, 2020).

Штам *Providencia rettgeri* HF16-A продемонстрував високу здатність до відновлення селеніту до елементарного селену з досягненням 90% конверсії за 24 год (Huang, Wang, Tang, Jia, & Wu, 2021). При використанні бактерій *Proteus penneri* LAB-1 встановлено можливість 93,27% конверсії після 18 год біосинтезу (Wang, Jiang, & Huang, 2022).

Висновки

Біосинтез наночастинок селену при використанні бактерій є перспективним, екологічно безпечним і ефективним методом одержання наноматеріалів з різною біологічною активністю. Різноманіття бактерій, які можна використовувати для біосинтезу SeNPs, зокрема родів *Bacillus*, *Lactobacillus*, *Halomonas*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus*, *Streptomyces* та інших, дає змогу отримувати наночастинки з різною формою, розмірами та властивостями.

Біосинтезовані SeNPs демонструють широкий спектр біологічної активності: антибактеріальна, протигрибкова, антиоксидантна, протипухлинна активність, а також здатність до стимуляції росту рослин і біофортифікації. Основними механізмами біосинтезу SeNPs з використанням бактерій є ферментативне відновлення селеніту/селенату та стабілізація наночастинок за допомогою білків, полісахаридів, ліпідів та інших біомолекул.

Зважаючи на властивості біогенних SeNPs, які були отримані за допомогою бактерій, можна стверджувати, що вони мають широкий потенціал для подальшого застосування у різних сферах: медицині, агробіотехнологіях, харчовій промисловості та екологічній інженерії.

Література

Abdel-Moneim, A. M. E., El-Saadony, M. T., Shehata, A. M., Saad, A. M., Aldhumri, S. A., Ouda, S. M., & Mesalam, N. M. (2022). Antioxidant and antimicrobial activities of Spirulina platensis extracts and biogenic selenium nanoparticles against selected pathogenic bacteria and fungi. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(2), 1197—1209. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.046.

Abdollahnia, M., Makhdoumi, A., Mashreghi, M., & Eshghi, H. (2020). Exploring the potentials of halophilic prokaryotes from a solar saltern for synthesizing nanoparticles: The case of silver and selenium. *PLoS One*, 15(3), e0229886. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229886.

Ahmad, M. S., Yasser, M. M., Sholkamy, E. N., Ali, A. M., & Mehanni, M. M. (2015). Anticancer activity of biostabilized selenium nanorods synthesized by *Streptomyces bikiniensis* strain Ess_amA-1. *International journal of nanomedicine*, 3389—3401.

Akçay, F. A., & Avcı, A. (2020). Effects of process conditions and yeast extract on the synthesis of selenium nanoparticles by a novel indigenous isolate *Bacillus* sp. EKT1 and characterization of nanoparticles. *Archives of Microbiology*, 202(8), 2233—2243. https://doi.org/10.1007/s00203-020-01942-8.

Al-Hagar, O. E., Abol-Fotouh, D., Abdelkhalek, E. S., Elsoud, M. M. A., & Sidkey, N. M. (2021). *Bacillus niabensis* OAB2: Outstanding bio-factory of selenium nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 273, 125147. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125147.

Al-Shemmary, A. J., Malallah, H. A., Al-Mashhadi, A. R., Jaber, A. H., & Shaker, Z. B. (2022). Biosynthesis of selenium nanoparticles using probiotic *Bacillus clausii* and their antibacterial efficacy against multidrug-resistant bacteria (MDR). *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 1011—1019. https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.S07.142.

Alam, H., Khatoon, N., Khan, M. A., Husain, S. A., Saravanan, M., & Sardar, M. (2020). Synthesis of selenium nanoparticles using probiotic bacteria *Lactobacillus acidophilus* and their enhanced antimicrobial activity against resistant bacteria. *Journal of Cluster Science*, 31, 1003—1011. https://doi.org/10.1007/s10876-019-01705-6.

Aminisough, S. A., Daneshjou, S., & Khajeh, K. (2024). Biosynthesis, characterization, and investigation of cytotoxic activities of selenium nanoparticles utilizing *Limosilactobacillus fermentum*. *Green Processing and Synthesis*, 13(1), 20240030. https://doi.org/10.1515/gps-2024-0030.

