

BIOSYNTHESIS OF NOBLE METAL NANOPARTICLES. PART 2. USE OF CYANOBACTERIA AND ALGAE

O. Skrotska, V. Marchenko, R. Koval

National University of Food Technologies

Key words:

Nanoparticles
Noble metals
Biosynthesis
Cyanobacteria
Algae

Article history:

Received 13.07.2023
Received in revised form
28.07.2023
Accepted 14.08.2023

Corresponding author:

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

Citation: O. I. Скроцька, В. В. Марченко, Р. В. Коваль (2023). Біосинтез наночастинок благородних металів. Частина 2. Використання ціанобактерій і водоростей. *Наукові праці НУХТ*, 29(4), 61—85.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-4-7

ABSTRACT

The possibilities of using cyanobacteria and algae for the biosynthesis of gold (AuNPs), silver (AgNPs), platinum (PtNPs), palladium (PdNPs), and ruthenium (RuNPs) nanoparticles were characterized in the article.

Cell-free aqueous extract of cyanobacteria, biomass, culture liquid, supernatant, as well as cellular pigments (phycocyanin, phycoerythrin, allophycocyanin) and polysaccharides are used for the biosynthesis of nanoparticles. Various research showed the possibility of biosynthesis of noble metal nanoparticles using cyanobacteria of the genus *Anabaena*, *Cyanothece*, *Desertifilum*, *Lyngbya*, *Nostoc*, *Plectonema*, *Spirulina*, *Synechocystis*, *Trichodesmium* and others. They can be synthesized using bacterial metabolites — proteins, enzymes, polysaccharides. It was shown that aromatic compounds, alkanes, amines and amides, as well as phenolic compounds can participate in the reduction of metal ions and the biosynthesis of nanoparticles, as well as in their stabilization.

Freshwater and marine algae can be used for the biosynthesis of noble metal nanoparticles. *Acutodesmus dimorphus*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris*, *Caulerpa racemosa*, *Dunaliella salina*, *Sargassum muticum* are among them. At the same time, algae extracts, which contain polysaccharides, phenolic compounds, proteins, vitamins, carotenoids, astaxanthins, polyols, terpenoids and sterols were used. The active groups of these compounds are responsible for the recovery, biosynthesis and stabilization of nanoparticles.

Nanoparticles synthesized using cyanobacteria and algae have antibacterial activity against both gram-negative and gram-positive bacteria. The mechanism of their antimicrobial action is that they can denature surface bacterial proteins and block cellular metabolism and respiration processes due to damage to the electron transport system. The antitumor effect of biogenic nanoparticles using different lines of transplanted cancer cells was shown. At the same time, their non-toxicity in relation to normal cell lines has been proven. The antitumor effect of biosynthesized nanoparticles is related to the fact that they cause cellular and subcellular morphological changes, increase oxidative stress and metabolic toxicity, and induce apoptosis of cancer cells by reducing the expression of antiapoptotic proteins and increasing the expression of apoptotic proteins.

БІОСИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ. ЧАСТИНА 2. ВИКОРИСТАННЯ ЦІАНОБАКТЕРІЙ І ВОДОРОСТЕЙ

О. І. Скроцька, В. В. Марченко, Р. В. Коваль

Національний університет харчових технологій

Наночастинки благородних металів можна отримати з використанням різних методів — фізичних, хімічних і біологічних. У статті охарактеризовано можливості використання ціанобактерій і водоростей для біосинтезу наночастинок золота (AuNPs), срібла (AgNPs), платини (PtNPs), паладію (PdNPs) та рутенію (RuNPs).

Для біосинтезу наночастинок використовують безклітинний водний екстракт ціанобактерій, біомасу, культуральну рідину, супернатант, а також клітинні пігменти (фікоціанін, фікоеритрин, алофікоціанін) та полісахариди. Різними авторами показано можливість біосинтезу наночастинок благородних металів з використанням ціанобактерій роду *Anabaena*, *Cyanothece*, *Desertifilum*, *Lyngbya*, *Nostoc*, *Plectonema*, *Spirulina*, *Synechocystis*, *Trichodesmium* та інших. При цьому можливий як внутрішньоклітинний, так і позаклітинний біосинтез наночастинок, які можуть синтезуватись з використанням бактеріальних метаболітів — білків, ферментів, полісахаридів. Показано, що ароматичні сполуки, алкани, аміни та амідні, а також фенольні сполуки можуть брати участь у відновленні іонів металів і біосинтезі наночастинок, а також у їх стабілізації.

Прісноводні та морські водорості можна використовувати для біосинтезу наночастинок благородних металів. Серед них *Acutodesmus dimorphus*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris*, *Caulerpa racemosa*, *Dunaliella salina*, *Sargassum muticum* та інші. При цьому використовують екстракти водоростей, які містять полісахариди, фенольні сполуки, білки, вітаміни, каротиноїди, атаксантини, поліоли, терпеноїди та стерини. Активні групи цих сполук відповідають за відновлення, біосинтез і стабілізацію наночастинок.

Синтезовані з використанням ціанобактерій і водоростей наночастинки мають антибактеріальну активність щодо грамнегативних і грампозитивних бактерій. Механізм їх антимікробної дії полягає в тому, що вони можуть денатурувати поверхневі бактеріальні білки та блокувати клітинний метаболізм і процеси дихання через пошкодження системи транспорту електронів. Також наночастинки інгібують трансляцію бактеріальних білків. Показано протипухлинну дію біогенних наночастинок з використанням різних ліній перещеплюваних ракових клітин. При цьому доведено їх нетоксичність щодо нормальних ліній клітин. Протипухлинна дія біосинтезованих наночастинок пов'язана з тим, що вони викликають клітинні та субклітинні морфологічні зміни, посилюють окислювальний стрес і метаболічну токсичність та індують апоптоз ракових клітин через зниження експресії антиапоптичних білків і підвищення експресії апоптичних білків.

Ключові слова: наночастинки, благородні метали, біосинтез, ціанобактерії, водорості.

Постановка проблеми. Наночастинки благородних металів (золото, срібло, платина, паладій) привертають увагу науковців завдяки своїм унікальним фізико-хімічним і біологічним властивостям, тому активно досліджуються різні методи їх синтезу — фізичні, хімічні та біологічні. Кожен із цих методів має свої переваги й недоліки (Jamkhande, Ghule, Bamer, & Kalaskar, 2019). При цьому, враховуючи екологічність, біологічні методи синтезу наночастинок є альтернативою хімічним і фізичним методам. При виборі біологічного методу синтезу можливим є використання бактерій, міцеліальних грибів, дріжджів, водоростей, рослин, а також їх метаболітів. Залежно від вибору біологічного об'єкта, його умов культивування, а також параметрів біосинтезу можуть формуватися наночастинки різного розміру та форми, що впливатиме на їхні подальші біологічні властивості та можливість використання у різних галузях (Pareek, 2017; Saravanan, 2021).

Упродовж останніх років активно досліджуються різні способи біосинтезу металевих наночастинок, оскільки вони мають антибактеріальну, протигрибкову, антивірусну, протиракову та каталітичну активність, а також магнітні й оптичні властивості. Однією з найбільш важливих властивостей металевих наночастинок є їхнє велике відношення площі поверхні до об'єму, що збільшує взаємодію наночастинок з іншими молекулами. Враховуючи властивості, якими характеризуються наночастинки благородних металів, можливості їх застосування є досить широкими. Зокрема, їх використовують при створенні електронного обладнання, при розробці біохімічних датчиків, як каталізatori у різних хімічних реакціях, для візуалізації пухлин і доставки ліків, як антимікробні та протипухлинні засобів, у пакувальних матеріалах для запобігання розвитку патогенних мікроорганізмів у харчових продуктах, для біоремедіації ґрунтів тощо (Khan, Saeed, & Khan, 2019).

У попередньому огляді (Скроцька, & Марченко, 2023) ми навели інформацію про використання грибів, дріжджів і бактерій для біосинтезу наночастинок благородних металів, **метою** пропонованого **огляду** є аналіз наукових публікацій щодо можливостей використання ціанобактерій і водоростей для біосинтезу вказаних металевих наночастинок.

Матеріали і методи. При написанні огляду були використані сучасні наукові публікації зарубіжних вчених у міжнародних виданнях. Проаналізовані статті стосуються використання ціанобактерій та морських і прісноводних водоростей для біосинтезу наночастинок благородних металів. Пошук наукових публікацій здійснювали з використанням світових наукометричних баз даних PubMed та Google Scholar.

Викладення основних результатів дослідження. Ціанобактерії для біосинтезу наночастинок. Ціанобактерії отримують необхідну енергію через фотосинтез. Раніше їх називали синьо-зеленими водоростями, але ця назва є невірною, оскільки водорості — це еукаріотичні організми на відміну від бактерій, які є прокаріотами. Для біосинтезу наночастинок золота (AuNPs), срібла (AgNPs), платини (PtNPs) та паладію (PdNPs) використовують безклітинний водний екстракт ціанобактерій (Tomer, 2019; Singh, 2020; Mandhata, 2021; Zaki, 2022), біомасу (Younis, 2022; Fritz, 2023), культуральну рідину (Mohamed, El Semary, & Younis, 2022), супернатант (Patel, 2015; Hanna, 2022), а також клітинні пігменти (El-Naggar, 2017; Ismail, 2021) та полісахариди (El-Hadya, 2014; El-Deeb, 2022). Одним із недоліків використання ціанобактерій для біосинтезу наночастинок є їх досить

тривалий термін культивування — від 13 до 28 діб (Brayner, 2007; El-Naggar, 2017; Hamed, 2019; Hamida, 2020; Ahamad, 2021). Розглянемо можливості використання ціанобактерій для біосинтезу наночастинок благородних металів.

AuNPs. Uma Suganya зі співавтор. для біосинтезу наночастинок золота використали безклітинний водний екстракт *Spirulina platensis*. Було встановлено антибактеріальну активність біогенних AuNPs щодо грампозитивних бактерій (табл. 1). При цьому наночастинок призводили до деформації клітинної стінки бактерій і руйнування їх цитоплазматичної мембрани (Uma Suganya та ін., 2015). Іншими дослідниками показано можливість біосинтезу AuNPs з використанням безклітинного водного екстракту азотфіксуючих ціанобактерій *Anabaena spiroides*. Наночастинок проявили антимікробну дію щодо мультирезистентних грампозитивних і грамнегативних бактерій (Mandhata, Sahoo, Mahanta, & Padhy, 2021).

