

BIOSYNTHESIS OF NOBLE METAL NANOPARTICLES. PART 3. POSSIBILITIES OF USING PLANTS

O. Skrotska, V. Marchenko

National University of Food Technologies

Key words:

Nanoparticles
Properties of
nanoparticles
Biosynthesis
Mechanism of
biosynthesis
Noble metals
Plants

Article history:

Received 13.10.2023

Received in revised form
27.10.2023

Accepted 16.11.2023

Corresponding author:

O. Skrotska

E-mail:

skrotska@ukr.net

Citation: O. I. Скроцька,
В. В. Марченко (2023).
Біосинтез наночастинок
благородних металів. Ча-
стина 3. Можливості ви-
користання рослин. *Нау-
кові праці НУХТ*, 29(5),
21—45.

DOI: 10.24263/2225-2924-
2023-29-5-4

ABSTRACT

Various biological objects are used for the biosynthesis of noble metal nanoparticles: bacteria, fungi, yeast, cyanobacteria, algae, plants. In this review, the possibilities of using plants for the synthesis of nanoparticles were characterized. The analysis is primarily focused on scientific articles published between 2017 and 2023.

Noble metal nanoparticles can be obtained using extracts from various plants, including *Amygdalus communis*, *Argemone mexicana*, *Citrullus lanatus*, *Cicer arietinum*, *Gundelia tournefortii*, *Piper nigrum*, *Rauwolfia serpentina*, *Sambucus wightiana*, *Urtica dioica*, *Vernonia cinerea*, etc. Apart from using plant extracts, gold nanoparticles can be synthesized using plant oils and polyphenols. Silver nanoparticle biosynthesis was investigated using extracts from leaves, flowers, fruits, and food waste. The resulting nanoparticles exhibited a spherical shape and a wide spectrum of biological activity. Utilizing extracts from different parts of plants, platinum nanoparticles with anti-tumor, antioxidant, and catalytic activities were synthesized. Palladium nanoparticles can be obtained not only using plant extracts but also alkaloids, camphor, and natural juices. Plant-based materials were also employed for the synthesis of iridium and ruthenium nanoparticles, which exhibited diverse shapes, sizes, and demonstrated catalytic and biological activities.

Mechanisms of nanoparticle biosynthesis using plants are not fully explored nowadays. However, it is known that carboxyl, carbonyl, hydroxyl, amino, and biologically active groups of aromatic compounds participate in the reduction of gold ions, the formation of nanoparticles, and their stabilization. During the formation of silver nanoparticles, hydroxyl, methylene, and carboxyl groups of various biomolecules play a crucial role. Active polyphenol groups are involved in the biosynthesis and stabilization of platinum and palladium nanoparticles.

Nanoparticles synthesized using plant materials are characterized by antibacterial activity against both gram-negative and gram-positive bacteria, as well as anti-candida properties. Furthermore, biogenically synthesized noble metal nanoparticles were proven to possess anti-tumor properties by activating pro-apoptotic proteins and suppressing anti-apoptotic proteins. Additionally, these biogenic nanoparticles exhibit antioxidant and catalytic activities.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-5-4

БІОСИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ. ЧАСТИНА 3. МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИН

О. І. Скроцька, В. В. Марченко

Національний університет харчових технологій

Для біосинтезу наночастинок благородних металів використовують різні біологічні об'єкти: бактерії, гриби, дріжджі, ціанобактерії, водорості, рослини. У пропонуваному огляді охарактеризовано можливості використання саме рослин для синтезу наночастинок. На основі аналізу наукових статей в основному за 2017—2023 роки.

Наночастинки благородних металів можна отримати при використанні екстрактів: *Amygdalus communis*, *Argemone mexicana*, *Citrullus lanatus*, *Cicer arietinum*, *Gundelia tournefortii*, *Piper nigrum*, *Rauwolfia serpentina*, *Sambucus wightiana*, *Urtica dioica*, *Vernonia cinerea* та ін. Крім використання рослинних екстрактів, наночастинки золота можна отримати за допомогою рослинних олій і поліфенолів. Досліджений біосинтез наночастинок срібла при використанні екстрактів листя, квітів, плодів і харчових відходів. Отримані наночастинки мали сферичну форму і володіли широким спектром біологічної активності. При використанні екстрактів різних частин рослин були синтезовані наночастинки платини, які мали протипухлинну, антиоксидантну та каталітичну активність. Наночастинки паладію можна отримати при використанні не лише рослинних екстрактів, а й алкалоїдів, камеді та натуральних соків. З використанням рослинної сировини також синтезовані наночастинки іридію та рутенію. Вони мали різну форму та розміри, а також проявили каталітичну і біологічну активність.

Механізми біосинтезу наночастинок з використанням рослин на сьогодні повністю не досліджені. Проте відомо, що карбоксильні, карбонільні, гідроксильні, амінні та біологічно активні групи ароматичних сполук беруть участь у процесі відновлення іонів золота, формуванні наночастинок та їх стабілізації. Під час формування наночастинок срібла ключову роль відіграють гідроксильні, метиленові та карбоксильні групи різних біологічних речовин. Активні групи поліфенолів беруть участь у біосинтезі й стабілізації наночастинок платини та паладію.

Наночастинки, які були синтезовані з використанням рослинної сировини, характеризуються антибактеріальною активністю як щодо грамнегативних, так і грампозитивних бактерій, а також вони мають антикандидозну дію. Доведено також протипухлинну дію біосинтезованих наночастинок благородних металів, яка полягає в активації синтезу проапоптичних білків і пригніченні синтезу антиапоптичних білків. Крім того, біогенні наночастинки мають антиоксидантну та каталітичну активність.

Ключові слова: наночастинки, властивості наночастинок, біосинтез, механізм біосинтезу, благородні метали, рослини.

Постановка проблеми. Наночастинки благородних металів можна отримати фізичними, хімічними і біологічними методами. При цьому біосинтез наночастинок з використанням біологічних об'єктів та їх метаболітів виключає необхідність використання токсичних сполук як відновників і стабілізуючих агентів, також він є екологічно чистим та економічно ефективним методом (Mustapha, Misni, Ithnin, Daskum, & Unyah, 2022).

Кожен вид рослин має свій унікальний хімічний склад, і, отже, спосіб біосинтезу наночастинок може відрізнятися залежно від обраної рослини, або її частини. Тому вивчення механізмів цього процесу й оптимізація умов синтезу може допомогти розкрити нові можливості в цій галузі. Нині активно досліджуються оптимальні умови синтезу наночастинок благородних металів з використанням рослинних екстрактів, а також їх властивості: антибактеріальна та протигрибкова дія, протипухлинні властивості, антиоксидантна дія, каталітична активність. Біосинтез наночастинок з використанням рослинної сировини включає в себе вибір рослинних джерел (ціла рослина, листя, плоди, кора, квіти, харчові відходи тощо), вивчення механізмів біосинтезу та властивостей наночастинок, що мають важливе значення для їх подальшого застосування в різних галузях (Fahmy та ін., 2021).

У минулих оглядах ми розглядали використання грибів, дріжджів, бактерій (Скороцька, & Марченко, 2023), ціанобактерій і водоростей (Скороцька, Марченко, & Коваль, 2023) для синтезу наночастинок благородних металів. Основною **метою цього огляду** є аналіз наукових публікацій та узагальнення даних експериментальних досліджень, що стосуються можливостей використання рослин для біосинтезу наночастинок благородних металів, умов і механізмів їх біосинтезу, а також властивостей.

Матеріали і методи. При написанні огляду були використані сучасні наукові публікації зарубіжних вчених у міжнародних виданнях в основному 2017—2023 років. Наукові дослідження зарубіжних учених стосуються використання рослин, а також рослинних сполук для біосинтезу наночастинок благородних металів. Для пошуку наукових публікацій використовували наукометричні бази даних: PubMed, Google Scholar.

Викладення основних результатів дослідження. Рослини містять велику кількість хімічних сполук (флавоноїди, алкалоїди, терпеноїди, феноли, амінокислоти, стероїди тощо), які можуть виступати відновниками та стабілізаторами під час біосинтезу наночастинок благородних металів — золота (Patil та ін., 2017), срібла (Jyoti, Baunthiyal, & Singh, 2016), платини (Ramachandiran, Elangovan, & Rajesh, 2021), паладію (Abdullah, Behrouzi, & Kaboudin, 2021), рутенію (Nisha, Vidyalakshmi, & Razack, 2020) та іридію (Mergola, Carbone, Stomeo, & Del Sole, 2023).

Наночастинки золота (AuNPs). В основному для біосинтезу наночастинок золота використовують водні екстракти рослин (Wang, 2019; Fanoro, 2021; Alshahrani, 2021; Khuda, 2021), але є повідомлення і про використання етанольних (Liu та ін., 2019) та ацетонових екстрактів (Alshahrani, & Ibrahim 2022). Також є дослідження синтезу наночастинок золота з використанням ефірних рослинних олій (Dzimitrowicz та ін., 2019; Pathania та ін., 2022), поліфенолів (Oueslati, Ben Tahar, & Harrath, 2020) та екстрактів насіння (Mubeen та ін., 2022; Bawazeer та ін., 2022.).

Patil зі співавтор. для біосинтезу AuNPs (табл. 1) використовували водний екстракт сухих листків *Sasa borealis* — вид бамбука, що належить до сімейства *Poaceae*. При цьому для синтезу наночастинок золота робили екстракт з листя, а реакцію біосинтезу проводили при 50 °C упродовж 20 хв на водяній бані при безперервному перемішуванні (Patil та ін., 2018). Іншою групою науковців для біосинтезу AuNPs був використаний водний екстракт *Scutellaria barbata*. Це багаторічна трав'яниста рослина, яка відноситься до родини м'ятних трав. У китайській медицині *Scutellaria barbata* використовують для лікування різних захворювань, зокрема показані її протипухлинні властивості щодо раку молочної залози, шкіри, легенів, яєчників, колоректального раку та гепатокарциноми. Біосинтезовані наночастинок золота показали протипухлинну активність на моделі раку підшлункової залози людини *in vitro* (Wang та ін., 2019).