Ashengroph, M., & Hosseini, S. R. (2021). A newly isolated *Bacillus amyloliquefaciens* SRB04 for the synthesis of selenium nanoparticles with potential antibacterial properties. *International Microbiology*, 24(1), 103—114. https://doi.org/10.1007/s10123-020-00147-9.

Bharathi, S., Kumaran, S., Suresh, G., Ramesh, M., Thangamani, V., Pugazhvendan, S. R., & Sathiyamurthy, K. (2020). Extracellular synthesis of nanoselenium from fresh water bacteria *Bacillus* sp., and its validation of antibacterial and cytotoxic potential. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 27, 101655. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101655.

Borah, S. N., Goswami, L., Sen, S., Sachan, D., Sarma, H., Montes, M., ..., & Narayan, M. (2021). Selenite bioreduction and biosynthesis of selenium nanoparticles by *Bacillus paramycoides* SP3 isolated from coal mine overburden leachate. *Environmental Pollution*, 285, 117519. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117519.

Bravo, F., Moraga, R., Valenzuela, C., Aguayo, P., Smith, C. T., Contreras, F., ..., & Campos, V. L. (2024). Arsenic biomineralization and selenium nanoparticles biosynthesis by *Halomonas boliviensis* strain H-10 isolated from the high-altitude Salar de Huasco salt flat (Chile). *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103575. https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103575.

Chandramohan, S., Sundar, K., & Muthukumaran, A. (2018). Monodispersed spherical shaped selenium nanoparticles (SeNPs) synthesized by *Bacillus subtilis* and its toxicity evaluation in zebrafish embryos. *Materials Research Express*, 5(2), 025020. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaabeb.

Cremonini, E., Boaretti, M., Vandecandelaere, I., Zonaro, E., Coenye, T., Lleo, M. M., ..., & Vallini, G. (2018). Biogenic selenium nanoparticles synthesized by *Stenotrophomonas maltophilia* Se ITE 02 loose antibacterial and antibiofilm efficacy as a result of the progressive alteration of their organic coating layer. *Microbial biotechnology*, 11(6), 1037—1047. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13260.

Cremonini, E., Zonaro, E., Donini, M., Lampis, S., Boaretti, M., Dusi, S., ..., & Vallini, G. (2016). Biogenic selenium nanoparticles: characterization, antimicrobial activity and effects on human dendritic cells and fibroblasts. *Microbial biotechnology*, 9(6), 758—771. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12374.

Duan, Y., Li, M., Zhang, S., Wang, Y., Deng, J., Wang, Q., ..., & Wang, Z. (2022). Highly efficient biotransformation and production of selenium nanoparticles and polysaccharides using potential probiotic *Bacillus subtilis* T5. *Metabolites*, 12(12), 1204. https://doi.org/10.3390/metabo12121204.

El-Mahallawy, D. S., Allam, N., El-Kemary, M., & Azab, M. (2023). Acceleration and retrieval of selenium nanoparticles synthesized from *Lactobacillus acidophilus*. *Egypt. J. Exp. Biol. (Botany)*, 19(2), 179—179. https://doi.org/10.5455/egyjebb.20231028021003.

Eydelkhani, M., Kiabi, S., & Nowruzi, B. (2024). *In vitro* assessment of the effect of magnetic fields on efficacy of biosynthesized selenium nanoparticles by *Alborzia kermanshahica*. *BMC biotechnology*, 24(1), 27. https://doi.org/10.1186/s12896-024-00855-4.

Fawzi, F. H., & Ahmed, M. E. (2025). Green synthesis and characterization of selenium nanoparticles via *Staphylococcus warneri* approach: antimicrobial and on PhzM Pyocyanin gene expression in *Pseudomonas aeruginosa*. *Plasmonics*, *20*(3), 1455—1471. https://doi.org/10.1007/s11468-024-02378-2.

Fernández-Llamosas, H., Castro, L., Blázquez, M. L., Díaz, E., & Carmona, M. (2017). Speeding up bioproduction of selenium nanoparticles by using *Vibrio natriegens* as microbial factory. *Scientific reports*, 7(1), 16046. https://doi.org/10.1038/s41598-017-16252-1.