Досліджено синтез AuNPs з використанням біомаси ниткоподібних ціанобактерій *Lyngbya majuscula* (Bakir, Younis, Mohamed, & El Semaary, 2018), *Anabaena* sp. (Fritz та ін., 2023) та азотфіксуючих кокових ціанобактерій *Cyanothece* sp. (Younis, Bakir, Mohamed, & El Semaary, 2019). При цьому наночастинок синтезувались як всередині клітин, так і зовні. Наприклад, при використанні *L. Majuscula* спостерігали внутрішньоклітинний синтез AuNPs при 48 год біосинтезу та позаклітинний біосинтез після двох місяців біосинтезу (Bakir, Younis, Mohamed, & El Semaary, 2018). Показано можливість біосинтезу наночастинок золота з використанням живих та інактивованих клітин *Anabaena laxa*. Ціанобактерії інактивували автоклавуванням при 126 °C або заморожуванням при мінус 23 °C. При цьому AuNPs після 24 год біосинтезу були у поживному середовищі, а не в самих клітинах, що спрощує їх виділення та очистку (Lenartowicz, Marek, Madura, & Lipok, 2017).

Також AuNPs можна отримати з використанням екзополісахаридів, що були виділені з грамнегативних ціанобактерій *Arthospira platensis* з використанням методу термічного відновлення (El-Deeb та ін., 2022).

Щодо механізмів біосинтезу наночастинок золота з використанням ціанобактерій, то на сьогодні запропоновані різні гіпотези. Зокрема, AuNPs можуть синтезуватись за допомогою метаболітів ціанобактерій. Так білки, а саме їх -COOH, -OH і -NH групи беруть участь у відновленні іонів Au^{3+} до Au^0 , а також стабілізують наночастинок золота (Uma, 2015; Mandhata, 2021). Екзополісахариди, зокрема їх OH-групи сприяють відновленню іонів золота та формуванню наночастинок (Lenartowicz, 2017; El-Deeb, 2022). Також сульфатований ендегенний полісахарид глікоген бере участь у біосинтезі та стабілізації внутрішньоклітинних AuNPs (Younis, Bakir, Mohamed, & El Semaary, 2019). Іншим можливим механізмом може бути те, що електростатичні взаємодії змушують іони золота прикріплюватися до поверхні клітинної стінки ціанобактерій, що призводить до ферментативного відновлення іонів золота, їх агрегації та формування наночастинок (Lengke та ін. 2006).

AgNPs. Досліджено біосинтез наночастинок срібла з використанням біомаси та супернатанту культуральної рідини різних ціанобактерій — *Anabaena* sp. 66-2, *Cylindrospermopsis* sp. USC CRB3, *Lyngbya* sp. 15-2, *Limnothrix* sp. 37-2-1, *Syne-*

chocystis sp. 48-3, *Synechococcus* sp. 145-6 (табл. 1). При цьому AgNPs синтезувались на поверхні бактерій (Patel, Berthold, Puranik, & Gantar, 2015). Younis зі співавтор. також показали можливість біосинтезу наночастинок срібла з використанням біомаси ціанобактерій *Synechocystis* sp., які були виділені з узбережжя Перської затоки у східному регіоні Саудівської Аравії. Біосинтезовані AgNPs знижували синтез прозапальних цитокінів — фактора некрозу пухлин (TNF- α) та інтерлейкінів (IL-1 β , IL-6) у хворих на діабет експериментальних тварин (Younis, Mohamed, & El Semaary, 2022).

Синтез AgNPs з використанням культуральної рідини *Cyanothece* sp. Дослідили Mohamed з колегами. При цьому 56% іонів Ag⁺ відновлювались до Ag⁰ через 72 год біосинтезу. Автори дослідили вплив фітогормонів на біосинтез AgNPs. Додавання у культуральну рідину *Cyanothece* sp. індолоцтової кислоти та кінетину призводило до біоредукції Ag⁺ на рівні 87 та 55% відповідно та формування наночастинок. Гіберелова та абсцизова кислоти не підвищували відсоток відновлених іонів срібла. Найбільший відсоток біоредукції срібла спостерігали при додаванні метилжасмонату, але при цьому ціанобактерії наприкінці процесу біосинтезу втрачали життєздатність (Mohamed, El Semaary, & Younis, 2022).

Є повідомлення про біосинтез наночастинок срібла з використанням супернатанту *Desertifilum tharense* AM5E. Ціанобактерії були виділені з ґрунту. Також авторами показано можливість синтезу AgNPs за допомогою внутрішньоклітинних метаболітів *D. tharense* AM5E (Hanna та ін., 2022).

У науковій літературі є публікації, що стосуються синтезу AgNPs з використанням пігментів ціанобактерій. Так, досліджено біосинтез наночастинок срібла з використанням фікоціаніну, що був виділений із *Limnothrix* sp. 37-2-1 (Patel, Berthold, Puranik, & Gantar, 2015) та ґрунтових ціанобактерій *Nostoc linckia* (El-Naggar, Hussein, & El-Sawah, 2017). Фікоціанін є допоміжним фотосинтетичним пігментом синього кольору, що складається з двох поліпептидних ланцюгів і входить до складу фікобілісом. Ці структури прикріплені до тилакоїдів, які беруть участь у збиранні світла та перенесенні електронів до реакційних центрів фотосистеми II (Patel, Berthold, Puranik, & Gantar, 2015). Також показаний біосинтез наночастинок срібла за допомогою фотосинтетичних пігментів фікобіліпротейнів, до яких відносять фікоціанін, фікоеритрин та алофікоціанін. Фікобіліпротейни, які використали для біосинтезу AgNPs були виділені з ціанобактерій *Spirulina platensis* та *Nostoc linckia*. Слід зазначити, що біосинтезовані з використанням цих пігментів наночастинок срібла мали широкий спектр біологічної дії — антиоксидантну, антибактеріальну, антигрибкову, протипухлинну та протівірусну активність (Ismail, El-Sheekh, Samy, & Gheda, 2021).

Також наночастинок срібла можна отримати з використанням безклітинного водного екстракту ціанобактерій, наприклад, *Leptolyngbya* JSC-1 (Zada та ін., 2018), *Trichodesmium erythraeum* (Sathishkumar та ін., 2019), *Nostoc Bahar M* (Hamida, Albasher, & Bin-Meferij, 2020), *Anabaena variabilis* (Ahamad, Aziz, Zaki, & Fatma, 2021). Tomer зі співавтор. дослідили біосинтез AgNPs з використанням безклітинного водного екстракту *Haloleptolyngbya alcalis* KR2005/106. Автори показали можливість використання розчину AgNPs для швидкого визначення розчинного у воді аміаку. Колір розчину наночастинок змінювався з коричневого на

жовтий упродовж кількох секунд після додавання аміаку, що говорить про формування комплексу срібла з аміаком. При цьому спостерігали зміщення піку поглинання розчину в бік синього діапазону спектра (Tomer, Rahi, Neelam, & Dadheech, 2019).

Біосинтез AgNPs з використанням безклітинного водного екстракту *Nostoc* sp. PCC7524 дослідили Hamed зі співавтор. Біосинтезовані наночастинки срібла проявили протинематодну активність щодо *Meloidogyne javanica* у дослідях *in vitro* та *in vivo*. При цьому AgNPs не мали токсичного впливу на ріс бобових рослин, які були заражені цими нематодами, а навпаки, покращували їх ростові характеристики (Hamed, Hagag, & El-Raouf, 2019).

Наночастинки срібла, які були синтезовані з використанням безклітинного водного екстракту *Leptolyngbya* sp. WUC 59, покращували проростання пшениці та стимулювали ріст проростків порівняно з контролем. Автори припускають, що AgNPs взаємодіють із клітинною стінкою насінневої оболонки та проникають всередину, утворюючи пори, які збільшують ефективність поглинання води зернами пшениці. У свою чергу це може стимулювати більш високу метаболічну активність і гідроліз крохмалю, а отже, утворюється велика кількість доступного цукру в зернах, необхідного для підтримки початкового росту проростків пшениці (Singh, Kaushal, & Sodhi, 2020).

Показано біосинтез AgNPs з використанням безклітинного водного екстракту *Plectonema* sp. NCCU 204. У біосинтезованих наночастинок були виявлені різні біологічні властивості. Вони мали антибактеріальну активність як до грамнегативних, так і грампозитивних бактерій, а також проявили синергічну антимікробну дію разом із антибіотиком стрептоміцином і протигрибковим препаратом флуконазолом. Також ці AgNPs проявили антиоксидантну активність. Як відомо, під час життєдіяльності клітини у ній формуються вільні радикали, які відіграють важливу роль у передачі клітинних сигналів. Проте їх надлишок призводить до різних негативних наслідків і загибелі клітини. Вільні радикали реагують з клітинними компонентами, які викликають рак, катаракту, серцево-судинні захворювання, дисфункцію органів, тому пошук сполук, які проявляють антиоксидантну активність є актуальним і нині. Доведено нетоксичність AgNPs щодо нормальних клітин, зокрема підтверджено їх біосумісність при використанні лінії клітин РВМС (мононуклеарні клітини периферичної крові). Цікавим є те, що видалення білкової оболонки з поверхні наночастинок, призводило до зниження їх біологічної активності (Zaki та ін., 2022).

Hamida зі співавтор. дослідили біосинтез наночастинок срібла з використанням безклітинного водного екстракту ґрунтових ціанобактерій *Desertifilum* IPPAS B-1220. AgNPs характеризувались антибактеріальною дією як до грамнегативних, так і грампозитивних бактерій, а також показали протипухлинну активність (Hamida, Abdelmeguid, Ali, Bin-Meferij & Khalil, 2020). Також біогенні AgNPs характеризувались високою антибактеріальною та антибіоплівковою активністю щодо метицилін-резистентних стафілококів. Це пояснюється тим, що AgNPs індукують утворення активних форм кисню, які в подальшому окислюють нуклеїнові кислоти, ферменти і білки, що призводить до загибелі бактерій (Hamida, Ali, Goda, Khalil, & Al-Zaban, 2020).