Таблиця 1. Біосинтез наночастинок золота

Рослина	Характеристика наночастинок		Властивості наночастинок	Джерело
	Форма, розміри	Параметри біосинтезу		
Екстракти листя				
<i>Euphrasia officinalis</i>	Сферичні та гексагональні, 5—30 нм	37 °С, 3 год	Протизапальна дія <i>in vitro</i>	Liu та ін., 2019
<i>Gundelia tournefortii</i>	Сферичні та шестикутні, 5—40 нм	45 °С, 1 год	Протипухлинна активність щодо клітин CaCo-2 (епідермальна аденокарцинома товстої кишки), U118 (глиома головного мозку), Sk-ov-3 (рак яєчників). Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213, <i>Bacillus subtilis</i> ATCC 11774, <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC27853; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i>	Keskin та ін., 2022
<i>Pongamia pinnata</i>	Сферичні, 10—25 нм	100 °С, 5 хв	Протигрибкова активність щодо <i>Pythium ultimum</i> var. <i>ultimum</i> SR1, <i>Pythium</i> sp. BP1120	Khatua та ін., 2020b
<i>Sasa borealis</i>	Сферичні, 10—30 нм	50 °С, 20 хв	Протипухлинна активність щодо клітин AGS (аденокарцинома шлунка)	Patil та ін., 2018
<i>Amygdalus communis</i>	Сферичні, 11—15 нм	22—25 °С (кімнатна), 60 хв	Протипухлинна активність щодо клітин CaCo-2 (епідермальна аденокарцинома товстої кишки), U118 (глиома головного мозку), Sk-ov-3 (рак яєчників). Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213, <i>Bacillus subtilis</i> ATCC 11774, <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC27833; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i>	Baran та ін., 2023

<i>Combretum erythrophyl lum</i>	Сферичні, 13,20 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus epidermidis</i> ATCC14990, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923, <i>Mycobacterium smegmatis</i> MC 215, <i>Proteus mirabilis</i> ATCC 7002, <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC 13822, <i>Klebsiella oxytoca</i> ATCC 8724	Fanoro та ін., 2021
<i>Rauwolfia serpentina</i>	Сферичні, 17 нм	40 °C, 48 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923, <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Bacillus subtilis</i> MTCC 8114, <i>Streptococcus pyogenes</i> ATCC 19615. Антиоксидантна активність щодо 2,2-дифеніл-1-пікрилгідразу. Протипухлинна активність щодо клітин Hela (рак шийки матки)	Alshahrani та ін., 2021
<i>Albizia lebbeck</i>	Сферичні, 20—30 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин HCT-116 (рак товстої кишки)	Malaikolundhan та ін., 2020
<i>Catharanthus roseus</i>	Сферичні, 25—35 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин HeLa (рак шийки матки)	Ke та ін., 2019
<i>Marsdenia tenacissima</i>	Сферичні та овальні, 30—50 нм	22—25 °C (кімнатна), 30 хв	Протипухлинна активність щодо клітин HepG2 (рак печінки)	Li, Zhang, Desikan Seshadri, & Cao, 2019
<i>Pongamia pinnata</i>	Сферичні та неправильної форми, 50 нм	100 °C, 3 хв	Протипухлинна активність щодо клітин HeLa (рак шийки матки)	Khatua та ін., 2020a
<i>Rosmarinus officinalis</i>	Сферичні, 79 нм	22—25 °C (кімнатна)	Протипухлинна активність щодо клітин HT-29 (рак товстої кишки)	Alshahrani, & Ibrahim 2022
<i>Argemone mexicana</i>	Гексагональні, 20—40 нм	80 °C, 3 год	Протипухлинна активність щодо клітин HCT-15 (рак товстої кишки)	Datkhile та ін., 2021
<i>Sambucus wightiana</i>	Різної форми, 10—50 нм	22—25 °C (кімнатна), 60 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> ATCC 5922, <i>Staphylococcus epidermidis</i> ATCC 12228, <i>Salmonella enteritidis</i> ATCC 13076; протигрибкова дія щодо <i>Fusarium solani</i> ATCC 11712, <i>Microsporum canis</i> ATCC 11622; антиоксидантна активність; знеболювальна дія	Khuda та ін., 2021
<i>Citrus medica</i>	Різної форми, 20—50 нм	22—25 °C (кімнатна)	Протипухлинна активність щодо клітин HepG2 (рак печінки)	Liu та ін., 2023

Екстракти надземної частини				
<i>Abies spectabilis</i>	Сферичні та овальні, 20—200 нм	29 °С, 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин Т24 (рак сечового міхура)	Wu та ін., 2019
<i>Vernonia cinerea</i>	Сферичні та трикутні, 25 нм	22—25 °С (кімнатна), 5 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Bacillus subtilis</i> MTCC-2057, <i>Chromobacterium violaceum</i> MTCC-2656, <i>Escherichia coli</i> MTCC-41, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> MTCC-2453, <i>Staphylococcus aureus</i> MTCC-96, <i>Streptococcus pyogenes</i> I MTCC-890; протигрибкова активність щодо <i>Aspergillus niger</i> MTCC-3002, <i>Fusarium oxysporum</i> MTCC-7392, <i>Rhizopus oryzae</i> MTCC-262, <i>Penicillium expansum</i> MTCC-2818; антиоксидантна активність	Singh, Antil, & Dahiya, 2021
<i>Scutellaria barbata</i>	Сферичні, 30—40 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин PANC-1 (рак підшлункової залози)	Wang та ін., 2019
<i>Marsdenia tenacissima</i>	Сферичні та овальні, 30—50 нм	25 °С, 12 год	Протипухлинна активність щодо клітин A549 (карцинома легень)	Sun та ін., 2019
<i>Agrimonia pilosa</i>	Гексагональні, 20—50 нм	40 °С, 10 хв	Протипухлинна активність щодо клітин AGS (аденокарцинома шлунка); антиоксидантна активність	Patil, Seo, Lim, & Kim, 2019
Екстракти насіння				
<i>Citrullus colocynthis</i>	Сферичні, 7—33 нм	70 °С, 30 хв	*	Mubeen та ін., 2022
<i>Piper nigrum</i>	Сферичні та овальні, 40—60 нм	40 °С, 30 хв	Каталітична активність щодо відновлення метилового оранжевого. Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Acinetobacter</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Providencia</i> ; протигрибкова активність щодо <i>Alternaria solani</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> ; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i>	Bawazeer та ін., 2022
Екстракт кореневища				
<i>Curcuma longa</i>	Сферичні, 2—10 нм	30 °С, 40 хв	Антимікробна активність щодо <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Escherichia coli</i> ; протипухлинна активність щодо клітин A549 (аденокарцинома легень) та PC3 (рак передміхурової залози)	Sharma, Thakur, Saini, Kumar, & Torino, 2020

Екстракт стебел				
<i>Tinospora cordifolia</i>	Сферичні, 16,1 нм	22—25 °С (кімнатна), 24 год	Антимікробна активність щодо <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Ali та ін., 2020
Ефірні олії				
<i>Eucalyptus globulus</i>	Різної форми (сферичні, трикутні, шестикутні, паличко-видні), 0,2—84,2 нм	95 °С, 5 хв	*	Dzimitrowicz та ін., 2019
<i>Cymbopogon flexuosus</i>	Неправильної форми, 10—32 нм	60 °С, 2 год	Каталітична активність щодо відновлення метиленового синього. Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> ; протигрибкова активність щодо <i>Fusarium oxysporum</i>	Pathania та ін., 2022
Поліфеноли				
<i>Salvia officinalis</i>	Сферичні, 6 нм	25 °С, 5 хв	Каталітична активність щодо відновлення 4-нітрофенолу	Oueslati, Ben Tahar, & Harrath, 2020

Примітка: * — автори не досліджували властивості наночастинок.

Combretum erythrophyllum — назва дерева, що росте в Південній Африці. Екстракти листя, насіння та кори *Combretum erythrophyllum* використовуються з лікувальною метою. Вони містять флавоноїди, алкалоїди, феноли та ефірні олії. Використовуючи водний екстракт листя *Combretum erythrophyllum*, були синтезовані наночастинок золота, які зберігали стабільність упродовж 60 діб спостереження. Біогенні AuNPs (табл. 1) показали антибактеріальну активність щодо широкого спектра грампозитивних і грамнегативних бактерій, а також характеризувались високою біосумісністю з лінією нормальних перещеплюваних клітин ВНК-21 (Fanogo та ін., 2021).

Alshahrani зі співавтор. для біосинтезу наночастинок золота використали водний екстракт листя *Rauwolfia serpentina*. Це вічнозелений чагарник і на сьогодні відомо близько 100 видів раувольфії, які існують у різних кліматичних умовах по всьому світу, включаючи тропічні та субтропічні зони на кількох континентах. В листі, корі та коренях *Rauwolfia serpentina* наявні різні алкалоїди. Однак у деяких випадках відсоток алкалоїдів може змінюватись залежно від того, де росте рослина, від віку рослини та сезону збору різних частин цього чагарника. Вміст алкалоїдів у корі становить понад 90%, тоді як вміст алкалоїдів у коренях коливається від 1,7 до 3,0%. Екстракти *Rauwolfia serpentina* застосовують при різних захворюваннях, наприклад, при гіпертонії, головних болях, лихоманці, безсонні, діарей, дизентерії, малярії, пневмонії, астмі тощо. (Alshahrani та ін., 2021).

В інших дослідженнях для синтезу наночастинок золота (табл. 1) використовували водний екстракт *Sambucus wightiana* (бузина) — один із поширених багаторічних деревних чагарників. Ця рослина містить безліч фітохімічних речовин,

таких як флавоноїди, поліфеноли, стероїди та глікозиди. У народній медицині бузину використовують для лікування різних патологічних станів, таких як запалення, шкірна інфекція, інфекція сечовивідних шляхів, черевний тиф, рак і гіпертонія. Саме феноли і флавоноїди, які є в екстрактах *Sambucus wightiana*, в основному відповідають за їх знеболювальну, протиракову, протизапальну та протимікробну дію (Khuda та ін., 2021).

Також для біосинтезу наночастинок золота можна використовувати етанольні екстракти рослин. Так, Liu зі співавтор. використовували сухий етанольний екстракт листя очанки (*Euphrasia officinalis*), який для біосинтезу AuNPs розчиняли у стерильній воді. Очанка є лікарською рослиною з роду *Euphrasia*, що належить до сімейства *Orobanchaceae*. Вона широко використовується в Європі як протизапальний засіб при сінній лихоманці, синуситі та інфекціях верхніх дихальних шляхів, для лікування та профілактики захворювань очей, таких як кон'юнктивіт, офтальмія, очна алергія та втома очей. Екстракти *Euphrasia officinalis* мають антиоксидантну, протизапальну та антимікробну активність. В них містяться фенольні кислоти та флавоноїди. Відомо, що саме ці сполуки діють як відновники та стабілізатори при біовідновленні іонів золота та формуванні наночастинок (Liu та ін., 2019).