Fischer, S., Krause, T., Lederer, F., Merroun, M. L., Shevchenko, A., Hübner, R., ..., & Jain, R. (2020). *Bacillus safensis* JG-B5T affects the fate of selenium by extracellular production of colloidally less stable selenium nanoparticles. *Journal of hazardous materials*, 384, 121146. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121146.

Ghosh, S., Sarkar, B., Kaushik, A., & Mostafavi, E. (2022). Nanobiotechnological prospects of probiotic microflora: Synthesis, mechanism, and applications. *Science of the Total Environment*, 838, 156212. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156212.

Greeshma, B. C., & Mahesh, M. (2019). Biosynthesis of selenium nanoparticles from *Bacillus* species and its applications. *Journal of Applied and Natural Science*, 11(4), 810—815. https://doi.org/10.31018/jans.v11i4.2188.

Hashem, A. H., Abdelaziz, A. M., Askar, A. A., Fouda, H. M., Khalil, A. M., Abd-Elsalam, K. A., & Khaleil, M. M. (2021). *Bacillus megaterium*-mediated synthesis of selenium nanoparticles and their antifungal activity against Rhizoctonia solani in faba bean plants. *Journal of Fungi*, 7(3), 195. https://doi.org/10.3390/jof7030195

Hassan, M. G., Hawwa, M. T., Baraka, D. M., El-Shora, H. M., & Hamed, A. A. (2024). Biogenic selenium nanoparticles and selenium/chitosan-Nanoconjugate biosynthesized by *Streptomyces parvulus* MAR4 with antimicrobial and anticancer potential. *BMC microbiology*, 24(1), 21. https://doi.org/10.1186/s12866-023-03171-7.

Hu, L., Cao, Y., Chen, X., Wang, Z., Xu, T., Xiong, D., & Zhao, Z. (2023). Efficient biosynthesis of selenium nanoparticles using *Lacticaseibacillus paracasei* SCFF20: A potential bio-factory for selenite conversion. *Authorea Preprints*. https://doi.org/10.22541/au.169692166.60329508/v1.

Huang, S. W., Yao, Y. Y., Zhang, H. X., Guo, W. Y., Fang, M. H., Wang, H. B., ..., & Li, M. H. (2025). Novel mechanisms for selenite biotransformation and selenium nanoparticles biogenesis in *Acinetobacter* sp. SX5 isolated from seleniferous soil. *Journal of Hazardous Materials*, 489, 137694. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137694.

Huang, S., Wang, Y., Tang, C., Jia, H., & Wu, L. (2021). Speeding up selenite bioremediation using the highly selenite-tolerant strain *Providencia rettgeri* HF16-A novel mechanism of selenite reduction based on proteomic analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124690. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124690.

Jamal, Q. M. S., & Ahmad, V. (2022). *Lysinibacilli*: A biological factories intended for bio-insecticidal, bio-control, and bioremediation activities. *Journal of Fungi*, 8(12), 1288. https://doi.org/10.3390/jof8121288.

Jassim, T., & Al-Shibly, M. K. A. (2024). Antimicrobial effect of biosynthesis of selenium nanoparticles by *Pseudomonas aeruginosa* on bacteria isolated from wounds and burns. *Wasit Journal for Pure sciences*, 3(1), 143—151. https://doi.org/10.31185/wjps.304.

Kora, A. J. (2018b). Gram+ ve bacterium *Staphylococcus aureus*: a potential source for the green biosynthesis of monodispersed, smaller selenium nanoparticles. *Micro & Nano Letters*, 13(8), 1155—1158. https://doi.org/10.1049/mnl.2017.0822.

Kora, A. J. (2018a). *Bacillus cereus*, selenite-reducing bacterium from contaminated lake of an industrial area: A renewable nanofactory for the synthesis of selenium nanoparticles. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), 1—12. https://doi.org/10.1186/s40643-018-0217-5.

Kumar, A., Prasad, B., Manjhi, J., & Prasad, K. S. (2020). Antioxidant activity of selenium nanoparticles biosynthesized using a cell-free extract of *Geobacillus*. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 102(10), 556—567. https://doi.org/10.1080/02772248.2020.1829623.