Наночастинки срібла, які були отримані з використанням ціанобактерій мають протипухлинну й антимікробну активність (табл. 1). Одним із можливих механізмів протиракової дії AgNPs може бути те, що наночастинки викликають клітинні та субклітинні морфологічні зміни, посилюють окислювальний стрес і метаболічну токсичність та індукують апоптоз ракових клітин через зниження експресії антиапоптичних білків — протеїнкінази В (Akt), фосфорильованої протеїнкінази В (p-Akt), протеїнкінази серин-треонінової специфічності (mTOR), В клітинної лімфоми 2 (Bcl-2) та підвищення експресії апоптичних білків — пухлинного супресора (p53) і каспази-3. Під дією AgNPs у пухлинних клітинах збільшується кількість пероксисом, зростає активність глутатіонпероксидази та понижуються рівні глутатіону. Це, у свою чергу, призводить до зростання рівнів активних форм кисню й окислювального стресу. AgNPs також спричиняють метаболічний стрес у клітинах через зниження рівнів аденозинтрифосфатази (Hamida, Albasher, & Bin-Meferij, 2020). Показано, що наночастинки срібла мають низьку цитотоксичність щодо нормальних клітин. При цьому вони можуть проникати у цитоплазму ракових клітин, що пов'язано з особливостями будови їх цитоплазматичної мембрани та менш компактною клітинною архітектурою (Zada та ін., 2018). Після проникнення в пухлинну клітину AgNPs відбувається вивільнення іонів срібла, які починають взаємодіяти з внутрішньоклітинними білками та ДНК, що призводить до їх руйнування і клітина гине (El-Naggar, Hussein, & El-Sawah, 2017).

Також є різні повідомлення щодо механізмів антимікробної дії наночастинок срібла. Як і в дослідженнях з наночастинами золота (Uma Suganya та ін., 2015), AgNPs призводять до формування проломів у клітинних стінках бактерій і руйнування клітинної мембрани (Zada та ін., 2018). Наночастинки срібла можуть денатурувати поверхневі клітинні білки та блокувати клітинний метаболізм і процеси дихання за рахунок пошкодження системи транспорту електронів (Nisar, Ali, Rahman, Ali, & Shinwari, 2019). Показано, що AgNPs індукують утворення активних форм кисню та інактивують фермент дегідрогеназу (Quinteros, Ariztizabal, Dalmaso, Paraje, & Paez, 2016). Також наночастинки срібла інгібують трансляцію білка в клітині за рахунок взаємодії з бактеріальними рибосомами, що призводить до їх денатурації (Qing та ін., 2018).

Щодо механізмів біосинтезу AgNPs з використанням ціанобактерій, то показано, що ароматичні сполуки, алкани, аміни та амідні групи можуть брати участь у відновленні іонів срібла та біосинтезі наночастинок, а також у їх стабілізації (Mohamed, 2022; Younis, 2022). Є повідомлення, що ферменти та білки, а саме їх гідроксильні, карбонільні, карбоксильні та амідні групи відіграють важливу роль у відновленні іонів срібла та формуванні і стабілізації наночастинок (Hamed, 2019; Ahamad, 2021; Zaki, 2022). Також у біосинтезі AgNPs, крім білків, беруть участь полісахариди (Hamida, 2020; Hanna, 2022), пігменти ціанобактерій (Patel, 2015; El-Naggar, 2017; Ismail, 2021) та фенольні сполуки (Tomer, Rahi, Neelam, & Dadheech, 2019).

PtNPs. На сьогодні в науковій літературі майже відсутня інформація про використання ціанобактерій для біосинтезу наночастинок платини. Нам вдалось знайти лише дві публікації (табл. 1), що стосуються цих досліджень (Lengke, 2006;

Brayner, 2007). Так, досліджено біосинтез PtNPs з використанням біомаси *Plectoneta boryanum* UTEX 485. При цьому автори проводили дослідження без доступу світла і при різних значеннях температури: 25, 60, 80, 100 °C (28 діб) та при 180 °C (1 доба). Встановлено, що іони платини Pt^{4+} проникають всередину клітини і там відновлюються до Pt^{2+} , а потім до Pt^0 . При цьому самі клітини не були життєздатними через високі температурні режими біосинтезу та додавання хлориду платини для біосинтезу наночастинок (Lengke, Fleet, & Southam, 2006).

Показано внутрішньоклітинний синтез наночастинок платини при використанні ціанобактерій *Calothrix pulvinata* ALCP 745A (табл. 1). При цьому синтезовані в середині клітини PtNPs виходять назовні, що спрощує їх виділення та очистку. Було встановлено, що ці наночастинок стабілізуються полісахаридами ціанобактерій. Автори показали, що можливим є і безклітинний біосинтез PtNPs з використанням нітрогенази та полісахаридів ціанобактерій. При цьому не спостерігали синтезу наночастинок, якщо у реакційній суміші була відсутня нітрогеназа. Слід наголосити, що автори також дослідили біосинтез ціанобактеріями наночастинок і інших благородних металів, зокрема золота, срібла і паладію (Brayner та ін., 2007).

PdNPs. Щодо біосинтезу наночастинок паладію, то на сьогодні також є лише поодинокі повідомлення про використання для цього ціанобактерій. Так, Lengke зі співавтор., працюючи із *P. boryanum* UTEX 485 (табл. 1), крім біосинтезу наночастинок платини, дослідили позаклітинний синтез наночастинок паладію при використанні біомаси даних бактерій. При цьому автори досліджували різні температурні параметри біосинтезу: 25, 60 і 100 °C. За усіх досліджуваних температур наночастинок формувались на поверхні клітин (Lengke, Fleet, & Southam, 2007). Досліджено синтез PdNPs з використанням безклітинного водного екстракту грамнегативних ціанобактерій *Spirulina platensis*. Автори показали можливість використання наночастинок для адсорбції свинцю із водних розчинів (Sayadi, Salmani, Heidari, & Rezaei, 2018). Для біосинтезу наночастинок паладію також можна використовувати й екзогенні полісахариди *Nostoc commune*. При такому способі синтезу PdNPs зберігають свою стабільність упродовж 90 діб (El-Hadya, Morsy, & Yakout, 2014).

Таблиця 1. Біосинтез наночастинок благородних металів з використанням ціанобактерій

Ціанобактерії	Характеристика наночастинок		Біологічні властивості наночастинок	Джерело
	форма, розміри	параметри біосинтезу		
AuNPs				
<i>Spirulina platensis</i>	Сферичні, 2—8 нм	22—25 °С (кімнатна), 48 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Uma Suganya та ін., 2015
<i>Anabaena laxa</i>	Сферичні, 3—5 нм	23 °С, 24 год	*	Lenartowicz, Marek, Madura, & Lipok, 2017

<i>Arthospora platensis</i>	Сферичні, 9—30 нм	100 °С, 30 хв	Антимікробна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Candida albicans</i> , <i>Candida tropicalis</i> , <i>Salmonella enterica</i> , <i>Streptococcus mutans</i> ; протипухлинна активність щодо клітин A549 (аденокарцинома легень), CaCo-2 (колоноректальна аденокарцинома) та MCF-7 (аденокарцинома молочної залози)	El-Deeb та ін., 2022
<i>Anabaena</i> sp.	Сферичні, 10—50 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	*	Fritz та ін., 2023
<i>Lynqbya majuscula</i>	Сферичні, середній діаметр 42 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Антиоксидантна активність; протинфарктна дія	Bakir, Younis, Mohamed, & El Semary, 2018
<i>Anabaena spiroides</i>	Сферичні, середній діаметр <80 нм	22—25 °С (кімнатна), 24—56 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Klebsiella oxytoca</i> , <i>Streptococcus pyogenes</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Mandhata, Sahoo, Mahanta, & Padhy, 2021
<i>Cyanothece</i> sp.	Сферичні, 80 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Антиоксидантна активність; протинфарктна дія	Younis, Bakir, Mohamed, & El Semary, 2019
AgNPs				
<i>Plectonema</i> sp. NCCU 204	Сферичні, 2—30 нм	30 °С, 72 год	Протипухлинна активність щодо клітин A549 (карцинома легень); антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> MCC2412, <i>Bacillus cereus</i> MCC 2243, <i>Staphylococcus aureus</i> MCC 2408, <i>Klebsiella pneumoniae</i> KJ 938546; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i> MCC-1151, <i>Candida glabrata</i> MCC-1432; антиоксидантна активність; протизапальна активність	Zaki та ін., 2022
<i>Desertifilum</i> IPPAS B-1220	Сферичні, 4,5—26 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Протипухлинна активність щодо MCF-7 (аденокарцинома молочної залози), CaCo-2 (колоноректальна аденокарцинома), HepG2 (рак печінки); антибактеріальна активність щодо <i>Bacillus cereus</i> ATCC 10876, <i>Bacillus subtilis</i> ATCC 6633, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853, клінічних ізолятів <i>Shigella flexneri</i> та <i>Salmonella enterica</i>	Hamida, Abdelmeguid, Ali, Bin-Meferij, & Khalil, 2020

<i>Leptolyngbya</i> JSC-1	Сферичні, 5—50 нм	22—25 °C (кімнатна), 100 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> ; протипухлинна активність щодо клітин HeLa (рак шийки матки)	Zada та ін., 2018
<i>Desertifilum</i> <i>tharensis</i> AM5E	Сферичні, 6—11 нм	30 °C, 48 год	Антиоксидантна активність; антибактеріальна активність щодо <i>Bacillus cereus</i> ATCC 10876, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 43300, <i>Micrococcus luteus</i> ATCC 10240, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 9027, <i>Salmonella</i> <i>typhimurium</i> ATCC 14028, <i>Escherichia coli</i> O157 : H7	Hanna та ін., 2022
<i>Nostoc</i> sp. PCC7524	Сферичні, 6—16 нм	121 °C, 5 хв	Нематоцидна активність щодо <i>Meloidogyne javanica</i> ; активація росту бобових рослин	Hamed, Hagag, & El- Raouf, 2019
<i>Nostoc</i> Bahar M	Сферичні, 8,5—26 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	<i>Протипухлинна активність щодо</i> MCF-7 (аденокарцинома молочної залози), HepG2 (рак печінки), HCT-116 (колоректальна аденокарцинома)	(Hamida, Albasher, & Bin-Meferij, 2020)
<i>Nostoc linckia</i>	Сферичні, 9—25 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella</i> <i>pneumoniae</i> ; протипухлинна активність <i>in vitro</i> щодо клітин MCF-7 (аденокарцинома молочної залози) та <i>in vivo</i> щодо асцитної карциноми Ерліха; низька активність щодо гемолізу еритроцитів	El-Naggar, Hussein, & El-Sawah, 2017
<i>Anabaena</i> <i>variabilis</i>	Сферичні, 10—15 нм	30 °C, 72 год	Протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i> MCC-1151, <i>Candida glabrata</i> MCC-1432; антибактеріальна активність щодо <i>Pseudomonas aeruginosa</i> MTCC- 2453, <i>Klebsiella pneumoniae</i> KJ938546, <i>Escherichia coli</i> MCC- 2412, <i>Bacillus cereus</i> MCC-2243; антиоксидантна активність; синергізм дії з антибіотиками та протигрибковими препаратами	Ahamad, Aziz, Zaki, & Fatma, 2021
<i>Synechocystis</i> sp.	Сферичні, 10—35 нм	28 °C, 24 год	Ранозагоювальні властивості; антибактеріальна активність щодо резистентних до метициліну бактерій <i>Staphylococcus aureus</i> ; антиоксидантна активність; протизапальна активність	Younis, Mohamed, & El Semary, 2022