Marsdenia tenacissima використовується в традиційній китайській медицині для лікування пневмонії й трахеїту. Екстракт цієї рослини має протипухлинну активність, яка пов'язана із зупинкою клітинного циклу, клітинним апоптозом та індукцією антиангіогенезу. Основними активними інгредієнтами екстрактів *Marsdenia tenacissima* є поліоксипрегнани, аглікони та глікозиди. Sun зі співавтор. використовували екстракт рослини для синтезу наночастинок золота. Отримані AuNPs (табл. 1), як і екстракти *Marsdenia tenacissima*, виявили протиракову активність, зокрема у дослідях *in vitro* на моделі карциноми легень. Автори показали, що протипухлинна дія наночастинок ґрунтується на індукції апоптозу ракових клітин за рахунок впливу на синтез проапоптичного білка Вах і антиапоптичного білка Bcl-2 (Sun та ін., 2019). В іншому дослідженні було показано, що протипухлинна активність біосинтезованих AuNPs пов'язана з індукцією мітохондріально-опосередкованих апоптичних сигнальних шляхів через індукцію активних форм кисню. Також біогенні AuNPs призводили до підвищення рівнів каспаз 3 і 9, які запускають каскад реакцій, що призводять до загибелі ракових клітин. При цьому спостерігали підвищення рівнів проапоптичних білків Вах та Bid, і пригнічення синтезу антиапоптичного білка Bcl-2. Для досліджень наночастинок золота були синтезовані з використанням водного екстракту *Catharanthus roseus*. Це лікарська рослина, яка містить у своєму складі похідні сполуки терпеноїдних індольних алкалоїдів і використовується у фітотерапії для лікування різних видів раку та шкірних захворювань, а також діабету та гіпертонії (Ke та ін., 2019).

Індійський бук (*Pongamia pinnata*), екстракт листя якого використовували для отримання біогенних наночастинок золота, належить до сімейства *Fabaceae* та підродини *Papilionaceae*. Екстракти, отримані з листя *Pongamia pinnata* містять флавоноїди, флавони, фурани, фуранофлавоноли, хроменофлаволи, фуранодикетони та глікозиди. За рахунок наявності цих сполук екстракт *Pongamia pinnata* характеризується антиоксидантними властивостями, а також його використовують як антипроліферативний, протизапальний і протираковий засіб. Саме тому

синтезовані AuNPs з використанням екстракту *Pongamia pinnata* (табл. 1) перевіряли на антиракову активність. На моделі раку шийки матки *in vitro* було показано, що наночастинки золота проникають всередину пухлинних клітин шляхом ендоцитозу, після чого спостерігається внутрішньоклітинне підвищення рівнів активних форм кисню. Це призводить до цитотоксичного ефекту за рахунок зупинки росту ракових клітин у синтетичний період клітинного циклу (S-фаза) та подальшої загибелі клітин у результаті апоптичних реакцій (Khatua, 2020a; Khatua, 2020b). При використанні експериментальної моделі раку сечового міхура *in vitro* було показано, що біогенні AuNPs теж викликають апоптоз пухлинних клітин, але механізм їх дії інший. Наночастинки золота викликають каскад реакцій, що призводить до фрагментації ядра та пошкодження ДНК у ракових клітинах. Самі ж наночастинки були синтезовані з використанням екстракту східногімалайської ялиці (*Abies spectabilis*) (Wu та ін., 2019).

Marsdenia tenacissima — багаторічна ліана, поширена в тропічних і субтропічних районах Азії, переважно у китайських провінціях Юньнань і Гуйчжоу. Екстракти цієї рослини використовуються для лікування трахеїту, астми, ревматизму тощо. Екстракти *Marsdenia tenacissima* містять полісахариди, стероїдні глікозиди, органічні кислоти, алкалоїди, смоли та пігменти, а також інші хімічні компоненти, які надають цим екстрактам різних фармакологічних властивостей, зокрема вони полегшують кашель при астмі, мають знеболювальну та протизапальну дію. Лі з колегами реалізували біосинтез наночастинок золота з використанням екстракту *Marsdenia tenacissima* та дослідили їх протипухлинну активність *in vitro* на моделі раку печінки (табл. 1). Біогенні AuNPs спричиняли апоптоз пухлинних клітин за рахунок активації синтезу проапоптичних білків Bax, каспази 3 і 9 та пригнічення синтезу антиапоптичних білків Bcl-2 та Bcl-xL (Li, Zhang, Desikan Seshadri, & Cao, 2019).

Що стосується механізмів біосинтезу наночастинок золота з використанням екстрактів рослин, то на сьогодні відомо, що карбоксильні, карбонільні, гідроксильні, амінні та біологічно активні групи ароматичних сполук беруть участь у процесі відновлення іонів золота, формуванні наночастинок та їх стабілізації (Patil, 2017; Wang, 2019). Наприклад, гідроксильні групи фенольних сполук можуть відновлювати іони золота та запобігати утворенню агрегатів наночастинок під час їх біосинтезу AuNPs (Liu та ін., 2019). Є повідомлення, що дубильні речовини окислюються в присутності іонів тетрахлораурату, в результаті чого відбувається відновлення іонів золота і розпочинається процес формування наночастинок (Patil, Seo, Lim, & Kim, 2019). У разі використання натуральних ефірних рослинних олій для біосинтезу AuNPs була підтверджена участь в цьому процесі оцименів, біциклічних монотерпенів і феландренів (Dzimitrowicz та ін., 2019). Також показано роль алкінів, ароматичних сполук та алкенів під час утворення біогенних наночастинок золота (Malaikolundhan та ін., 2020).

Наночастинки срібла (AgNPs). Для біосинтезу наночастинок срібла можна використовувати екстракти листя (Jyoti, 2016; Aktepe, 2021b; Baran, 2022), плодів (Bindhu, & Umadevi, 2015), кори (Iravani, & Zolfaghari, 2013), квітів (Sabapathi, Ramalingam, Aruljothi, Lee, & Barathi, 2023) та харчових відходів (Aktepe, 2021a; Ibrahim, 2015; Baran та ін., 2021).

Кропива *Urtica dioica* L. відноситься до багаторічних рослин родини *Urticaceae*. Ця рослина має антибактеріальну, протигрибкову, противірусну та антиоксидантну дію. Для біосинтезу наночастинок срібла автори використовували водний екстракт листя кропиви (табл. 2). Біогенні AgNPs характеризувались антибактеріальною дією проти широкого кола грампозитивних і грамнегативних бактерій. Механізм цієї дії повністю не вивчений. Наночастинки срібла можуть проникати всередину бактеріальних клітин, де відбувається вивільнення іонів срібла, які, у свою чергу, можуть взаємодіяти з білками та нуклеїновими кислотами, що призводить до втрати життєздатності клітини. AgNPs каталізують утворення активних форм кисню, що теж призводить до загибелі клітини внаслідок окислювального стресу. Також було показано синергічну дію AgNPs з різними антибіотиками, що дасть використовувати наночастинки для посилення дії антибіотиків (Jyoti, Baunthiyal, & Singh, 2016).

Таблиця 2. Використання рослинних компонентів для біосинтезу наночастинок срібла

Рослина	Характеристика наночастинок		Біологічні властивості наночастинок	Джерело
	Форма, розміри	Параметри біосинтезу		
Екстракти листя				
<i>Cicer arietinum</i> L.	Сферичні, 6,11—9,66 нм	22—25 °C (кімнатна), 3 год	Протипухлинна активність щодо клітин CaCo-2 (епідермальна аденокарцинома товстої кишки), U118 (гліома головного мозку), Sk-ov-3 (рак яєчників); антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC27853, <i>Bacillus subtilis</i> ATCC 11774, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i>	Baran та ін., 2022
<i>Prunus dulcis</i> L.	Сферичні, 16 нм	22—25 °C (кімнатна), 30 хв	Протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i> ; антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213, <i>Bacillus subtilis</i> ATCC 11774, <i>Escherichia coli</i> ATCC25922, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC27833	Aktepe, & Baran, 2021b
<i>Urtica dioica</i> L.	Сферичні, 20—30 нм	40 °C, 60 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Bacillus cereus</i> 4079, <i>Bacillus subtilis</i> 441, <i>Staphylococcus aureus</i> 740, <i>Staphylococcus epidermidis</i> 3615, <i>Escherichia coli</i> 443, <i>Klebsiella pneumoniae</i> 3384, <i>Serratia marcescens</i> 97, <i>Salmonella typhimurium</i> 98	Jyoti, Baunthiyal, & Singh, 2016

<i>Citrullus lanatus</i> sp.	Сферичні, 21,27 нм	22—25 °C (кімнатна), 20 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> ; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i>	Aktepe, & Baran, 2021a
Екстракт плодів				
Буряк столовий	Сферичні, 15 нм	22—25°C (кімнатна), 7 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853, <i>Streptococcus aureus</i> ATCC 12384, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923; каталітична активність щодо відновлення 4-нітрофенолу	Bindhu, & Umadevi, 2015
Екстракти шкірки плодів				
<i>Ananas comosus</i>	Сферичні, 11,61 нм	22—25 °C (кімнатна), 2 год	Антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213, <i>Bacillus subtilis</i> ATCC 11774, <i>Escherichia coli</i> ATCC25922, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC27833; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i> ; протипухлинна активність щодо клітин CaCo-2 (епідермальна аденокарцинома товстої кишки), U118 (гліома головного мозку), Sk-ov-3 (рак яєчників)	Baran та ін., 2021
<i>Musa paradisiaca</i>	Сферичні, 23,7 нм	30 °C, 72 год	Протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i> ATCC 120231; антибактеріальна активність щодо <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 9027, <i>Escherichia coli</i> ATCC 8739	Ibrahim, 2015
Екстракт квітів				
<i>Cassia auriculata</i>	Сферичні, 30—80 нм	35 °C, 24 год	Антиоксидантна активність щодо 2,2-дифеніл-1-пікрилгідразилу; протипухлинна активність щодо клітин MCF-7 (аденокарцинома молочної залози); антибактеріальна активність щодо <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Vibrio cholera</i> , <i>Escherichia coli</i>	Sabapathi, Ramalingam, Aruljothi, Lee, & Barathi, 2023

Для біосинтезу наночастинок срібла можна використовувати водний екстракт листя кавуна (*Citrullus lanatus* sp.). Автори збирали листя після збору врожаю. Таким чином плоди *Citrullus lanatus* sp. використовуються у їжу, а відходи після збору врожаю можна використовувати для біосинтезу AgNPs (Aktepe, & Baran, 2021a). Цими ж авторами був досліджений біосинтез наночастинок срібла при використанні водного екстракту листків мигдального дерева (*Prunus dulcis* L.).

Біосинтезовані AgNPs показали широкий спектр антимікробної дії (Aktepe, & Baran, 2021b). При дослідженні AgNPs, що були отримані з використанням водного екстракту листя нуту звичайного (*Cicer arietinum* L.), крім антимікробних, виявлені ще й протипухлинні властивості наночастинок (Baran та ін., 2022).

Є повідомлення про синтез наночастинок срібла при використанні водного екстракту плодів червоного столового буряка (табл. 2). Отримані AgNPs показали антибактеріальну активність як проти грамнегативних бактерій, так і проти грам-позитивних (Bindhu, & Umadevi, 2015).