Lampis, S., Zonaro, E., Bertolini, C., Cecconi, D., Monti, F., Micaroni, M., ..., & Vallini, G. (2017). Selenite biotransformation and detoxification by *Stenotrophomonas maltophilia* SeITE02: novel clues on the route to bacterial biogenesis of selenium nanoparticles. *Journal of hazardous materials*, 324, 3—14.

Li, M., Yang, R., Li, N., Zhao, S., Wei, S., Zhang, S., ..., & Cheng, S. (2024). Effect of Different Selenium Species on Indole-3-Acetic Acid Activity of Selenium Nanoparticles Producing Strain *Bacillus altitudinis* LH18. *Molecules*, 29(11), 2463. https://doi.org/10.3390/molecules29112463.

Liu, P., Long, H., Cheng, H., Liang, M., Liu, Z., Han, Z., ..., & He, S. (2023). Highly-efficient synthesis of biogenic selenium nanoparticles by *Bacillus paramycoides* and their antibacterial and antioxidant activities. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1227619. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1227619.

Long, Q., Cui, L. K., He, S. B., Sun, J., Chen, Q. Z., Bao, H. D., ..., & Cui, L. Y. (2023). Preparation, characteristics and cytotoxicity of green synthesized selenium nanoparticles using *Paenibacillus motobuensis* LY5201 isolated from the local specialty food of longevity area. *Scientific Reports*, 13(1), 53. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26396-4.

Nile, S. H., Thombre, D., Shelar, A., Gosavi, K., Sangshetti, J., Zhang, W., ..., & Kai, G. (2023). Antifungal properties of biogenic selenium nanoparticles functionalized with nystatin for the inhibition of *Candida albicans* biofilm formation. *Molecules*, 28(4), 1836. https://doi.org/10.3390/molecules 28041836.

Qin, X., Wang, Z., Lai, J., Liang, Y., & Qian, K. (2025). The Synthesis of Selenium Nanoparticles and Their Applications in Enhancing Plant Stress Resistance: A Review. *Nanomaterials*, 15(4), 301. https://doi.org/10.3390/nano15040301.

Rajkumar, K., Mvs, S., Koganti, S., & Burgula, S. (2020). Selenium nanoparticles synthesized using *Pseudomonas stutzeri* (MH191156) show antiproliferative and anti-angiogenic activity against cervical cancer cells. *International journal of nanomedicine*, 4523—4540. https://doi.org/10.2147/IJN.S247426.

Ramya, S., Shanmugasundaram, T., & Balagurunathan, R. (2020). Actinobacterial enzyme mediated synthesis of selenium nanoparticles for antibacterial, mosquito larvicidal and anthelminthic applications. *Particulate Science and Technology*, 38(1), 63—72. https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1508098.

Ranjitha, V. R., & Ravishankar, V. R. (2018). Extracellular synthesis of selenium nanoparticles from an actinomycetes *Streptomyces griseoruber* and evaluation of its cytotoxicity on HT-29 cell line. *Pharmaceutical nanotechnology*, 6(1), 61—68. https://doi.org/10.2174/2211738505666171113141010.

Ruiz-Fresneda, M. A., Eswayah, A. S., Romero-González, M., Gardiner, P. H., Solari, P. L., & Merroun, M. L. (2020). Chemical and structural characterization of Se IV biotransformations by *Stenotrophomonas bentonitica* into Se0 nanostructures and volatiles Se species. *Environmental Science: Nano*, 7(7), 2140—2155. https://doi.org/10.1039/d0en00507j.

Ruiz-Fresneda, M. A., Martín, J. D., Bolívar, J. G., Cantos, M. V. F., Bosch-Estévez, G., Moreno, M. F. M., & Merroun, M. L. (2018). Green synthesis and biotransformation of amorphous Se nanospheres to trigonal 1D Se nanostructures: impact on Se mobility within the concept of radioactive waste disposal. *Environmental Science: Nano*, 5(9), 2103—2116. https://doi.org/10.1039/c8en00221e.