<i>Spirulina platensis</i>	Сферичні, 15—27 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Proteus vulgaris</i> <i>Diplococci</i> sp., <i>Staphylococcus aureus</i> ; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i> ; антиоксидантна активність; протипухлинна активність щодо НерG2 (рак печінки); протівірусна активність щодо вірусу гепатиту С (HCV)	Ismail, El-Sheekh, Samy, & Gheda, 2021
<i>Nostoc linckia</i>	Сферичні, 16—26 нм	22—25 °С (кімнатна), 96 год		
<i>Leptolyngbya</i> sp. WUC 59	Сферичні, 20—35 нм	70 °С, 15 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Escherichia coli</i> ; підвищують схожість і проростання зерен пшениці	Singh, Kaushal, & Sodhi, 2020
<i>Haloleptolyngbya alcalis</i> KR2005/106	Сферичні, 30—40 нм	30 °С, 36 год	*	Tomer, Rahi, Neelam, & Dadheech, 2019
<i>Cyanothece</i> sp.	Сферичні, 70—140 нм	22—25 °С (кімнатна), 72 год	*	Mohamed, El Semary, & Younis, 2022
<i>Trichodesmium erythraeum</i>	Кубічні, 21—27 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Антиоксидантна активність; антибактеріальна активність щодо клінічних штамів <i>Vibrio cholerae</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Proteus mirabilis</i> та антибіотикорезистентних штамів <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Streptococcus pneumoniae</i> ; протипухлинна активність щодо MCF-7 (аденокарцинома молочної залози), HeLa (рак шийки матки)	Sathishkumar та ін., 2019
<i>Anabaena</i> sp. 66-2	Різної форми, середній діаметр 24 нм	25 °С, 72 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Patel, Berthold, Puranik, & Gantar, 2015
PtNPs				
<i>Calothrix pulvinata</i> ALCP 745A	Сферичні, 3,2 нм	25 °С, 15 діб	*	Brayner та ін., 2007
<i>Plectonema boryanum</i> UTEX 485	Сферичні, 30 нм — 0,3 мкм	25 °С, 28 діб	*	Lengke, Fleet, & Southam, 2006
PdNPs				
<i>Plectonema boryanum</i> UTEX 485	Сферичні, 1-20 нм	60 °С, 28 діб	*	Lengke, Fleet, & Southam, 2007

<i>Nostoc commune</i>	Сферичні, 5—15 нм	100 °C, 10 хв	*	El-Hadya, Morsyc, & Yakoutd, 2014
<i>Spirulina platensis</i>	Сферичні, 10—20 нм	70 °C, 20 хв	*	Sayadi, Salmani, Heidari, & Rezaei, 2018

Примітка: * — автори не досліджували біологічну активність наночастинок.

Використання водоростей. До водоростей належать багато видів багатоклітинних фотосинтезуючих еукаріотичних організмів, які у своєму складі містять полісахариди, ліпіди та жирні кислоти, білки та пептиди, а також різні мінерали та вітаміни. Усі ці біологічно активні сполуки можуть брати участь у біосинтезі наночастинок металів (Alprol, Mansour, Abdelwahab, & Ashour, 2023). При цьому для біосинтезу наночастинок, зазвичай, використовують екстракти різних водоростей, інформація про які наведена нижче.

AuNPs. На сьогодні є багато досліджень, де прісноводні (Li, 2016; Dahoumane, 2016; Zayadi, 2020) та морські (Abdel-Raouf, 2017; Ramakrishna, 2016; Senthilkumar, 2019) водорості використовуються як біологічні об'єкти для синтезу наночастинок золота. Серед цих водоростей зустрічаються морські червоні водорості *Galaxaura elongata* (Abdel-Raouf, Al-Enazi, & Ibraheem, 2017), *Gelidiella acerosa* (Senthilkumar, Surendran, Sudhagar, & Kumar, 2019), *Halymenia pseudofloresii* (Palaniyandi та ін., 2023), *Hypnea valentine* (Viswanathan та ін., 2023a); морські бурі водорості *Cystoseira baccata* (Gonzalez-Ballesteros, Prado-Lopez, Rodriguez-Gonzalez, Lastra, & Rodriguez-Arguelles, 2017), *Sargassum muticum* (Namvar та ін., 2014), *Turbinaria conoides*, *Sargassum tenerrimum* (Ramakrishna, Rajesh Babu, Gengan, Chandra, & Nageswara Rao, 2016); зелені нитчасті водорості *Pithophora oedogonia* (Li, & Zhang, 2016); мікроводорості *Euglena gracilis* (Dahoumane та ін., 2016), *Chlorella vulgaris* (Zayadi, & Bakar, 2020).

Для біосинтезу наночастинок золота використовують екстракт з подрібнених водоростей, в якому присутні різні біологічно активні сполуки (Namvar та ін., 2014). Доведено, що вони беруть участь у формуванні та стабілізації наночастинок золота (Abdel-Raouf, Al-Enazi, & Ibraheem, 2017). Виявлено феноли та карбонільні молекули, які беруть участь у процесі біосинтезу AuNPs (Viswanathan та ін., 2023a). Крім того, ідентифіковані й інші хімічні сполуки, які відіграють важливу роль у відновленні іонів золота та біосинтезі наночастинок золота: андрографолід, оксид аромадендрену, глутамінова, гексадеканова, олеїнова, 11-ейкозенова, стеаринова та галова кислоти, катехін та ін. (Abdel-Raouf, Al-Enazi, & Ibraheem, 2017). При цьому основними компонентами у складі екстракту бурих водоростей є полісахариди, фенольні сполуки, білки, вітаміни, терпеноїди та стерини (Gonzalez-Ballesteros, Prado-Lopez, Rodriguez-Gonzalez, Lastra, & Rodriguez-Arguelles, 2017). Це свідчить про наявність великої кількості функціональних груп, які відіграють важливу роль у синтезі наночастинок золота. Слід наголосити, що полісахариди, які є у складі водоростей, містять велику кількість гідроксильних груп. Показано, що сполуки, які мають аміно- та гідроксильні функціональні

групи, можуть бути пов'язані з відновленням, а також стабілізацією наночастинок золота (Ramakrishna, Rajesh Babu, Gengan, Chandra, & Nageswara Rao, 2016).

AgNPs. Показано використання зелених мікрроводоростей (Chokshi, 2016; Arya, 2019; Ceroi, 2022; Kumar, 2023; Kumar, 2022), зелених морських водоростей (Aboelfetoh, 2017; Dogmaz, 2023; Kathiraven, 2015), бурих морських водоростей (Deepak, 2018; Fernandes, 2023; Madhiyazhagan, 2015; Gonzalez-Ballesteros, 2020; Bhuyar, 2020), червоних морських водоростей (Fatima, 2020; Viswanathan, 2023b), а також прісноводних зелених водоростей (Rajkumar, Ezhumalai, & Gnanadesigan, 2021) для отримання біогенних наночастинок срібла. Показано можливість використання водоростей *Dunaliella salina* для отримання AgNPs. Зелені одноклітинні мікрроводорості *Dunaliella* містять велику кількість β -каротину і є екстремофільними галофілами, вони можуть рости у водоймах з високою солоністю (Ceroi, Zinicovscaia, Rudi, Chiriac, & Turchenko 2022). Chokshi зі співавтор. для синтезу наночастинок срібла використовували водний екстракт біомаси зелених мікрроводоростей *Acutodesmus dimorphus*, що залишилася після екстракції ліпідів для отримання біопалива. При цьому водорості культивували на середовищі з виробничими стічними водами молочної ферми (Chokshi та ін., 2016). Для біосинтезу наночастинок срібла можна використовувати зелені мікрроводорості *Chlorella minutissima*, які належать до роду *Chlorella* та типу *Chlorophyta*. Вони добре ростуть у широкому діапазоні інтенсивності світла й температури. Залежно від наявності поживних речовин та умов довкілля ці водорості демонструють різні способи харчування, включаючи автотрофний, гетеротрофний і міксотрофний (Kumar, Mohan, Anand, & Bharadvaia, 2023). Є дослідження, де для біосинтезу AgNPs використовують мікрроводорості *Chlorella sorokiniana*. Вони належать до роду *Chlorella*, типу *Chlorophyta*, та можуть рости в широкому діапазоні температур та інтенсивності світла (Kumar, & Bharadvaia, 2022).

Щодо механізмів біосинтезу наночастинок срібла, то відомо, що водорості містять різні біохімічні речовини, такі як каротиноїди, амінокислоти, полісахариди, крохмаль, поліфеноли, вітаміни, мінерали, астаксантини, білки та ферменти. Ці компоненти є відновниками та стабілізаторами під час біосинтезу AgNPs (Kumar, 2023; Kumar, 2022). Під час ідентифікації можливих біомолекул, що відповідають за утворення AgNPs, було встановлено, що карбонільні групи амінокислотних залишків і білків, аміногрупи цистеїнових залишків і сульфатованих полісахаридів зв'язуються з металами. Таке зв'язування утворює шар, що покриває метал у складі наночастинок, що таким чином запобігає агломерації та забезпечує їх стабілізацію. Також повідомлено про участь гідроксильних і карбоксильних груп білків у біосинтезі наночастинок срібла (Chokshi та ін., 2016). Блокуючими агентами для стабілізації AgNPs можуть бути аміни, алкени, спиртові групи або поліфенольні сполуки (Bhuyar та ін., 2020). Є дослідження, де авторами зроблено припущення, що активну роль у процесах відновлення й стабілізації під час біосинтезу наночастинок срібла відіграють полісахариди та поліфенольні сполуки (Gonzalez-Ballesteros та ін., 2020).