Cassia auriculate є лікарською рослиною з сімейства *Fabaceae* і роду *Senna*, яка росте в Індії. Для біосинтезу наночастинок срібла був використаний водний екстракт квітів *Cassia auriculate*, до якого додавали нітрат срібла. При цьому на початку біосинтезу розчин обробляли ультразвуком при 37 °C, після чого залишали в темноті при температурі 35 °C (Sabapathi, Ramalingam, Aruljothi, Lee, & Barathi, 2023).

Iravani та Zolfaghari для біосинтезу AgNPs використовували водний екстракт кори сосни (*Pinus eldarica*). Автори дослідили вплив pH на біосинтез наночастинок і показали, що при кислих значеннях pH формувались AgNPs великих розмірів, в той час як при лужному значенні pH утворювались високодисперсні наночастинок менших розмірів (Iravani, & Zolfaghari, 2013).

Для синтезу наночастинок срібла можна використовувати і харчові відходи, такі як шкірки бананів (табл. 2), які у своєму складі містять пектин, целюлозу та геміцелюлозу. Функціональні групи цих полімерів можуть бути залучені до відновлення іонів Ag^+ до Ag^0 та формування наночастинок. Був досліджений біосинтез наночастинок при використанні водного екстракту шкірок бананів за різних значень pH. При pH 2—4 біосинтезу не спостерігали, що може бути пов'язане з інактивацією біомолекул при кислих значеннях pH. При pH 11 були отримані високомонодисперсні наночастинок срібла (Ibrahim, 2015). Також для біосинтезу AgNPs можна використовувати водний екстракт шкірок ананасу (Baran та ін., 2021).

Щодо механізму біосинтезу AgNPs, то показано, що ключову роль при цьому відіграють гідроксильні, метиленові та карбоксильні групи біологічних речовин рослинних екстрактів (Aktepe, & Baran, 2021b). Аміди і фенольні сполуки приймають участь у відновленні іонів срібла та формуванні наночастинок (Baran та ін., 2022). Показано, що водний екстракт квітів *Cassia auriculate* містить поліфеноли, стероїди, алкалоїди, дубильні речовини й тритерпеноїди, які відновлюють іони срібла, беруть участь у біосинтезі наночастинок та стабілізують їх (Sabapathi, Ramalingam, Aruljothi, Lee, & Barathi, 2023). У водному екстракті *Urtica dioica* присутні вуглеводи, алкалоїди, сапоніни, білки, амінокислоти, фенол, дитерпени, дубильних сполуки та фітостероли, які можуть бути відповідальними за ефективну стабілізацію наночастинок срібла (Jyoti, Baunthiyal, & Singh, 2016).

Наночастинок платини (PtNPs). На сьогодні отримані наночастинок платини при використанні екстрактів різних частин рослин: листя (Ramachandiran, Elangovan, & Rajesh, 2021), коренів (Dobrucka, Romaniuk-Drapala, & Kaczmarek, 2019), а також харчових відходів, таких як шкірки гранатів (Şahin, 2018; Dauthal, 2015) та мигдалю (Sadalage та ін., 2022).

Шкірки гранатів (*Punica granatum*) є відходами харчової та сільськогосподарської промисловості. В їх складі виявлені дубильні речовини, антиоксиданти пунікалагін та кверцетин, галова та елагова кислоти. Ці сполуки можуть брати участь у біовідновленні іонів платини, що й було показано у дослідженнях. Так, були синтезовані PtNPs (табл. 3) з використанням етанольно-водного екстракту шкірок граната (Şahin та ін., 2018) та водного екстракту (Dauthal, & Mukhopadhyay, 2015). Іншими авторами був досліджений синтез наночастинок платини з використанням екстракту мигдалевих шкірок. В складі мигдалевих шкірок є флавоноїди, фенольні сполуки, спирти та глікозиди, які можуть брати участь у біосинтезі наночастинок (Sadalage та ін., 2022).

Таблиця 3. Наночастинки платини, отримані з використанням рослин

Рослині екстракти	Характеристика наночастинок		Властивості наночастинок	Джерело
	Форма, розміри	Параметри біосинтезу		
PtNPs				
Надземна частина <i>Bidens tripartitus</i>	Неправильної форми, 4 нм	90 °C, 8 год	*	Dobrucka, 2016
Листя <i>Barleria prionitis</i>	Сферичні, 5—7 нм	100 °C, 5 год	Протипухлинна активність щодо MCF-7 (рак молочної залози)	Rokade та ін., 2017
Листя <i>Salix tetraspeama</i>	Кубічні, 12 нм	22—25 °C (кімнатна), 2 год	Антиоксидантна активність; протипухлинна дія щодо клітин MCF-7 (рак молочної залози)	Ramachandiran, Elangovan, & Rajesh, 2021
Шкірка <i>Punica granatum</i>	Сферичні, 16—23 нм	90 °C, 30 хв	Каталітична активність щодо відновлення 3-нітрофенолу	Dauthal, & Mukhopadhyay, 2015
Насіння <i>Peganum harmala</i> L.	Сферичні, 18—20 нм	60 °C, 24 год	Антиоксидантна активність; протипухлинна дія щодо клітин A549 (карцинома легень) та MCF-7 (рак молочної залози)	Fahmy та ін., 2021
Шкірка <i>Punica granatum</i>	Сферичні, 20 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин MCF-7 (аденокарцинома молочної залози)	Şahin та ін., 2018
Корені <i>Ononis spinosa</i> L.	Сферичні та гексагональні, 20 нм	80 °C, 5 год	Протипухлинна активність щодо клітин A549 (карцинома легень)	Dobrucka, Romaniuk-Drapała, & Kaczmarek, 2019
Pt-PdNPs				
Листя <i>Annona muricata</i>	3,97—10,68 нм (форма не вказана)	100 °C, 2 год	Каталітична активність щодо відновлення метилового помаранчевого, родаміну-В та метиленового синього	Velidandi, Sarvepalli, Pabbathi, & Baadhe, 2021
Насіння <i>Peganum harmala</i> L.	Сферичні, 28,1—38,9 нм	60 °C, 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин A549 (карцинома легень) та MCF-7 (рак молочної залози); антиоксидантна активність	Fahmy та ін., 2021

Примітка: * — автори не досліджували властивості наночастинок.

Повідомляється про використання екстракту череди (*Bidens tripartitus*) для біосинтезу наночастинок платини (табл. 3). *Bidens tripartitus* є однорічною трав'янистою рослиною і відноситься до родини айстрових. Зустрічається в Європі, Азії, Африці та Північній Америці. Фітохімічні дослідження складу цієї трави показали наявність флавонів, флаванонів, халконів і ауронів, кумаринів, вітаміну С, каротиноїдів та фітонцидів (Dobrucka, 2016).

Також для синтезу PtNPs використовували екстракт коренів бобової рослини *Ononis spinosa* L., що відноситься до сімейства *Fabaceae*. Росте в Європі та на піщаних ділянках Азії. Коріння цієї рослини дерев'янисте та скручене, і завдяки своїм лікувальним властивостям воно часто використовується у фітотерапії. Коріння містить похідні флавоноїдів, стероли, терпенові речовини, фенольні кислоти, ізофлавоноїди та ефірну олію (Dobrucka, Romaniuk-Drapala, & Kaczmarek, 2019).

Salix tetraspeama є деревом з родини вербових, що росте у вологих і болотистих місцях. Її листя використовують в народній медицині при діабеті, лихоманці, геморої, епілепсії, дизентерії, кашлі та застуді. Був досліджений біосинтез PtNPs (табл. 3) з використанням екстракту листя *Salix tetraspeama*, при якому використовували ультразвук в процесі біосинтезу, або магнітну мішалку. При цьому використання ультразвуку призвело до формування наночастинок менших розмірів і вони показали кращу біологічну активність, ніж PtNPs, які утворились при використанні для біосинтезу магнітної мішалки (Ramachandiran, Elangovan, & Rajesh, 2021).

Hosny зі спіавтор. для біосинтезу наночастинок платини використовували екстракт листя трав'янистої рослини *Polygonum salicifolium*, яка є гідрофітним видом і росте в районі дельти Нілу в Єгипті. Встановлено, що в екстракті *Polygonum salicifolium* є глікозиди, флавоноїди, фенольні кислоти та інші фітокомпоненти, за рахунок яких і відбувається біовідновлення іонів платини (Hosny та ін., 2022).

Що стосується механізму біосинтезу наночастинок платини при використанні рослинної сировини, то показано, що важливу роль у цьому відіграють активні групи поліфенолів. Гідроксильні групи поліфенолів в орто- або пара-положенні беруть участь в окисно-відновних реакціях. Завдяки своїй здатності переносити протони та електрони фенольні сполуки окислюються і за допомогою хінонів, що виникають у результаті їх окислення, можуть виступати посередниками в окисленні інших сполук, які не реагують безпосередньо з киснем (Dobrucka, 2016). На першому етапі активні групи поліфенолів відновлюють іони Pt^{4+} до Pt^0 . Після чого відбувається формування наночастинок та їх стабілізація. На цей процес впливають амінні, гідроксильні і карбоксильні групи, які окислюються в процесі відновлення та стабілізації наночастинок, після чого починають покривати поверхню PtNPs. Також білки, терпеноїди, аміни, феноли, альдегіди, кетони та карбонові кислоти сприяють біогенному синтезу наночастинок платини (Ramachandiran, Elangovan, & Rajesh, 2021).

Двокомпонентні наночастинки платини і паладію (Pt-PdNPs). Нині актуальними є дослідження біосинтезу двокомпонентних наночастинок металів, оскільки вони характеризуються покращеними біологічними властивостями у порівнянні з монокомпонентними. Так, Fahmy зі спіавтор. отримали наночастинки платини-паладію (табл. 3) з використанням екстракту насіння *Peganum harmala* L. Ця рослина належить до сімейства *Zygophyllaceae*, у природних умовах росте на

Близькому Сході та в Північній Африці. Насіння *Peganum harmala* L. збагачене терапевтично активними алкалоїдами, у тому числі β -карболіновими та хіназоліновими, зокрема такими як гармін, гарман, гармол, гармалін, гармалол і пеганін. Також насіння містить оксигеновані монотерпени, антрахінони, флавоноїди та полісахариди, які відповідають за біовідновлення різних іонів металів. Біосинтезовані Pt-PdNPs мали більш виражену антиоксидантну та цитотоксичну активність порівняно з монокомпонентними наночастинками платини і паладію (Fahmy та ін., 2021). В іншому дослідженні встановлено більш високу каталітичну активність двокомпонентних наночастинок металів у порівнянні з монокомпонентними (Velidandi, Sarvepalli, Pabbathi, & Baadhe, 2021). Стосовно механізму біосинтезу двокомпонентних наночастинок, то показано, що алкалоїди через карбонільні групи зв'язують іони металів, відновлюють їх та беруть участь у формуванні наночастинок (Fahmy та ін., 2021).