Saad, A. M., Sitohy, M. Z., Sultan-Alolama, M. I., El-Tarabily, K. A., & El-Saadony, M. T. (2022). Green nanotechnology for controlling bacterial load and heavy metal accumulation in Nile tilapia fish using biological selenium nanoparticles biosynthesized by *Bacillus subtilis* AS12. *Frontiers in microbiology*, 13, 1015613. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1015613.

Safaei, M., Mozaffari, H. R., Moradpoor, H., Imani, M. M., Sharifi, R., & Golshah, A. (2022). Optimization of green synthesis of selenium nanoparticles and evaluation of their antifungal activity against oral *Candida albicans* infection. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 1376998. https://doi.org/10.1155/2022/1376998.

Sahoo, B., Panigrahi, L. L., Jena, S., Jha, S., & Arakha, M. (2023). Oxidative stress generated due to photocatalytic activity of biosynthesized selenium nanoparticles triggers cytoplasmic leakage leading to bacterial cell death. *RSC advances*, 13(17), 11406—11414. https://doi.org/10.1039/d2ra07827a.

Salimi, T., Hajarian, H., Karamishabankareh, H., & Soltani, L. (2024). Effects of sodium selenite, cysteamine, bacterially synthesized Se-NPs, and cysteamine loaded on Se-NPs on ram sperm cryopreservation. *Scientific Reports*, 14(1), 852. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50221-1.

Salman, M. F., Al-Mudallal, N. H., & Ahmed, M. E. (2025). Cytotoxic Effect of Biogenic Selenium Nanoparticles Using Bacteriocin of *Acinetobacter baumannii* Isolated from Burns and Wound Infections. *Iraqi Journal of Science*. https://doi.org/10.24996/ijs.2025.66.4.13.

Samant, S., Naik, M., Parulekar, K., Charya, L., & Vaigankar, D. (2018). Selenium reducing *Citrobacter fruendii* strain KP6 from Mandovi estuary and its potential application in selenium nanoparticle synthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 88, 747—754. https://doi.org/10.1007/s40011-016-0815-y.

San Keskin, N. O., Akbal Vural, O., & Abaci, S. (2020). Biosynthesis of noble selenium nanoparticles from *Lysinibacillus* sp. NOSK for antimicrobial, antibiofilm activity, and biocompatibility. *Geomicrobiology Journal*, 37(10), 919—928. https://doi.org/10.1080/01490451.2020.1799264.

Senthamarai, M. D., Hillary, V. E., Rajan, M. R., & Ceasar, S. A. (2024). Biosynthesis of selenium nanoparticles and its biological applications: A systematic review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 39, 101261. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101261.

Shakeri, F., Zaboli, F., Fattahi, E., & Babavalian, H. (2022). Biosynthesis of selenium nanoparticles and evaluation of its antibacterial activity against *Pseudomonas aeruginosa*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 4118048. https://doi.org/10.1155/2022/4118048.

Shoeibi, S., & Mashreghi, M. (2017). Biosynthesis of selenium nanoparticles using *Enterococcus faecalis* and evaluation of their antibacterial activities. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 39, 135—139. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.09.003.

Stabnikova, O., Khonkiv, M., Kovshar, I., & Stabnikov, V. (2023). Biosynthesis of selenium nanoparticles by lactic acid bacteria and areas of their possible applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(9), 230. https://doi.org/10.1007/s11274-023-03673-6.

Tabibi, M., Agaei, S. S., Amoozegar, M. A., Nazari, R., & Zolfaghari, M. R. (2020). Antibacterial, antioxidant, and anticancer activities of biosynthesized selenium nanoparticles using two indigenous halophilic bacteria. *Archives of Hygiene Sciences*, 9(4), 275—286. https://doi.org/10.52547/ArchHygSci.9.4.275.

Tabibi, M., Aghaei, S., Amoozegar, M. A., Nazari, R., & Zolfaghari, M. R. (2023). Characterization of green synthesized selenium nanoparticles (SeNPs) in two different indigenous halophilic bacteria. *BMC chemistry*, 17(1), 115. https://doi.org/10.1186/s13065-023-01034-w.

Tan, Y., Yao, R., Wang, R., Wang, D., Wang, G., & Zheng, S. (2016). Reduction of selenite to Se (0) nanoparticles by filamentous bacterium *Streptomyces* sp. ES2-5 isolated from a selenium mining soil. *Microbial cell factories*, 15, 1—10. https://doi.org/10.1186/s12934-016-0554-z.