Екстракти морських водоростей також містять такі функціональні групи, як амід, амін, алкан, алкен, групи карбонових кислот і метилен, які беруть участь в утворенні наночастинок. Так, показано присутність груп карбонових кислот, алканів та амінів, які можуть бути відповідальними за стабілізацію наночастинок

срібла. Також ці сполуки запобігають їх агломерації (Deepak та ін., 2018). Доведено, що білки, полісахариди, аміді, довголанцюгові жирні кислоти є біомолекулами, які відповідають за біовідновлення іонів срібла та запобігають утворенню агломератів (Arya, 2019; Kathiraven, 2015; Bhuyar, 2020). Показано, що основна роль у формуванні наночастинок срібла належить амінім і аліфатичним алкільним групам. Встановлено, що утворення наночастинок срібла супроводжувалося зниженням вмісту білків, β -каротину та ліпідів у реакційній суміші (Seroi, Zini-covscaia, Rudi, Chiriac, & Turchenko 2022). Є припущення, що функціональні гідроксильні групи поліфенолів і полісахаридів можуть брати участь у відновленні іонів срібла. А білки та сульфогрупи полісахаридів запобігають агломерації наночастинок. При цьому карбонільні групи відіграють роль у відновленні та стабілізації н AgNPs (Fernandes та ін., 2023). Також показано участь сульфатних і гідроксильних груп, які присутні в екстрактах водоростей у процесі відновлення наночастинок срібла (Madhiyazhagan та ін., 2015).

PtNPs. На сьогодні досліджено отримання наночастинок платини за допомогою водоростей (Ramkumar, 2017; Anju, 2020; Sathiyaraj, 2021; Palanisamy, 2023). Так, Ramkumar зі співавтор. використовували морські бурі водорості *Padina gymnospora*, що були зібрані в прибережному районі Манарської затоки на південно-східному узбережжі Індії. Серед макроводоростей цього регіону рід *Padina* є одним з найпоширеніших, тому використовується в багатьох галузях і напрямках досліджень (Ramkumar та ін., 2017). Також для дослідження біосинтезу PtNPs були використані зелені водорості *Botryococcus braunii*, що були зібрані в озері Удайсагар в Індії (Anju, Gupta, & Chundawat 2020). Іншими авторами показаний біосинтез наночастинок платини з використанням червоних водоростей *Halymenia dilatata*, які належать до родини *Halymeniaceae* та здебільшого зустрічаються у прибережних районах азійських країн та на південно-східному узбережжі Індії (Sathiyaraj та ін., 2021).

За відновлення іонів платини та формування наночастинок платини відповідають різноманітні функціональні групи біомолекул, що присутні в екстрактах морських водоростей. Так, біомолекули з алкільними, аліфатичними та фенольними групами беруть участь у біосинтезі PtNPs (Ramkumar та ін., 2017). Також показано, що гідроксильні групи біомолекул екстракту водоростей мають сильну здатність взаємодіяти з наночастинками платини. А білки, полісахариди, аміді та жирні кислоти з довгими ланцюгами відповідальні за біовідновлення іонів платини та діють як блокуючі та стабілізуючі агенти в синтезі наночастинок (Anju, Gupta, & Chundawat 2020). В іншому дослідженні у складі екстракту водоростей були ідентифіковані такі компоненти, як алкалоїди, флавоноїди, дубильні речовини, терпеноїди, стероїди, вуглеводи, глікозиди, амінокислоти та білки, які також можуть бути залучені до процесу біосинтезу PtNPs (Sathiyaraj та ін., 2021).

PdNPs. Для синтезу наночастинок паладію були використані екстракти морських бурих водоростей *Sargassum bovinum* (Momeni, & Nabipour, 2015), а також зелених мікроводоростей *Botryococcus braunii* (Anju, Gupta, & Chundawat 2020) та *Chlorella vulgaris* (Arsiya, Sayadi, & Sobhani, 2017). *Sargassum* — рід бурих морських водоростей, який зустрічається в усіх океанах, і включає приблизно 400 видів. Вони містять у своєму складі близько 200 біоактивних сполук, таких як меротерпеноїди, флоротаніни, фукоїдани, стерини та гліколіпіди. Водорості *Sargassum*

bovinum були зібрані авторами в районі Перської затоки для подальших досліджень щодо біосинтезу PdNPs (Momeni, & Nabipour, 2015).

Водорозчинні сполуки, які присутні в екстрактах морських водоростей, можуть брати участь у відновленні іонів паладію, а також біосинтезі та стабілізації наночастинок паладію. Оскільки різні функціональні групи відіграють вирішальну роль у відновленні іонів металів під час біосинтезу наночастинок, Arsiya зі співавтор. проводили дослідження щодо їх виявлення. Автори встановили, що поліольні та амідні групи можуть брати участь у біосинтезі PdNPs (Arsiya, Sayadi, & Sobhani, 2017). Інші автори показали участь таких біомолекул, як білки, полісахариди, аміди та жирні кислоти у біосинтезі наночастинок паладію (Anju, Gupta, & Chundawat 2020). Саргасові водорості містять у своєму складі терпеноїди, поліоли та полісахариди, які сприяють біовідновленню PdNPs. Momeni та Nabipour встановили наявність сульфатованих полісахаридів під час отримання наночастинок паладію, що вказує на їх участь в цьому процесі. Проте ще невідомо, які саме сполуки відповідають за відновлення та стабілізацію PdNPs (Momeni & Nabipour, 2015).

Наночастинки рутенію (RuNPs). Морські водорості *Dictyota dichotoma* були використані для біосинтезу наночастинок рутенію. Ці водорості виростають близько 1 дм заввишки з вузькими пазухами та поширені на мілководді і на твердих поверхнях. Для синтезу RuNPs автори використовували екстракт водоростей, а сам синтез наночастинок здійснювали за температури 121 °C, використовуючи для цього автоклав. Щодо механізму біосинтезу наночастинок рутенію, то в ході досліджень було підтверджено присутність функціональних груп спиртів, карбонових кислот, складних і простих ефірів, які беруть участь в утворенні RuNPs. Крім того, Ali зі співавтор. зробили припущення, що вказані групи перешкоджають агломерації наночастинок (Ali, Anuradha, Abishek, Yogananth, & Sheeba, 2017).

Узагальнена інформація щодо параметрів біосинтезу та біологічної активності наночастинок благородних металів при використанні для їх біосинтезу водоростей наведена у табл. 2.

Таблиця 2. Можливості використання водоростей для біосинтезу наночастинок благородних металів

Водорості	Характеристика наночастинок		Біологічні властивості наночастинок	Джерело
	форма, розміри	параметри біосинтезу		
AuNPs				
<i>Sargassum muticum</i>	Сферичні, 3—8 нм	45 °С, 1,5 год	*	Namvar та ін., 2014
<i>Sargassum tenerrimum</i>	Сферичні, 5—45 нм	22—25 °С (кімнатна), 60 хв	Каталітична активність щодо відновлення 4-нітрофенолу, п-нітроаніліну, родаміну В, сульфородаміну 101	Ramakrishna, Rajesh Babu, Gengan, Chandra, & Nageswara Rao, 2016

<i>Gelidiella acerosa</i>	Сферичні, 5,81—117,59 нм	22—25 °C (кімнатна), 1 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> MTCC 443, <i>Serratia marcescens</i> MTCC 97, <i>Klebsiella pneumonia</i> MTCC 432, <i>Bacillus subtilis</i> MTCC 441	Senthilkumar, Surendran, Sudhagar, & Kumar, 2019
<i>Cystoseira baccata</i> SG Gmelin	Сферичні, 6,2—10,6 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин HT-29 та Caco-2 (рак товстої кишки)	Gonzalez-Ballesteros, Prado-Lopez, Rodriguez-Gonzalez, Lastra, & Rodriguez-Arguelles, 2017
<i>Chlorella vulgaris</i>	Сферичні, 10,7—18,6 нм	22—25 °C (кімнатна), 3 год	Каталітична активність щодо відновлення 4-нітрофеолу. Антиоксидантна активність щодо 2,2-дифеніл-1-пікрілгідразилу	Zayadi, & Bakar, 2020
<i>Pithophora oedogonia</i>	Сферичні, 20—80 нм	22—25 °C (кімнатна), 1 год	Електрокаталітична активність щодо визначення молекул карбендазіму в ґрунті	Li, & Zhang, 2016
<i>Halymenia pseudofloresii</i>	Кубічні та прямокутні, 27 нм	—	Антиоксидантна активність щодо 2,2-дифеніл-1-пікрілгідразилу. Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> . Протипухлинна активність щодо клітин A549 (рак легень)	Palaniyandi та ін., 2023
<i>Galaxaura elongata</i>	Різної форми (сферичні, стрижневі, трикутні, усічено-трикутні, гексагональні), 3,85—77,13 нм	22—25 °C (кімнатна), 12 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 12498, <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Klebsiella pneumonia</i> ATCC 27738, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853	Abdel-Raouf, Al-Enazi, & Ibraheem, 2017
<i>Euglena gracilis</i> ALCP#217	Різної форми (круглі, трикутні, шестикутні), 10 нм	22—25 °C (кімнатна), 14 днів	*	Dahoumane та ін., 2016
AgNPs				
<i>Acutodesmus dimorphus</i>	Сферичні, 2—20 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Антиоксидантна активність щодо 1,1-дифеніл-2-пікрілгідразилу та 2,2'-азинобіс (3-етил бензтіазолін-6-сульфонової кислоти)	Chokshi та ін., 2016