Наночастинки паладію (PdNPs). Є ряд досліджень, де для біосинтезу наночастинок паладію використовують екстракти листя (Rabiee, 2020; Abdullah, 2021), квітів (Anand та ін., 2016), коріння (Al-Radadi, 2022) шкірок плодів (Akanda, 2021; Kalpana, 2018) та навіть натуральний сік (Rakibuddin, & Kim, 2018).

Досить часто під час вибору рослин для біосинтезу наночастинок автори звертають увагу на їх біологічні властивості та використання в різних галузях, зокрема у медицині. Так, різні частини чагарника *Barleria prionitis* досить часто використовують у традиційній медицині, зокрема при гнійних інфекціях, астмі, набряках тощо. При використанні екстракту листя *Barleria prionitis* були синтезовані наночастинки паладію (табл. 4), які показали протипухлинну дію *in vitro* (Rokade та ін., 2017). У 2020 р. вперше було показано можливість отримання PdNPs при використанні екстракту розмарину (*Rosmarinus officinalis*). Синтезовані наночастинки характеризувались широким спектром антимікробної дії, а також мали каталітичну активність у реакції Мізорокі-Гека (Rabiee, Bagherzadeh, Kiani, & Ghadiri, 2020). Екстракти листя чайного куща *Camellia sinensis* використовують як протизапальний засіб, а також для лікування різних захворювань, зокрема ожиріння, діабету, остеопорозу і раку. Дані екстракти містять велику кількість поліфенолів, особливо катехіну. Саме завдяки поліфенолам екстракти *Camellia sinensis* проявляють широкий спектр біологічних властивостей і характеризуються антиоксидантною, антимікробною та протипухлинною дією. Наночастинки паладію, які були синтезовані з використанням екстракту *Camellia sinensis*, також мали протипухлинну дію у дослідях *in vitro* та *in vivo* (Othman та ін., 2020). Екстракти *Saussurea costus* (трав'яниста рослина) містять алкалоїди, флавоноїди, терпени, антрахінони, лактони та інші біологічно активні сполуки, за рахунок яких вони мають противиразкові, антимікробні й антипухлинні властивості. Синтезовані з використанням екстракту *Saussurea costus* наночастинки паладію мали вищу ефективність біологічної дії, ніж самі рослинні екстракти (Al-Radadi, 2022). *Peganum harmala* L. є трав'янистою багаторічною рослиною. Насіння цієї рослини містить β -карболінові та хіназолінові алкалоїди, а також монотерпени, антрахінони, флавоноїди та полісахариди. Саме завдяки цьому насіння *Peganum harmala* L. має широкий спектр протимікробних, антиоксидантних і протиракових властивостей. Fahmy зі співавтор для біосинтезу наночастинок паладію (табл. 4) використовували алкалоїди, які були виділені з насіння цієї рослини (Fahmy та ін., 2021).

Таблиця 4. Властивості та біосинтез наночастинок паладію

Рослина	Характеристика наночастинок		Властивості наночастинок	Джерело
	Форма, розміри	Параметри біосинтезу		
Екстракти листя				
<i>Filicium decipiens</i>	Сферичні, 2—22 нм	21 °C, 4 дні	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Sharmila та ін., 2017
<i>Barleria prionitis</i>	Сферичні, 5—7 нм	100 °C, 5 год	Протипухлинна активність щодо клітин MCF-7 (рак молочної залози)	Rokade та ін., 2017
<i>Camellia sinensis</i>	Сферичні, 6—8 нм	40 °C, 2 год	Протипухлинна активність щодо клітин WENI-3В (мишачий мієлоцитарний лейкоз)	Othman та ін., 2020
<i>Rosmarinus officinalis</i>	Сферичні, 15—90 нм	22—25 °C (кімнатна), 24 год	Протикандидозна активність щодо <i>Candida parapsilosis</i> , <i>Candida albicans</i> , <i>Candida glabrata</i> , <i>Candida krusei</i> ; антибактеріальна дія щодо <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Micrococcus luteus</i> ; каталітична активність в реакції Мізорокі-Гека	Rabiee, Bagherzadeh, Kiani, & Ghadiri, 2020
<i>Aristolochia olivieri</i>	Сферичні, 32 нм	100 °C, 2 год	Каталітична активність щодо відновлення 4-нітротолуолу	Abdullah, Behrouzi, & Kaboudin, 2021
<i>Diospyros kaki</i>	Сферичні, 50—120 нм	70 °C, 25 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	Attar, & Altikatoglu Yapaoz, 2018
<i>Ananas comosus</i>	Кубічні, 1,71—16,14 нм	100 °C, (тривалість не вказана)	Фотокаталітична активність щодо деградації поліетиленової плівки	Olajire, & Mohammed, 2019
<i>Moringa oleifera</i>	Кубічні, 7—9 нм	80 °C, 4 год	Каталітична активність в реакції Судзукі-Міяура	Manjare, Pendhari, Badade, Thopate, & Thopate, 2022
Екстракт квітів				
<i>Moringa oleifera</i>	Сферичні, 2—18 нм	22—25 °C (кімнатна), 12 год	Протипухлинна активність щодо клітин A549 (карцинома легень); антибактеріальна дія щодо <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> ; протикандидозна активність щодо <i>Candida albicans</i> , <i>Candida utilis</i> ; каталітична активність щодо відновлення 4-нітрофенолу та метиленового синього	Anand та ін., 2016

Екстракт стебел				
<i>Cissus quadrangularis</i>	Сферичні, 12—26 нм	22—25 °C (кімнатна), 10 хв	Антибактеріальна активність щодо <i>Escherichia coli</i>	Anjana, Bindhu, Umadevi, & Rakhi, 2019
Екстракти шкірки плодів				
<i>Lagenaria siceraria</i>	Сферичні, 16—73 нм	60 °C, 3 год	Протидріжджова активність щодо <i>Malassezia furfur</i> , <i>Malassezia pachydermatis</i> ; інсектицидна активність по відношенню до <i>Sitophilus oryzae</i>	Kalpna, & Rajeswari, 2018
<i>Spondias mombin</i>	Сферичні, 30 нм	22—25 °C (кімнатна), 2 год	Каталітична активність щодо відновлення 4-нітрофенолу	Akanda, Hasan, Ema, & Aminul Haque, 2021
Екстракт коріння				
<i>Saussurea costus</i>	Сферичні, 1,9—17,6 нм	100 °C, 2 год	Протипухлинна активність щодо клітин HCT-116 (рак товстої кишки), MCF-7 (рак молочної залози), HepG2 (гепатоцелюлярна карцинома); антибактеріальна дія щодо <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ; антиоксидантна активність; протизапальна дія	Al-Radadi, 2022
Екстракт надземної частини				
<i>Pulicaria glutinosa</i>	Сферичні, 20—25 нм	90 °C, 120 хв	Каталітична активність в реакції Сузукі	Khan та ін., 2014
Алкалоїди насіння				
<i>Peganum harmala</i> L.	Сферичні, 16,8—28,2 нм	60 °C, 24 год	Протипухлинна активність щодо клітин A549 (карцинома легень) та MCF-7 (рак молочної залози); антиоксидантна активність щодо відновлення заліза	Fahmy та ін., 2021
Камедь				
<i>Anogeissus latifolia</i>	Сферичні, 2,3—7,5 нм	121 °C, 30 хв	Антиоксидантна активність; каталітична активність щодо відновлення кумасі діамантового синього G-250, метиленового синього, метилового помаранчевого	Kora, & Rastogi, 2018
Натуральні соки плодів, або рослин				
Яблуна	Сферичні, 15 нм	22—25 °C (кімнатна), 1 год	SERS-активність щодо виявлення метиленового синього у водних розчинах	Rakibuddin, & Kim, 2018
Апельсин	Сферичні, 2-5 нм			
Алое вера	Сферичні, 15-25 нм			

Є дослідження, що стосується використання фруктових дерев для біосинтезу наночастинок паладію, наприклад, екстрактів листя хурми (*Diospyros kaki*). Листя

Diospyros kaki містить олігомери флавоноїдів, фенольні та органічні кислоти, дубильні речовини, аскорбінову кислоту і кофеїн (Attar, & Altikatoglu Yapaöz, 2018). Akanda зі співавтор. для біосинтезу PdNPs використали водний екстракт шкірок ямайської сливи (*Spondias mombin*). Вони показали, що саме в кислому середовищі (pH=2) відбувається швидший синтез наночастинок у порівнянні з іншими значеннями pH (Akanda, Hasan, Ema, & Aminul Haque, 2021). Також є повідомлення про успішне використання екстракту шкірок гарбуза (*Lagenaria siceraria*) для біосинтезу PdNPs (Kalpana, & Rajeswari, 2018).

Anand зі співавтор. для біосинтезу PdNPs використовували водний екстракт квітів *Moringa oleifera*. *Moringa oleifera* — дерево, що росте у субтропічному і тропічному кліматі на різних континентах. Практично всі частини цього дерева використовують у фітотерапії, а з насіння виготовляють морингову олію, яку використовують у косметології та кулінарії. Хімічний склад екстракту квітів *Moringa oleifera* не є стабільним, але в основному у ньому містяться фталати, монотерпени та інші похідні довголанцогових жирних кислот, які можуть відновлювати іони Pd^{2+} до Pd^0 (Anand та ін., 2016).

Цікавим є дослідження біосинтезу PdNPs з використанням розчину природного рослинного полімеру камеді гхаті з *Anogeissus latifolia* (табл. 4). Камедь гхаті широко використовується як сполучна речовина, емульгатор, фіксатор смаку, стабілізатор і загусник. В ході досліджень з біосинтезу наночастинок було встановлено, що при автоклавуванні за рахунок розширення біополімеру функціональні групи камеді стають більш доступними для іонів паладію. При цьому біосинтезовані наночастинок не проявили антибактеріальної дії щодо *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 та *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, проте показали підвищену антиоксидантну (табл. 4) та каталітичну активність (Kora, & Rastogi, 2015).