Tendenedzai, J. T., Brink, H. G., & Chirwa, E. M. (2021). Formation of Elemental Selenium Nanoparticles (SeNPs) from the Reduction of Selenite (SeO32-) by a Pure Culture of *Pseudomonas stutzeri* NT-i. *Chemical Engineering Transactions*, 86, 193—198. https://doi.org/10.3303/CET2186033.

Tendenedzai, J. T., Chirwa, E. M., & Brink, H. G. (2022). *Enterococcus* spp. cell-free extract: An abiotic route for synthesis of selenium nanoparticles (SeNPs), their characterisation and inhibition of *Escherichia coli*. *Nanomaterials*, 12(4), 658. https://doi.org/10.3390/nano12040658.

Ullah, A., Yin, X., Wang, F., Xu, B., Mirani, Z. A., Xu, B., ..., & Naveed, M. (2021). Biosynthesis of selenium nanoparticles (via *Bacillus subtilis* BSN313), and their isolation, characterization, and bioactivities. *Molecules*, 26(18), 5559. https://doi.org/10.3390/molecules26185559.

Wadhwani, S. A., Gorain, M., Banerjee, P., Shedbalkar, U. U., Singh, R., Kundu, G. C., & Chopade, B. A. (2017). Green synthesis of selenium nanoparticles using *Acinetobacter* sp. SW30: optimization, characterization and its anticancer activity in breast cancer cells. *International journal of nanomedicine*, 6841—6855. https://doi.org/10.2147/IJN.S139212.

Wadhwani, S. A., Shedbalkar, U. U., Singh, R., & Chopade, B. A. (2018). Biosynthesis of gold and selenium nanoparticles by purified protein from *Acinetobacter* sp. SW 30. *Enzyme and microbial technology*, 111, 81—86. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2017.10.007.

Wang, F., Du, M., Kai, L., Du, S., Hu, W., Wang, Y., & Cheng, Y. (2022). Exopolymer-functionalized nanoselenium from *Bacillus subtilis* SR41: Characterization, monosaccharide analysis and free radical scavenging ability. *Polymers*, 14(17), 3523. https://doi.org/10.3390/polym14173523.

Wang, M., Jiang, D., & Huang, X. (2022). Selenium nanoparticle rapidly synthesized by a novel highly selenite-tolerant strain *Proteus penneri* LAB-1. *Iscience*, 25(9). https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104904.

Wang, Y., Yu, Y., Duan, Y., Wang, Q., Cong, X., He, Y., ..., & Wang, Z. (2022). Enhancing the activity of carboxymethyl cellulase enzyme using highly stable selenium nanoparticles biosynthesized by *Bacillus paralicheniformis* Y4. *Molecules*, 27(14), 4585. https://doi.org/10.3390/molecules27144585.

Wang, Z., Li, N., Zhou, X., Wei, S., Zhu, Y., Li, M., ..., & Cheng, S. (2024). Optimization of fermentation parameters to improve the biosynthesis of selenium nanoparticles by *Bacillus licheniformis* F1 and its comprehensive application. *BMC microbiology*, 24(1), 271. https://doi.org/10.1186/s12866-024-03410-5.

Xu, C., Qiao, L., Guo, Y., Ma, L., & Cheng, Y. (2018). Preparation, characteristics and antioxidant activity of polysaccharides and proteins-capped selenium nanoparticles synthesized by *Lactobacillus casei* ATCC 393. *Carbohydrate polymers*, 195, 576—585. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.110.

Zhang, J., Wang, Y., Shao, Z., Li, J., Zan, S., Zhou, S., & Yang, R. (2019). Two selenium tolerant *Lysinibacillus* sp. strains are capable of reducing selenite to elemental Se efficiently under aerobic conditions. *Journal of environmental sciences*, 77, 238—249. https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.08.002.

Zhang, L., Li, Z., Zhang, L., Lei, Z., Jin, L., Cao, J., & Quan, C. (2022). High-efficiency reducing strain for producing Selenium nanoparticles isolated from Marine Sediment. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 11953. https://doi.org/10.3390/ijms231911953.