<i>Caulerpa serrulata</i>	Сферичні, 5—25 нм	95 °С, 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Shigella</i> sp., <i>Salmonella typhi</i> , <i>Escherichia coli</i> . Каталітична активність щодо видалення азобарвника (Конго-червоного)	Aboelfetoh, El-Shenody, & Ghobara, 2017
<i>Dunaliella salina</i>	Сферичні, 15—40 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Антиоксидантна активність щодо 2,2'-азино-біс-(3-етилбензтіозолін-6-сульфокислоти)	Сепі, Zinicovscaia, Rudi, Chiriac, & Turchenko 2022
<i>Cystoseira baccata</i>	Сферичні, 15,5—27,9 нм	100 °С, 30 хв	Антиоксидантна активність щодо 1,1-дифеніл-2-пікрилгідразилу. Антибактеріальна активність щодо <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC, <i>Escherichia coli</i> ATCC 11303, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538	Fernandes та ін., 2023
<i>Cystoseira tamariscifolia</i>	Сферичні, 20,6—23,4 нм			
<i>Sargassum wightii</i>	Сферичні, 18,45—41,59 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Salmonella typhimurium</i> , <i>Shigella flexneri</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> . Антиоксидантна активність щодо 1,1-дифеніл-2-пікрилгідразилу. Ферментінгібуюча активність щодо α -глюкозидази та α -амілази	Deepak та ін., 2018
<i>Padina</i> sp.	Сферичні, овальні, 25—60 нм	60 °С, 48 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bhuyar та ін., 2020
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Сферичні, 28,52–40,35 нм	22—25 °С (кімнатна), 3 дні	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> . Фотокаталітична активність щодо барвників кристалічний фіолетовий, метиленовий синій, еозиновий жовтий Y, родамін В	Kumar, & Bharadvaja, 2022
<i>Sargassum muticum</i>	Сферичні, 35,3—46,7 нм	100 °С, 72 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Staphylococcus saprophyticus</i> , <i>Enterococcus faecalis</i>	Gonzalez-Ballesteros та ін., 2020

<i>Botryococcus braunii</i>	Сферичні, 40—90 нм	22—25 °C (кімнатна), 3 год	Каталітична активність щодо відновлення 2-нітроаніліну	Arya, Mishra, & Chundawat, 2019
<i>Sargassum muticum</i>	Сферичні, 43—79 нм	95 °C, 120 хв	Овоцидна та відлякувальна активність щодо <i>Aedes aegypti</i> , <i>Anopheles stephensi</i> , <i>Culex quinquefasciatus</i> . Антибактеріальна активність щодо <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Salmonella typhi</i>	Madhiyazhagan та ін., 2015
<i>Chlorella vulgaris</i>	Сферичні, 45,39-64,73 нм	22-25 °C (кімнатна), 72 год	Фотокаталітична активність щодо метиленового синього	Rajkumar, Ezhumalai, & Gnanadesigan, 2021
<i>Portieria hornemannii</i>	Сферичні, 70—75 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Vibrio parahaemolyticus</i> , <i>Vibrio vulnificus</i> , <i>Vibrio harveyi</i> , <i>Vibrio anguillarum</i>	Fatima, Priya, Indurthi, Radhakrishnan, & Sudhakaran, 2020
<i>Chlorella minutissima</i>	Сферичні, 73,13 нм	37 °C, 120 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella</i> sp., <i>Klebsiella</i> sp., <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus cereus</i>	Kumar, Mohan, Anand, & Bharadvaja, 2023
<i>Caulerpa racemosa</i>	Трикутні та сферичні, 10 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29123, <i>Proteus mirabilis</i> ATCC 25933	Kathiraven, Sundaramanickam, Shanmugam, & Balasubramanian, 2015
PtNPs				
<i>Caulerpa sertularioides</i>	Сферичні, 6—22 нм	—	Антиоксидантна активність щодо 1,1-дифеніл-2-пікрилгідразилу. Антибактеріальна активність щодо <i>Vibrio parahaemolyticus</i>	Palanisamy та ін., 2023
<i>Halymenia dilatata</i>	Сферичні, 13,3—16,7 нм	60 °C, 1 год	Антиоксидантна активність щодо 1,1-дифеніл-2-пікрилгідразилу. Антибактеріальна активність щодо <i>Streptococcus pneumoniae</i> MTCC 1936, <i>Aeromonas hydrophila</i> ATCC 7966. Протипухлинна активність щодо клітин MDA-MB-231 (рак молочної залози)	Sathiyaraj та ін., 2021

<i>Padina gymnospora</i>	Зрізаний октаедр, 5—50 нм	10—15 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> MTCC 1687, <i>Lactococcus lactis</i> MTCC 440, <i>Klebsiella pneumoniae</i> MTCC 7407. Антиоксидантна активність щодо 1,1-дифеніл-2- пікрилгідразилу	Ramkumar та ін., 2017
<i>Botryococcus braunii</i>	Різної форми (кубічна, сферична, усічено- трикутна), 86,96 нм	95 °C, 4 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Pseudomonas aeruginosa</i> MTCC 441, <i>Escherichia coli</i> MTCC 442, <i>Klebsiella pneumoniae</i> MTCC 109, <i>Staphylococcus aureus</i> MTCC 96. Протигрибкова активність щодо <i>Fusarium oxysporum</i> MTCC 2087. Антиоксидантна активність щодо 1,1-дифеніл-2- пікрилгідразилу	Anju, Gupta, & Chundawat 2020
PdNPs				
<i>Chlorella vulgaris</i>	Сферичні, 5—20 нм	60 °C, 10 хв	*	Arsiya, Sayadi, & Sobhani, 2017
<i>Botryococcus braunii</i>	Різної форми (кубічна, сферична, усічено-три- кутна), 4,89 нм	60 °C, 3 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Pseudomonas aeruginosa</i> MTCC 441, <i>Escherichia coli</i> MTCC 442, <i>Klebsiella pneumoniae</i> MTCC 109, <i>Staphylococcus aureus</i> MTCC 96. Протигрибкова активність щодо <i>Fusarium oxysporum</i> MTCC 2087. Антиоксидантна активність щодо 1,1-дифеніл-2- пікрилгідразилу	Anju, Gupta, & Chundawat 2020
<i>Sargassum bovinum</i>	Октаедрична, 5—10 нм	60 °C, 24 год	Каталітична активність щодо відновлення перекису водню	Momeni, & Nabipour, 2015
RuNPs				
<i>Dictyota dichotoma</i>	Неправильної форми, 25-90 нм	121 °C, 10 хв	Протипухлинна активність щодо клітин HeLa (рак шийки матки), MCF-7 (аденокарцинома молочної залози)	Ali, Anuradha, Abishek, Yogananth, & Sheeba., 2017

Примітка: * — автори не досліджували біологічну активність наночастинок.

Висновки

Для біосинтезу наночастинок благородних металів використовують ціанобактерії та водорості. Якщо біологічним об'єктом для біосинтезу наночастинок обирають ціанобактерії, то можливі різні варіанти їх використання, зокрема у вигляді культуральної рідини, біомаси, супернатанту, безклітинного водного екстракту, а також використовують клітинні пігменти та полісахариди. При використанні водоростей для біосинтезу наночастинок використовують їх екстракти. При цьому бачимо, що застосування різних видів та родів ціанобактерій і водоростей призводить до синтезу наночастинок різної форми та розмірів. Залежно від умов та вибору біологічного об'єкта для біосинтезу отримують наночастинок, які мають різноманітні біологічні властивості — антибактеріальні, протигрибкові, антиракові, протипухлинні, антиоксидантні, протизапальні, каталітичні тощо. Дослідження механізмів біосинтезу наночастинок благородних металів з використанням ціанобактерій і водоростей ще не завершені. Вчені з'ясували, що у відновленні іонів металів, синтезі наночастинок та їх стабілізації беруть участь різні молекули — білки, ферменти, алкани, аміді, аміни, полісахариди, різні органічні кислоти, амінокислоти тощо.

Як і в нашому попередньому огляді (Скροцька, & Марченко, 2023), коли ми аналізували використання грибів, дріжджів та бактерій для біосинтезу благородних металів, так і в цьому, бачимо, що на сьогодні є багато досліджень, що стосуються біосинтезу наночастинок золота та срібла. А от опублікованих праць, що стосуються біосинтезу платини і паладію дуже мало. Щодо наночастинок рутенію, то нам вдалось знайти лише одну публікацію, що стосується використання водоростей для їх біосинтезу. При цьому ми не знайшли досліджень біосинтезу таких благородних металів, як родій, іридій та осмій саме з використанням ціанобактерій і водоростей.

Література

Скροцька О. І., Марченко В. В. Біосинтез наночастинок благородних металів. Частина 1. Використання грибів, дріжджів та бактерій // Наукові праці НУХТ. Т. 29, № 3. 2023. С. 50—72. doi: 10.24263/2225-2924-2023-29-3-6.

Abdel-Raouf, N., Al-Enazi, N. M., Ibraheem, I. B. (2017). Green biosynthesis of gold nanoparticles using *Galaxaura elongata* and characterization of their antibacterial activity. *Arab. J. Chem.*, 10, S3029–S3039. doi: 10.1016/j.arabjc.2013.11.044.

Aboelfetoh, E. F., El-Shenody, R. A., Ghobara, M. M. (2017). Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles using green algae (*Caulerpa serrulata*): reaction optimization, catalytic and antibacterial activities. *Environ. Monit. Assess.*, 189, 1—15. doi: 10.1007/s10661-017-6033-0.

Ahamad, I., Aziz, N., Zaki, A., Fatma, T. (2021). Synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Anabaena variabilis* as a potential antimicrobial agent. *J. Appl. Phycol.*, 33, 829—841. doi: 10.1007/s10811-020-02323-w.

Ali, M. Y. S., Anuradha, V., Abishek, R., Yogananth, N., Sheeba, H. (2017). In vitro anticancer activity of green synthesis ruthenium nanoparticle from *Dictyota dichotoma* marine algae. *Nano World J.*, 3(4), 66—71. doi: 10.17756/nwj.2017-049.

Alprol, A. E., Mansour, A. T., Abdelwahab, A. M., Ashour, M. (2023). Advances in green synthesis of metal oxide nanoparticles by marine algae for wastewater treatment by adsorption and photocatalysis techniques. *Catalysts*, 13, 888. doi: 10.3390/catal13050888.