Під час досліджень, що стосуються механізму біосинтезу наночастинок паладію, було встановлено, що такі фітохімічні речовини, як стероїди, сапоніни, дубильні речовини, алкалоїди, флаваноїди та фенольні сполуки можуть діяти як відновлюючі та стабілізуючі агенти. Зокрема, їх карбоксильні, амінні, карбонільні та амідні групи є відповідальними за біовідновлення іонів паладію та формування наночастинок (Khan, 2014; Sharmila, 2017; Abdullah, 2021). Інші автори повідомили, що аміди, гідроксили та глікозиди відповідальні за відновлення іонів паладію (Al-Radadi, 2022). Є припущення, що гідроксильні та карбоксильні групи утворюють комплекси з іонами паладію, які далі можуть бути відновлені до елементарного паладію за допомогою альдегідних груп. Після чого наночастинок стабілізуються за допомогою білків і полісахаридів (Kora, 2015; Rokade, 2017). Велику кількість гідроксильних груп містять такі фенольні сполуки, як таніни. Показано можливий механізм реакції утворення PdNPs при взаємодії таніну з іонами паладію, які приймають електрони ароматичного кільця таніну на свої вакантні d-орбіталі і перетворюється на вільні атоми паладію. Після чого відбувається формування наночастинок та їх стабілізація (Olajire, & Mohammed, 2019). Також флавоноїди та інші фітохімічні сполуки можуть брати участь у стабілізації наночастинок і перешкоджають формуванню агрегатів (Akanda, Hasan, Ema, & Aminul Haque, 2021). За ефективну стабілізацію біосинтезованих наночастинок

паладію, отриманих з використанням рослинних екстрактів, також можуть відповідати терпеноїди (Manjare, Pendhari, Badade, Thorate, & Thorate, 2022). Показано, що також цукри та поліоли діють як стабілізатори PdNPs, взаємодіючи з поверхнею наночастинок (Rakibuddin, & Kim, 2018).

Наночастинки інших благородних металів. У 2023 р. вперше були отримані наночастинки іридію (IrNPs) з використанням екстракту виноградних вичавок, які є відходом виноробного виробництва. Виноградні вичавки містять велику кількість цукрів, поліфенольних сполук і пігментів, які можуть брати участь у відновленні іонів металів та формуванні наночастинок. Автори дослідили вплив температури екстракції (45, 65, 80 і 100 °C) на вміст загальних фенолів і цукрів в екстракті. Було показано, що з підвищенням температури екстракції їх вміст зростає, що сприяє подальшому біосинтезу наночастинок іридію. Також слід відмітити, що при використанні екстрактів вичавок, отриманих за різних температур, були отримані IrNPs майже однакової форми та розмірів. Тобто температура екстракції не впливала на подальші параметри синтезованих наночастинок. Умови біосинтезу IrNPs були такими: 80 °C, 5 годин. При цьому автори отримали наночастинки іридію сферичної форми з розмірами 3,0—4,5 нм, які показали високу каталітичну активність (Mergola, Carbone, Stomeo, & Del Sole, 2023).

Murraya koenigii — вічнозелене дерево карі, що росте у тропічних та субтропічних лісах. З використанням екстрактів листя *Murraya koenigii* були синтезовані моно- та біметалічні наночастинки оксидів металів — іридію (IrO₂NPs) та іридію-олова (Ir-SnO₂NPs). Вони мали різну форму та розміри. Так, IrO₂NPs були кубічної форми з розміром 20 нм, а біметалеві Ir-SnO₂NPs мали різну форму — псевдосферичну та стрижнеподібну з розмірами 1,23 нм (Goel, & Tomar, 2022).

З використанням водного екстракту листя багаторічної трав'янистої рослини *Gloriosa superba* були синтезовані наночастинки рутенію (RuNPs). Основними компонентами екстракту цієї рослини є холідон, супербін, колхіцин, глоріозол, фітостерил і стигмастерин, які беруть участь у відновленні іонів рутенію, а також формуванні та стабілізації наночастинок. Біосинтез RuNPs здійснювали за таких параметрів: температура 100 °C, тривалість 20 хв. При цьому були отримані сферичні наночастинки в діапазоні розмірів від 25 до 90 нм, які характеризувались антибактеріальною активністю щодо грампозитивних клітин *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus* та *Streptococcus pneumoniae* (Gopinath та ін., 2014).

Є дослідження, що стосуються біосинтезу наночастинок оксиду рутенію (RuO₂NPs) з використанням рослин. Так, Ismail зі співавтор. використовували екстракт листя чагарника *Aspalathus linearis* для біосинтезу RuO₂NPs. Екстракти містять фенольні сполуки: аспалатин, дигідрохалкон, флаволи, флаванони та флавоноли. Біосинтез наночастинок здійснювали при кімнатній температурі упродовж 2 годин. У результаті були отримані сферичні RuO₂NPs із середнім діаметром 2,15 нм (Ismail, Diallo, Khenfouch, Dhlamini, & Maaza, 2016). В інших дослідженнях для біосинтезу RuO₂NPs використовували корінь трав'янистої багаторічної рослини *Anacyclus pyrethrum*, екстракт якого містить різноманітні складові. Зокрема, мова йде про наявність жирних кислот, стеролу, ненасичених вуглеводнів, а також пеліторину, анацикліну, фенілетиламіду, інуліну, поліацетиленових амідів I-IV, сезаміну, дубильних речовин та ефірної олії. Є припущення, що ці

фітохімічні речовини можуть брати участь у біовідновленні та стабілізації наночастинок оксиду рутенію (Nisha, Vidyalakshmi, & Razack, 2020). Також сферичні RuO_2NPs з розмірами 6—25 нм були синтезовані з використанням екстракту листя однорічної трав'янистої рослини *Acalypha indica* за таких параметрів біосинтезу: температура 80 °C, тривалість 2 години. Показано, що наночастинок оксиду рутенію можуть використовуватись як ефективні інгібітори росту та розмноження різних мікроорганізмів. Вони мають антибактеріальну активність щодо грампозитивних і грамнегативних бактерій. Так, біосинтезовані RuO_2NPs характеризувались антибактеріальною дією щодо *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Serratia marcescens*, *Staphylococcus aureus*. Механізм бактерицидної дії цих наночастинок на сьогодні не дуже відомий. Проте вважається, що RuO_2NPs після проникнення до бактеріальних клітин інактивують їхні ферменти, в результаті чого пригнічується клітинний метаболізм, що призводить до загибелі мікроорганізму (Kannan, & Sundrarajan, 2015).

Висновки

Перевагами використання рослин для біосинтезу наночастинок є те, що рослинні екстракти можна приготувати із висушених частин рослин, а також можна висушити самі екстракти, і в подальшому їх розчиняти для самого біосинтезу. Недоліком є те, що склад рослинних екстрактів непостійний. Він залежить від природних умов, місця та часу збору рослинних зразків тощо. Для біосинтезу наночастинок благородних металів (золота, срібла, платини, паладію, рутенію, іридію), крім рослинних екстрактів, можна використовувати рослинні поліфеноли, алкалоїди, камеді та соки, а також ефірні олії. При цьому наявні у екстрактах сполуки (сапоніни, терпеноїди, стероїди, поліоли, поліфеноли, алкалоїди, альдегіди, кетони, білки, цукри) виступають у ролі відновників іонів металів, а також беруть участь у формуванні наночастинок та їх стабілізації.

Синтезовані з використанням рослин наночастинок благородних металів проявляють різні властивості: вони мають протипухлинну, антибактеріальну та протигрибкову дію; доведена їх антиоксидантна та каталітична активність, а також знеболювальна дія. При цьому властивості наночастинок залежать від умов біосинтезу, їх форми та розмірів.

Важливо зазначити, що багато аспектів біосинтезу наночастинок при використанні рослинної сировини залишаються предметом подальших досліджень. Наприклад, механізми біосинтезу наночастинок благородних металів і механізми взаємодії рослинних сполук з іонами металів та їх роль у процесі синтезу до кінця не вивчені. На сьогодні дуже мало досліджень, що стосуються біосинтезу іридію та рутенію з використанням рослин. І нам не вдалось знайти наукових праць, що стосуються біосинтезу таких металів платинової групи, як родій та осмій саме при використанні рослинних компонентів.

Література

Скороцька, О. І., & Марченко, В. В. (2023). Біосинтез наночастинок благородних металів. Частина 1. Використання грибів, дріжджів та бактерій. *Наукові праці НУХТ*, 29(3), 50—72. doi: 10.24263/2225-2924-2023-29-3-6.

Скороцька, О. І., Марченко, В. В., & Коваль, Р. В. (2023). Біосинтез наночастинок благородних металів. Частина 2. Використання ціанобактерій водоростей. *Наукові праці НУХТ*, 29(4), 61—84. doi: 10.24263/2225-2924-2023-29-4-7.

Abdullah, F. O., Behrouzi, L., & Kaboudin, B. (2021). A novel synthesis of highly stable palladium nanoparticles and their application in the reduction of nitroaromatic compounds. *Mater. Res. Exp.*, 8(9), 095002. doi: 10.1088/2053-1591/ac1fb8.

Akanda, R., Hasan, M., Ema, U. H., & Aminul Haque, M. (2021). Optimization of *Spondias mombin* peel extract mediated synthesis of palladium nanoparticles as nanozyme exhibits potent multienzyme activity. *J. Iran Chem. Soc.*, 18(12), 3407—3415. doi: 10.1007/s13738-021-02278-w.

Aktepe, N., & Baran, A. (2021a). Biosynthesis of AgNPs by extract from waste leaves of *Citrullus lanatus* sp. (watermelon); characterization, antibacterial and antifungal effects. *Prog. Nutr.*, 23(3), e2021243. doi: 10.23751/pn.v23i3.11907.

Aktepe, N., & Baran, A. (2021b). Fast and low-cost biosynthesis of AgNPs with almond leaves: medical applications with biocompatible structures. *Prog. Nutr.*, 23(3), e2021271. doi: 10.23751/pn.v23i3.11996.

Ali, S. G., Ansari, M. A., Alzohairy, M. A., Alomary, M. N., AlYahya, S., Jalal, M., ..., El-Meligy, M. A. (2020). Biogenic gold nanoparticles as potent antibacterial and antibiofilm nano-antibiotics against *Pseudomonas aeruginosa*. *Antibiotics*, 9(3), 100. doi: 10.3390/antibiotics9030100.

Al-Radadi, N. S. (2022). *Saussurea costus* for sustainable and eco-friendly synthesis of palladium nanoparticles and their biological activities. *Arab. J. Chem.*, 15(11), 104294. doi: 10.1016/j.arabjc.2022.104294.

Alshahrani, M. Y., & Ibrahim, E. H. (2022). Gold nanoparticles (AuNPs) and *Rosmarinus officinalis* extract and their potentials to prompt apoptosis and arrest cell cycle in HT-29 colon cancer cells. *J. King. Saud. Univ. Sci.*, 34(8), 102304. doi: 10.1016/j.jksus.2022.102304.

Alshahrani, M. Y., Rafi, Z., Alabdallah, N. M., Shoaib, A., Ahmad, I., Asiri, M., ..., Khan, S. (2021). A comparative antibacterial, antioxidant, and antineoplastic potential of *Rauwolfia serpentina* (L.) leaf extract with its biologically synthesized gold nanoparticles (R-AuNPs). *Plants*, 10(11), 2278. doi: 10.3390/plants10112278.

Anand, K., Tiloke, C., Phulukdaree, A., Ranjan, B., Chuturgoon, A., Singh, S., & Gengan, R. M. (2016). Biosynthesis of palladium nanoparticles by using *Moringa oleifera* flower extract and their catalytic and biological properties. *J. Photochem. Photobiol. B*, 165, 87—95. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2016.09.039.

Anjana, P. M., Bindhu, M. R., Umadevi, M., & Rakhi, R. B. (2019). Antibacterial and electrochemical activities of silver, gold, and palladium nanoparticles dispersed amorphous carbon composites. *Appl. Surf. Sci.*, 479, 96—104. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.02.057.

Attar, A., & Altikatoglu Yapaoz, M. (2018). Biosynthesis of palladium nanoparticles using *Diospyros kaki* leaf extract and determination of antibacterial efficacy. *Prep. Biochem. Biotechnol.*, 48(7), 629—634. doi: 10.1080/10826068.2018.1479862.

Baran, A., Keskin, C., Baran, M. F., Huseynova, I., Khalilov, R., Eftekhari, A., ..., Kavak, D. E. (2021). Ecofriendly synthesis of silver nanoparticles using ananas comosus fruit peels: anticancer and antimicrobial activities. *Bioinorg. Chem. Appl.*, 2021, 2058149. doi: 10.1155/2021/2058149.

Baran, A., Fırat Baran, M., Keskin, C., Hatipoglu, A., Yavuz, O., İrtegün Kandemir, S., ..., Eftekhari, A. (2022). Investigation of antimicrobial and cytotoxic properties and specification of silver nanoparticles (AgNPs) derived from *Cicer arietinum* L. green leaf extract. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 10, 263. doi: 10.3389/fbioe.2022.855136.

Baran, M. F., Keskin, C., Baran, A., Eftekhari, A., Omarova, S., Khalilov, R., ..., Atalar, M. N. (2023). The investigation of the chemical composition and applicability of gold nanoparticles synthesized with *Amygdalus communis* (Almond) leaf aqueous extract as antimicrobial and anticancer agents. *Molecules*, 28(6), 2428. doi: 10.3390/molecules28062428.

Bawazeer, S., Khan, I., Rauf, A., Aljohani, A. S., Alhumaydhi, F. A., Khalil, A. A., ..., Khan, S. A. (2022). Black pepper (*Piper nigrum*) fruit-based gold nanoparticles (BP-AuNPs): Synthesis, characterization, biological activities, and catalytic applications — A green approach. *Green Process. Synth.*, 11(1), 11—28. doi: 10.1515/gps-2022-0002.

- Bindhu, M. R., & Umadevi, M. (2015). Antibacterial and catalytic activities of green synthesized silver nanoparticles. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.*, 135, 373—378. doi: 10.1016/j.saa.2014.07.045.
- Datkhile, K. D., Patil, S. R., Durgawale, P. P., Patil, M. N., Hinge, D. D., Jagdale, N. J., ..., More, A. L. (2021). Biogenic synthesis of gold nanoparticles using *Argemone mexicana* L. and their cytotoxic and genotoxic effects on human colon cancer cell line (HCT-15). *J. Genet. Eng. Biotechnol.*, 19, 9. doi: 10.1186/s43141-020-00113-y.
- Dauthal, P., & Mukhopadhyay, M. (2015). Biofabrication, characterization, and possible bio-reduction mechanism of platinum nanoparticles mediated by agro-industrial waste and their catalytic activity. *J. Ind. Eng. Chem.* 22, 185—191. doi: 10.1016/j.jiec.2014.07.009.
- Dobrucka, R., Romaniuk-Drapała, A., & Kaczmarek, M. (2019). Evaluation of biological synthesized platinum nanoparticles using *Ononidis radix* extract on the cell lung carcinoma A549. *Biomed. Microdevices*, 21, 75. doi: 10.1007/s10544-019-0424-7.
- Dobrucka, R. (2016). Synthesis and structural characteristic of platinum nanoparticles using herbal *Bidens tripartitus* extract. *J. Inorg. Organomet. Polym.*, 26, 219—225. doi: 10.1007/s10904-015-0305-3.
- Dzimitrowicz, A., Berent, S., Motyka, A., Jamroz, P., Kurbach, K., Sledz, W., & Pohl, P. (2019). Comparison of the characteristics of gold nanoparticles synthesized using aqueous plant extracts and natural plant essential oils of *Eucalyptus globulus* and *Rosmarinus officinalis*. *Arab. J. Chem.*, 12(8), 4795—4805. doi: 10.1016/j.arabjc.2016.09.007.
- Fahmy, S. A., Fawzy, I. M., Saleh, B. M., Issa, M. Y., Bakowsky, U., & Azzazy, H. M. E. S. (2021). Green synthesis of platinum and palladium nanoparticles using Peganum harmala L. seed alkaloids: Biological and computational studies. *Nanomaterials*, 11(4), 965. doi: 10.3390/nano11040965.
- Fanoro, O. T., Parani, S., Maluleke, R., Lebepe, T. C., Varghese, J. R., Mavumengwana, V., & Oluwafemi, O. S. (2021). Facile green, room-temperature synthesis of gold nanoparticles using *Combretum erythrophyllum* leaf extract: antibacterial and cell viability studies against normal and cancerous cells. *Antibiotics*, 10(8), 893. doi: 10.3390/antibiotics10080893.
- Goel, A., & Tomar, S. (2022). Green synthesis and characterization of *Murraya koenigii* leaf extract mediated IrO₂, SnO₂, and Ir-SnO₂ nanoparticles. *Inorg. Nano-Met. Chem.* doi: 10.1080/24701556.2022.2034016.
- Gopinath, K., Karthika, V., Gowri, S., Senthilkumar, V., Kumaresan, S., & Arumugam, A. (2014). Antibacterial activity of ruthenium nanoparticles synthesized using *Gloriosa superba* L. leaf extract. *J. Nanostruct. Chem.*, 4, 83. doi: 10.1007/s40097-014-0083-4.
- Hosny, M., Fawzy, M., El-Fakharany, E. M., Omer, A. M., Abd El-Monaem, E. M., Khalifa, R. E., & Eltaweil, A. S. (2022). Biogenic synthesis, characterization, antimicrobial, antioxidant, antidiabetic, and catalytic applications of platinum nanoparticles synthesized from *Polygonum salicifolium* leaves. *J. Environ. Chem. Eng.*, 10(1), 106806. doi: 10.1016/j.jece.2021.106806.
- Ibrahim, H. M. M. (2015). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using banana peel extract and their antimicrobial activity against representative microorganisms. *J. Radiat. Res.*, 8(3), 265—275. doi: 10.1016/j.jrras.2015.01.007.
- Iravani, S., & Zolfaghari, B. (2013). Green synthesis of silver nanoparticles using *Pinus eldarica* bark extract. *Biomed Res. Int.*, 2023, 639725. doi: 10.1155/2013/639725.
- Ismail, E., Diallo, A., Khenfouch, M., Dhlamini, S. M., & Maaza, M. (2016). RuO₂ nanoparticles by a novel green process via *Aspalathus linearis* natural extract & their water splitting response. *J. Alloys Compd.*, 662, 283—289. doi: 10.1016/j.jallcom.2015.11.234.
- Jyoti, K., Baunthiyal, M., & Singh, A. (2016). Characterization of silver nanoparticles synthesized using *Urtica dioica* Linn. leaves and their synergistic effects with antibiotics. *J. Radiat. Res.*, 9(3), 217—227. doi: 10.1016/j.jrras.2015.10.002.
- Kalpna, V. N., & Rajeswari, V. D. (2018). Synthesis of palladium nanoparticles via a green route using *Lagenaria siceraria*: assessment of their innate antidandruff, insecticidal and degradation activities. *Mat. Res. Express*, 5(11), 115406. doi: 10.1088/2053-1591/aaddef.

Kannan, S. K., & Sundrarajan, M. (2015). Green synthesis of ruthenium oxide nanoparticles: Characterization and its antibacterial activity. *Adv. Powder Technol.*, 26(6), 1505—1511. doi: 10.1016/j.appt.2015.08.009.

Keskin, C., Baran, A., Baran, M. F., Hatipoglu, A., Adican, M. T., Atalar, M. N., ..., Eftekhari, A. (2022). Green synthesis, characterization of gold nanomaterials using *Gundelia tournefortii* leaf extract, and determination of their nanomedicinal (antibacterial, antifungal, and cytotoxic) potential. *J. Nanomater.*, 2022. doi: 10.1155/2022/7211066.

Ke, Y., Al Aboody, M. S., Alturaiki, W., Alsagaby, S. A., Alfaiz, F. A., Veeraraghavan, V. P., & Mickymaray, S. (2019). Photosynthesized gold nanoparticles from *Catharanthus roseus* induces caspase-mediated apoptosis in cervical cancer cells (HeLa). *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 47(1), 1938—1946. doi: 10.1080/21691401.2019.1614017.

Khan, M., Khan, M., Kuniyil, M., Adil, S. F., Al-Warthan, A., Alkhatlan, H. Z., ..., Siddiqui, M. R. H. (2014). Biogenic synthesis of palladium nanoparticles using *Pulicaria glutinosa* extract and their catalytic activity towards the Suzuki coupling reaction. *Dalton Trans.*, 43(24), 9026—9031. doi: 10.1039/C3DT53554A.

Khatua, A., Prasad, A., Priyadarshini, E., Patel, A. K., Naik, A., Saravanan, M., ..., Meena, R. (2020a). Emerging antineoplastic plant-based gold nanoparticle synthesis: a mechanistic exploration of their anticancer activity toward cervical cancer cells. *J. Clust. Sci.*, 31, 1329—1340. doi: 10.1007/s10876-019-01742-1.

Khatua, A., Priyadarshini, E., Rajamani, P., Patel, A., Kumar, J., Naik, A., ..., Meena, R. (2020b). Phytosynthesis, characterization and fungicidal potential of emerging gold nanoparticles using *Pongamia pinnata* leave extract: a novel approach in nanoparticle synthesis. *J. Clust. Sci.*, 31, 125—131. doi: 10.1007/s10876-019-01624-6.

Khuda, F., Haq, Z. U., Ilahi, I., Ullah, R., Khan, A., Fouad, H., ..., Batiha, G. E. S. (2021). Synthesis of gold nanoparticles using *Sambucus wightiana* extract and investigation of its antimicrobial, anti-inflammatory, antioxidant and analgesic activities. *Arab. J. Chem.*, 14(10), 103343. doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103343.