- Anju, A. R. Y. A., Gupta, K., Chundawat, T. S. (2020). In vitro antimicrobial and antioxidant activity of biogenically synthesized palladium and platinum nanoparticles using *Botryococcus braunii*. *Turk. J. Pharm. Sci.*, 17(3), 299. doi: 10.4274/tjps.galenos.2019.94103.
- Arsiya, F., Sayadi, M. H., Sobhani, S. (2017). Green synthesis of palladium nanoparticles using *Chlorella vulgaris*. *Mater. Lett.*, 186, 113—115. doi: 10.1016/j.matlet.2016.09.101.
- Arya, A., Mishra, V., Chundawat, T. S. (2019). Green synthesis of silver nanoparticles from green algae (*Botryococcus braunii*) and its catalytic behavior for the synthesis of benzimidazoles. *Chem. Data Collect.*, 20, 100190. doi: 10.1016/j.cdc.2019.100190.
- Bakir, E. M., Younis, N. S., Mohamed, M. E., El Semary, N. A. (2018). Cyanobacteria as nanogold factories: chemical and anti-myocardial infarction properties of gold nanoparticles synthesized by *Lyngbya majuscula*. *Mar. Drugs*, 16(6), 217. doi: 10.3390/md16060217.
- Bhuyar, P., Rahim, M. H. A., Sundararaju, S., Ramaraj, R., Maniam, G. P., Govindan, N. (2020). Synthesis of silver nanoparticles using marine macroalgae *Padina* sp. and its antibacterial activity towards pathogenic bacteria. *Beni-Suef Univ. J. Basic. Appl. Sci.*, 9, 3. doi: 10.1186/s43088-019-0031-v.
- Brayner, R., Barberousse, H., Hemadi, M., Djedjat, C., Yepremian, C., Coradin, T., Livage, J., ... Coute, A. (2007). Cyanobacteria as bioreactors for the synthesis of Au, Ag, Pd, and Pt nanoparticles via an enzyme-mediated route. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 7(8), 2696—2708. doi: 10.1166/jnn.2007.600.
- Cepoi, L., Zinicovscaia, I., Rudi, L., Chiriac, T., Turchenko, V. (2022). Changes in the *Dunaliella salina* biomass composition during silver nanoparticles formation. *Nanotechnol. Environ. Eng.*, 7(1), 235—243. doi: 10.1007/s41204-022-00218-4.
- Chokshi, K., Pancha, I., Ghosh, T., Paliwal, C., Maurya, R., Ghosh, A., Mishra, S. (2016). Green synthesis, characterization and antioxidant potential of silver nanoparticles biosynthesized from deoiled biomass of thermotolerant oleaginous microalgae *Acutodesmus dimorphus*. *RSC Adv.*, 6(76), 72269—72274. doi: 10.1039/C6RA15322D.
- Dahoumane, S. A., Yepremian, C., Djedjat, C., Coute, A., Fievet, F., Coradin, T., Brayner, R. (2016). Improvement of kinetics, yield, and colloidal stability of biogenic gold nanoparticles using living cells of *Euglena gracilis* microalga. *J. Nanopart. Res.*, 18, 79. doi: 10.1007/s11051-016-3378-1.
- Deepak, P., Amutha, V., Birundha, R., Sowmiya, R., Kamaraj, C., Balasubramanian, V., ..., Perumal, P. (2018). Facile green synthesis of nanoparticles from brown seaweed *Sargassum wightii* and its biological application potential. *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.*, 9(3), 035019. doi: 10.1088/2043-6254/aadc4a.
- Dogmaz, S., Cavas, L. (2023). Biohydrogen production via green silver nanoparticles synthesized through biomass of *Ulva lactuca* bloom. *Bioresour. Technol.*, 379, 129028. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129028.
- El-Deeb, N. M., Khattab, S. M., Abu-Youssef, M. A., Badr, A. M. (2022). Green synthesis of novel stable biogenic gold nanoparticles for breast cancer therapeutics via the induction of extrinsic and intrinsic pathways. *Sc. Rep.*, 12(1), 11518. doi: 10.1038/s41598-022-15648-y.
- El-Hadya, D. A., Morsyc, F. M., Yakoutd, A. A. (2014). Coparative studies of one-pot green routes by polysaccharides of cyanobacterium *Nostoc commune* and other chemical reductants for preparation of palladium nanoparticles. *Fac. Sci. Alex. Univ. J.*, 49 (1,2), 32—42.
- El-Naggar, N. E., Hussein, M. H., El-Sawah, A. A. (2017). Bio-fabrication of silver nanoparticles by phycoerythrin, characterization, *in vitro* anticancer activity against breast cancer cell line and *in vivo* cytotoxicity. *Sci. Rep.*, 7, 10844. doi: 10.1038/s41598-017-11121-3.
- Fatima, R., Priya, M., Indurthi, L., Radhakrishnan, V., Sudhakaran, R. (2020). Biosynthesis of silver nanoparticles using red algae *Portieria hornemannii* and its antibacterial activity against fish pathogens. *Microb. Pathog.*, 138, 103780. doi: 10.1016/j.micpath.2019.103780.
- Fernandes, M., Gonzalez-Ballesteros, N., da Costa, A., Machado, R., Gomes, A. C., Rodríguez-Argüelles, M. C. (2023). Antimicrobial and anti-biofilm activity of silver nanoparticles biosynthesized with *Cystoseira* algae extracts. *J. Biol. Inorg. Chem.*, 28, 439—450. doi: 10.1007/s00775-023-01999-v.
- Fritz, M., Korsten, S., Chen, X., Yang, G., Lv, Y., Liu, M., ..., Fischer, C. B. (2023). Time-Dependent Size and Shape Evolution of Gold and Europium Nanoparticles from a Bioproducing Microorganism, a Cyanobacterium: A Digitally Supported High-Resolution Image Analysis. *Nanomaterials*, 13, 130. doi: 10.3390/nano13010130.

Gonzalez-Ballesteros, N., Prado-Lopez, S., Rodriguez-Gonzalez, J. B., Lastra, M., Rodriguez-Arguelles, M. (2017). Green synthesis of gold nanoparticles using brown algae *Cystoseira baccata*: Its activity in colon cancer cells. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 153, 190—198. doi: 10.1016/j.colsurfb.2017.02.020.

Gonzalez-Ballesteros, N., Rodriguez-Arguelles, M. C., Lastra-Valdor, M., Gonzalez-Mediero, G., Rey-Cao, S., Grimaldi, M., ..., Bigi, F. (2020). Synthesis of silver and gold nanoparticles by *Sargassum muticum* biomolecules and evaluation of their antioxidant activity and antibacterial properties. *J. Nanostruct. Chem.*, 10, 317—330. doi: 10.1007/s40097-020-00352-y.

Hamed, S. M., Hagag, E. S., El-Raouf, N. A. (2019). Green production of silver nanoparticles, evaluation of their nematocidal activity against *Meloidogyne javanica* and their impact on growth of faba bean. *Beni-Suef. Univ. J. Basic Appl. Sci.*, 8, 9. doi: 10.1186/s43088-019-0010-3.

Hamida, R. S., Abdelmeguid, N. E., Ali, M. A., Bin-Meferij, M. M., Khalil, M. I. (2020). Synthesis of silver nanoparticles using a novel cyanobacteria *Desertifilum* sp. extract: their antibacterial and cytotoxicity effects. *Int. J. Nanomed.*, 15, 49—63. doi: 10.2147/IJN.S238575.

Hamida, R. S., Albasher, G., Bin-Meferij, M. M. (2020). Oxidative stress and apoptotic responses elicited by *Nostoc*-synthesized silver nanoparticles against different cancer cell lines. *Cancers*, 12, 2099. doi: 10.3390/cancers12082099.

Hamida, R. S., Ali, M. A., Goda, D. A., Khalil, M. I., Al-Zaban, M. I. (2020). Novel biogenic silver nanoparticle-induced reactive oxygen species inhibit the biofilm formation and virulence activities of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) strain. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 8, 433. doi:10.3389/fbioe.2020.00433.

Hanna, A. L., Hamouda, H. M., Goda, H. A., Sadik, M. W., Moghanm, F. S., Ghoneim, A. M., ..., Elsaved, T. R. (2022). Biosynthesis and characterization of silver nanoparticles produced by *Phormidium ambiquum* and *Desertifilum tharense* cyanobacteria. *Bioinorg. Chem. Appl.*, 2022, 9072508. doi: 10.1155/2022/9072508.

Ismail, G. A., El-Sheekh, M. M., Samy, R. M., Gheda, S. F. (2021). Antimicrobial, antioxidant, and antiviral activities of biosynthesized silver nanoparticles by phycobiliprotein crude extract of the cyanobacteria *Spirulina platensis* and *Nostoc linckia*. *BioNanoSci.*, 11, 355—370. doi: 10.1007/s12668-021-00828-3.

Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., Kalaskar, M. G. (2019). Metal nanoparticles synthesis: an overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, 53, 101174. doi: 10.1016/j.jddst.2019.101174.

Kathiraven, T., Sundaramanickam, A., Shanmugam, N., Balasubramanian, T. (2015). Green synthesis of silver nanoparticles using marine algae *Caulerpa racemosa* and their antibacterial activity against some human pathogens. *Appl. Nanosci.*, 5, 499—504. doi: 10.1007/s13204-014-0341-2.

Khan, I., Saeed, K., Khan, I. (2019). Nanoparticles: properties, applications and toxicities. *Arab. J. Chem.* 12(7), 908—931. doi: 10.1016/j.arabjc.2017.05.011.

Kumar, L., Bharadvaja, N. (2022). Biosynthesis, characterization, and evaluation of antibacterial and photocatalytic dye degradation activities of silver nanoparticles biosynthesized by *Chlorella sorokiniana*. *Biomass Conv. Bioref.*, 277. doi: 10.1007/s13399-022-03433-w.

Kumar, L., Mohan, L., Anand, R., Bharadvaja, N. (2023). *Chlorella minutissima*-assisted silver nanoparticles synthesis and evaluation of its antibacterial activity. *Syst. Microbiol. and Biomanuf.*, 458. doi: 10.1007/s43393-023-00173-4.

Lenartowicz, M., Marek, P. H., Madura, I. D., Lipok, J. (2017). Formation of variously shaped gold nanoparticles by *Anabaena laxa*. *J. Clust. Sci.*, 28, 3035—3055. doi: 10.1007/s10876-017-1275-0.

Lengke, M. F., Fleet, M. E., Southam, G. (2006). Synthesis of platinum nanoparticles by reaction of filamentous cyanobacteria with platinum (IV) chloride complex. *Langmuir*, 22(17), 7318—7323. doi: 10.1021/la060873s.

Lengke, M. F., Fleet, M. E., Southam, G. (2007). Synthesis of palladium nanoparticles by reaction of filamentous cyanobacterial biomass with a palladium (II) chloride complex. *Langmuir*, 23(17), 8982—8987. doi: 10.1021/la7012446.

Lengke, M. F., Ravel, B., Fleet, M. E., Wanger, G., Gordon, R. A., Southam, G. (2006). Mechanisms of gold bioaccumulation by filamentous cyanobacteria from gold (III)-chloride complex. *Environ. Sci. Technol.*, 40, 6304—6309. doi: 10.1021/es061040r.