Kora, A. J., & Rastogi, L. (2018). Green synthesis of palladium nanoparticles using gum ghatti (*Anogeissus latifolia*) and its application as an antioxidant and catalyst. *Arab. J. Chem.*, 11(7), 1097—1106. doi: 10.1016/j.arabjc.2015.06.024.

Li, L., Zhang, W., Desikan Seshadri, V. D., & Cao, G. (2019). Synthesis and characterization of gold nanoparticles from *Marsdenia tenacissima* and its anticancer activity of liver cancer HepG2 cells. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 47(1), 3029—3036. doi: 10.1080/21691401.2019.1642902.

Liu, B., Li, C., Han, J., Chen, Y., Zhao, Z., & Lu, H. (2023). Biosynthesized gold nanoparticles using leaf extract of *Citrus medica* inhibit hepatocellular carcinoma through regulation of the Wnt/ β -catenin signaling pathway. *Arab. J. Chem.*, 16(8), 104800. doi: 10.1016/j.arabjc.2023.104800.

Liu, Y., Kim, S., Kim, Y. J., Perumalsamy, H., Lee, S., Hwang, E., & Yi, T. H. (2019). Green synthesis of gold nanoparticles using *Euphrasia officinalis* leaf extract to inhibit lipopolysaccharide-induced inflammation through NF- κ B and JAK/STAT pathways in RAW 264.7 macrophages. *Int. J. Nanomedicine*, 14, 2945. doi: 10.2147/IJN.S199781.

Malaikolundhan, H., Mookkan, G., Krishnamoorthi, G., Matheswaran, N., Alsawalha, M., Veeraraghavan, V. P., ..., Di, A. (2020). Anticarcinogenic effect of gold nanoparticles synthesized from *Albizia lebbeck* on HCT-116 colon cancer cell lines. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 48(1), 1206—1213. doi: 10.1080/21691401.2020.1814313.

Manjare, S. B., Pendhari, P. D., Badade, S. M., Thopate, S. R., & Thopate, M. S. (2022). Biosynthesis of palladium nanoparticles from *Moringa oleifera* leaf extract supported on activated bentonite clay and its efficacy towards Suzuki–Miyaura coupling and oxidation reaction. *BioNanoSci.*, 12(3), 785—794. doi: 10.1007/s12668-022-01011-y.

Mergola, L., Carbone, L., Stomeo, T., & Del Sole, R. (2023). Green synthesis of iridium nanoparticles from winery waste and their catalytic effectiveness in water decontamination. *Materials*, 16(5), 2060. doi: 10.3390/ma16052060.

- Mubeen, B., Rasool, M. G., Ullah, I., Rasool, R., Imam, S. S., Alshehri, S., ..., Kazmi, I. (2022). Phytochemicals mediated synthesis of AuNPs from *Citrullus colocynthis* and their characterization. *Molecules*, 27(4), 1300. doi: 10.3390/molecules27041300.
- Mustapha, T., Misni, N., Ithnin, N. R., Daskum, A. M., & Unyah, N. Z. (2022). A review on plants and microorganisms mediated synthesis of silver nanoparticles, role of plants metabolites and applications. *Int. J. Environ. Health Res.*, 19(2), 674. doi: 10.3390/ijerph19020674.
- Nisha, B., Vidyalakshmi, Y., & Razack, S. A. (2020). Enhanced formation of ruthenium oxide nanoparticles through green synthesis for highly efficient supercapacitor applications. *Adv. Powder Technol.*, 31(3), 1001—1006. doi: 10.1016/j.apt.2019.12.026.
- Olajire, A. A., & Mohammed, A. A. (2019). Green synthesis of palladium nanoparticles using *Ananas comosus* leaf extract for solid-phase photocatalytic degradation of low density polyethylene film. *J. Environ. Chem. Eng.*, 7(4), 103270. doi: 10.1016/j.jece.2019.103270.
- Othman, H., Rahman, H., Mohan, S., Aziz, S., Marif, H., Ford, D., ..., Abdullah, R. (2020). Antileukemic effect of palladium nanoparticles mediated by white tea (*Camellia sinensis*) extract in vitro and in wehi-3b-induced leukemia in vivo. *Evid. Based. Complement. Alternat. Med.*, 2020. doi: 10.1155/2020/8764096.
- Oueslati, M. H., Ben Tahar, L., & Harrath, A. H. (2020). Synthesis of ultra-small gold nanoparticles by polyphenol extracted from *Salvia officinalis* and efficiency for catalytic reduction of p-nitrophenol and methylene blue. *Green Chem. Lett. Rev.*, 13(1), 18—26. doi: 10.1080/17518253.2019.1711202.
- Pathania, D., Sharma, M., Thakur, P., Chaudhary, V., Kaushik, A., Furukawa, H., & Khosla, A. (2022). Exploring phytochemical composition, photocatalytic, antibacterial, and antifungal efficacies of Au NPs supported by *Cymbopogon flexuosus* essential oil. *Sci. Rep.*, 12(1), 14249. doi: 10.1038/s41598-022-15899-9.
- Patil, M. P., Jin, X., Simeon, N. C., Palma, J., Kim, D., Ngabire, D., ..., Kim, G. D. (2018). Anti-cancer activity of *Sasa borealis* leaf extract-mediated gold nanoparticles. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 46(1), 82—88. doi: 10.1080/21691401.2017.1293675.
- Patil, M. P., Seo, Y. B., Lim, H. K., & Kim, G. D. (2019). Biofabrication of gold nanoparticles using *Agrimonia pilosa* extract and their antioxidant and cytotoxic activity. *Green Chem. Lett. Rev.*, 12(3), 208—216. doi: 10.1080/17518253.2019.1623927.
- Rabiee, N., Bagherzadeh, M., Kiani, M., & Ghadiri, A. M. (2020). *Rosmarinus officinalis* directed palladium nanoparticle synthesis: investigation of potential anti-bacterial, anti-fungal and Mizoroki-Heck catalytic activities. *Adv. Powder Technol.*, 31(4), 1402—1411. doi: 10.1016/j.apt.2020.01.024.
- Rakibuddin, M., & Kim, H. (2018). Facile green syntheses of palladium nanoparticles using fruit and aloe vera juices, and their surface-enhanced Raman scattering (SERS) activities. *Mat. Res. Express*, 5(8), 085001. doi: 10.1088/2053-1591/aad0db.
- Ramachandiran, D., Elangovan, M., & Rajesh, K. (2021). Structural, optical, biological and photocatalytic activities of platinum nanoparticles using *Salix tetrasperma* leaf extract via hydrothermal and ultrasonic methods. *Optik*, 244, 167494. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167494.
- Rokade, S. S., Joshi, K. A., Mahajan, K., Tomar, G., Dubal, D. S., Singh, V., ..., Ghosh, S. (2017). Novel anticancer platinum and palladium nanoparticles from *Barleria prionitis*. *Glob. J. Nano.*, 2(5), 555600. doi: 10.19080/GJN.2017.02.555600.
- Sabapathi, N., Ramalingam, S., Aruljothi, K. N., Lee, J., & Barathi, S. (2023). Characterization and therapeutic applications of biosynthesized silver nanoparticles using *Cassia auriculata* flower extract. *Plants*, 12(4), 707. doi: 10.3390/plants12040707.
- Sadalage, P. S., Dar, M. A., Bhor, R. D., Bhalerao, B. M., Kamble, P. N., Paiva-Santos, A. C., ..., Pawar, K. D. (2022). Optimization of biogenic synthesis of biocompatible platinum nanoparticles with catalytic, enzyme mimetic and antioxidant activities. *Food Biosci.*, 50, 102024. doi: 10.1016/j.fbio.2022.102024.
- Sahin, B., Aygun, A., Gunduz, H., Sahin, K., Demir, E., Akocak, S., & Sen, F. (2018). Cytotoxic effects of platinum nanoparticles obtained from pomegranate extract by the green synthesis method on the MCF-7 cell line. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 163, 119—124. doi: 10.1016/j.colsurfb.2017.12.042.

Sharma, M., Thakur, P., Saini, R. V., Kumar, R., & Torino, E. (2020). Unveiling antimicrobial and anticancerous behavior of AuNPs and AgNPs moderated by rhizome extracts of *Curcuma longa* from diverse altitudes of Himalaya. *Sci. Rep.*, 10(1), 10934. doi: 10.1038/s41598-020-67673-4.

Sharmila, G., Fathima, M. F., Haries, S., Geetha, S., Kumar, N. M., & Muthukumaran, C. (2017). Green synthesis, characterization and antibacterial efficacy of palladium nanoparticles synthesized using *Filicium decipiens* leaf extract. *J. Mol. Struct.*, 1138, 35—40. doi: 10.1016/j.molstruc.2017.02.097.

Shirzadi-Ahodashi, M., Mizwari, Z. M., Mohammadi-Aghdam, S., Ahmadi, S., Ebrahimzadeh, M. A., & Mortazavi-Derazkola, S. (2023). Optimization and evaluation of anticancer, antifungal, catalytic, and antibacterial activities: Biosynthesis of spherical-shaped gold nanoparticles using *Pistacia vera* hull extract (AuNPs@ PV). *Arab. J. Chem.*, 16(1), 104423. doi: 10.1016/j.arabjc.2022.104423.

Singh, L., Antil, R., & Dahiya, P. (2021). Antimicrobial and antioxidant potential of *Vernonia cinerea* extract coated AuNPs. *Indian J. Microbiol.*, 61, 506—518. doi: 10.1007/s12088-021-00976-w.

Sun, B., Hu, N., Han, L., Pi, Y., Gao, Y., & Chen, K. (2019). Anticancer activity of green synthesised gold nanoparticles from *Marsdenia tenacissima* inhibits A549 cell proliferation through the apoptotic pathway. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 47(1), 4012—4019. doi: 10.1080/21691401.2019.1575844.

Velidandi, A., Sarvepalli, M., Pabbathi, N. P. P., & Baadhe, R. R. (2021). Biogenic synthesis of novel platinum-palladium bimetallic nanoparticles from aqueous *Annona muricata* leaf extract for catalytic activity. *3 Biotech*, 11(8), 385. doi: 10.1007/s13205-021-02935-0.

Wang, L., Xu, J., Yan, Y., Liu, H., Karunakaran, T., & Li, F. (2019). Green synthesis of gold nanoparticles from *Scutellaria barbata* and its anticancer activity in pancreatic cancer cell (PANC-1). *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 47(1), 1617—1627. doi: 10.1080/21691401.2019.1594862.

Wu, T., Duan, X., Hu, C., Wu, C., Chen, X., Huang, J., ..., Cui, S. (2019). Synthesis and characterization of gold nanoparticles from *Abies spectabilis* extract and its anticancer activity on bladder cancer T24 cells. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 47(1), 512—523. doi: 10.1080/21691401.2018.1560305.