- Li, L., Zhang, Z. (2016). Biosynthesis of gold nanoparticles using green alga *Pithophora oedogonia* their electrochemical performance for determining carbendazim in soil. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 11, 4550—4559. doi: 10.20964/2016.06.13.
- Madhiyazhagan, P., Murugan, K., Kumar, A. N., Nataraj, T., Dinesh, D., Panneerselvam, C., ..., Benelli, G. (2015). *Sargassum muticum*-synthesized silver nanoparticles: An effective control tool against mosquito vectors and bacterial pathogens. *Parasitol. Res.*, 114, 4305—4317. doi: 10.1007/s00436-015-4671-0.
- Mandhata, C. P., Sahoo, C. R., Mahanta, C. S., Padhy, R. N. (2021). Isolation, biosynthesis and antimicrobial activity of gold nanoparticles produced with extracts of *Anabaena spiroides*. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 44, 1617—1626. doi: 10.1007/s00449-021-02544-4.
- Mohamed, M. E., El Semary, N. A., Younis, N. S. (2022). Silver nanoparticle production by the cyanobacterium *Cyanothece* sp.: de novo manipulation of nanobiosynthesis by phytohormones. *Life*, 12 (2), 139. doi: 10.3390/life12020139.
- Momeni, S., Nabipour, I. (2015). A simple green synthesis of palladium nanoparticles with *Sargassum* alga and their electrocatalytic activities towards hydrogen peroxide. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 176, 1937—1949. doi: 10.1007/s12010-015-1690-3.
- Namvar, F., Azizi, S., Ahmad, M. B., Shameli, K., Mohamad, R., Mahdavi, M., Tahir, P. M. (2015). Green synthesis and characterization of gold nanoparticles using the marine macroalgae *Sargassum muticum*. *Res. Chem. Intermed.*, 41, 5723—5730. doi: 10.1007/s11164-014-1696-4.
- Nisar, P., Ali, N., Rahman, L., Ali, M., Shinwari, Z. K. (2019). Antimicrobial activities of biologically synthesized metal nanoparticles: an insight into the mechanism of action. *J. Biol. Inorg. Chem.*, 24, 929—941. doi: 10.1007/s00775-019-01717-7.
- Palanisamy, S., Anjali, R., Jeneeta, S., Mohandoss, S., Keerthana, D., Shin, I. S., ..., Prabhu, N. M. (2023). An effective bio-inspired synthesis of platinum nanoparticles using *Caulerpa sertularioides* and investigating their antibacterial and antioxidant activities. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 46(1), 105—118. doi: 10.1007/s00449-022-02816-7.
- Palaniyandi, T., Viswanathan, S., Prabhakaran, P., Baskar, G., Wahab, M. R. A., Sivaji, A., ..., Kumarasamy, S. (2023). Green synthesis of gold nanoparticles using *Halymenia pseudofloresii* extracts and their antioxidant, antimicrobial, and anti-cancer activities. *Biomass. Conv. Bioref.* doi: 10.1007/s13399-023-03873-y.
- Pareek, V., Bhargava, A., Gupta, R., Jain, N., Panwar, J. (2017). Synthesis and applications of noble metal nanoparticles: a review. *Adv. Sci. Eng. Med.* 9(7), 527—544. doi: 10.1166/ase.m.2017.2027.
- Patel, V., Berthold, D., Puranik, P., Gantar, M. (2015). Screening of cyanobacteria and microalgae for their ability to synthesize silver nanoparticles with antibacterial activity. *Biotechnol. Rep.*, 5, 112—119. doi: 10.1016/j.btre.2014.12.001.
- Qing, Y., Cheng, L., Li, R., Liu, G., Zhang, Y., Tang, X., ..., Qin, Y. (2018). Potential antibacterial mechanism of silver nanoparticles and the optimization of orthopedic implants by advanced modification technologies. *Int. J. Nanomed.*, 13, 3311—3327. doi: 10.2147/IJN.S165125.
- Quinteros, M. A., Aristizabal, V. C., Dalmasso, P. R., Paraje, M. G., Paez, P. L. (2016). Oxidative stress generation of silver nanoparticles in three bacterial genera and its relationship with the antimicrobial activity. *Toxicol. in Vitro*, 36, 216—223. doi: 10.1016/j.tiv.2016.08.007.
- Rajkumar, R., Ezhumalai, G., Gnanadesigan, M. (2021). A green approach for the synthesis of silver nanoparticles by *Chlorella vulgaris* and its application in photocatalytic dye degradation activity. *Environ. Technol. Innov.*, 21, 101282. doi: 10.1016/j.eti.2020.101282.
- Ramakrishna, M., Rajesh Babu, D., Gengan, R. M., Chandra, S., Nageswara Rao, G. (2016). Green synthesis of gold nanoparticles using marine algae and evaluation of their catalytic activity. *J. Nanostruct. Chem.*, 6, 1—13. doi: 10.1007/s40097-015-0173-y.
- Ramkumar, V. S., Pugazhendhi, A., Prakash, S., Ahila, N. K., Vinoj, G., Selvam, S., ..., Rajendran, R. B. (2017). Synthesis of platinum nanoparticles using seaweed *Padina gymnospora* and their catalytic activity as PVP/PtNPs nanocomposite towards biological applications. *Biomed. Pharmacother.*, 92, 479—490. doi: 10.1016/j.biopha.2017.05.076.
- Saravanan, A., Kumar, P. S., Karishma, S., Vo, D.-V. N., Jeevanantham, S., Yaashikaa, P., George, C. S. (2021). A review on biosynthesis of metal nanoparticles and its environmental applications. *Chemosphere*, 264(2), 128580. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128580.

- Sathishkumar, R., Sundaramanickam, A., Srinath, R., Ramesh, T., Saranya, K., Meena, M., Surya, P. (2019). Green synthesis of silver nanoparticles by bloom forming marine microalgae *Trichodesmium erythraeum* and its applications in antioxidant, drug-resistant bacteria, and cytotoxicity activity. *J. Saudi Chem. Soc.*, 23, 1180—1191. doi: 10.1016/j.jscs.2019.07.008.
- Sathiyaraj, G., Vinosha, M., Sangeetha, D., Manikandakrishnan, M., Palanisamy, S., Sonaimuthu, M., ..., Prabhu, N. M. (2021). Bio-directed synthesis of Pt-nanoparticles from aqueous extract of red algae *Halymenia dilatata* and their biomedical applications. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 618, 126434. doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.126434.
- Savadi, M. H., Salmani, N., Heidari, A., Rezaei, M. R. (2018). Bio-synthesis of palladium nanoparticle using *Spirulina platensis* alga extract and its application as adsorbent. *Surf. Interfaces*, 10, 136—143. doi: 10.1016/j.surfint.2018.01.002.
- Senthilkumar, P., Surendran, L., Sudhagar, B., Kumar, D. R. S. (2019). Facile green synthesis of gold nanoparticles from marine algae *Gelidiella acerosa* and evaluation of its biological Potential. *SN Appl. Sci.*, 1, 284. doi: 10.1007/s42452-019-0284-z.
- Singh, Y., Kaushal, S., Sodhi, R. S. (2020). Biogenic synthesis of silver nanoparticles using cyanobacterium *Leptolyngbya* sp. WUC 59 cell-free extract and their effects on bacterial growth and seed germination. *Nanoscale Adv.*, 2, 3972—3982. doi: 10.1039/D0NA00357C.
- Tomer, A. K., Rahi, T., Neelam, D. K., Dadheech, P. K. (2019). Cyanobacterial extract-mediated synthesis of silver nanoparticles and their application in ammonia sensing. *Int. Microbiol.*, 22, 49—58. doi: 10.1007/s10123-018-0026-x.
- Uma Suganya, K. S., Govindaraju, K., Ganesh Kumar, V., Stalin Dhas, T., Karthick, V., Singaravelu, G., Elanchezhian M. (2015). Blue green alga mediated synthesis of gold nanoparticles and its antibacterial efficacy against Gram positive organisms. *Mater. Sci. Eng. C*, 47, 351—356. doi: 10.1016/j.msec.2014.11.043.
- Viswanathan, S., Palaniyandi, T., Chellam, D. C., Ahmed, M. F., Shoban, N., Pushpakumar, M., ..., Sankareswaran, S. K. (2023a). Anti-cancer activity of *Hypnea valentiae* seaweed loaded gold nanoparticles through EMT signaling pathway in A549 cells. *Biochem. Syst. Ecol.*, 107, 104606. doi: 10.1016/j.bse.2023.104606.
- Viswanathan, S., Palaniyandi, T., Shanmugam, R., Karunakaran, S., Pandi, M., Wahab, M. R. A., ..., Moovendhan, M. (2023b). Synthesis, characterization, cytotoxicity, and antimicrobial studies of green synthesized silver nanoparticles using red seaweed *Champia parvula*. *Biomass Conv. Bioref.*, 325. doi: 10.1007/s13399-023-03775-z.
- Younis, N. S., Bakir, E. M., Mohamed, M. E., El Semary, N. A. (2019). Cyanobacteria as nanogold factories II: chemical reactivity and anti-myocardial infarction properties of customized gold nanoparticles biosynthesized by *Cyanothece* sp. *Mar. Drugs*, 17(7), 402. doi: 10.3390/md17070402.
- Younis, N. S., Mohamed, M. E., El Semary N. A. (2022) Green synthesis of silver nanoparticles by the cyanobacteria *Synechocystis* sp.: characterization, antimicrobial and diabetic wound-healing actions. *Mar. Drugs*, 20(1), 56. doi: 10.3390/md20010056.
- Zada, S., Ahmad, A., Khan, S., Yu, X., Chang, K., Iqbal, A., Ahmad, A., ..., Fu, P. (2018). Biogenic synthesis of silver nanoparticles using extracts of *Leptolyngbya* JSC-1 that induce apoptosis in HeLa cell line and exterminate pathogenic bacteria. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 46, 471—480. doi: 10.1080/21691401.2018.1499663.
- Zaki, A., Aziz, M. N., Ahmad, R., Ahamad, I., Ali, M. S., Yasin, D., ..., Fatma, T. (2022). Synthesis, purification and characterization of *Plectonema* derived AgNPs with elucidation of the role of protein in nanoparticle stabilization. *RSC Adv.*, 12, 2497—2510. doi: 10.1039/d1ra08396A.
- Zayadi, R. A., Bakar, F. A. (2020). Comparative study on stability, antioxidant and catalytic activities of bio-stabilized colloidal gold nanoparticles using microalgae and cyanobacteria. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8(4), 103843. doi: 10.1016/j.jece.2020.103843.