

УДК 633:546.3-022.532:581.1

НАНОЧАСТИНКИ РІЗНОЇ ПРИРОДИ В РОСЛИННІЙ БІОТЕХНОЛОГІЇ: ЕФЕКТИВНІСТЬ, БЕЗПЕЧНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

С.В. ПРИЛУЦЬКА¹, Т.А. ТКАЧЕНКО¹, В.В. ТКАЧЕНКО¹, В.М. КИРИЛЕНКО², А.І. ЄМЕЦЬ^{2*}

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, 03041, Україна, Київ, вул. Героїв Оборони, 15

² ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України», 04123, Україна, Київ, вул. Байди-Вишневецького, 2А

Автор для кореспонденції: А.І. Ємець, e-mail: yemets.alla@nas.gov.ua

Узагальнено дані щодо біологічної активності наночастинок різної природи – металевих (Ag, Cu, Zn, Ti), кремнієвих (Si) та вуглецевих наноматеріалів – на рослини. Розглянуто їх вплив на ріст, розвиток і стійкість рослин до біотичних і абіотичних стресів на молекулярному, клітинному і організменному рівнях. Особливу увагу приділено наночастинкам, отриманими шляхом «зеленого» синтезу, які характеризуються високою біоактивністю, біосумісністю, стабільністю та екологічною безпечністю. Проаналізовано фізіолого-біохімічні ефекти дії наночастинок, зокрема їхній вплив на проростання насіння, фотосинтетичну активність, антиоксидантну систему, експресію стрес-індукованих генів, тощо. Продемонстровано, що біосинтезовані наночастинки у більшості випадків спричиняють позитивний вплив без проявів токсичності, тоді як хімічно синтезовані аналоги можуть викликати суттєві негативні зміни у рослин. Підкреслено переваги біосинтезованих наночастинок: високий рівень їх екологічної безпеки, фунгіцидну, антибактеріальну та антивірусну активність, а також необхідність подальших досліджень для оптимізації дозування, способів застосування та оцінки довготривалих ефектів наноматеріалів з урахуванням балансу між ефективністю та екологічною безпекою. Отримані результати підкреслюють перспективність використання наноматеріалів у клітинній біології, фізіології та біотехнології рослин.

Ключові слова: наночастинки металів, біосинтез, фуллерени, графен, одно- та багатошарові нанотрубки, рослини, стрес.

Вступ. Перспективним напрямком при вирощуванні рослин є використання інноваційних

нанобіотехнологічних підходів. Наночастинки різної природи (металів, органічні та вуглецеві) проявляють стимулюючу дію на ріст і розвиток рослин, інгібують негативну дію шкідників та патогенів сільськогосподарських культур, а також підвищують стійкість рослин до дії стресових факторів біотичної та абіотичної природи. Одним із останніх досягнень нанотехнологій є біогенні або так звані «зелені» наночастинки. Перевагою останніх є їх синтез з використанням природних джерел (рослинні екстракти, мікроорганізми), а також вища біосумісність з живими об'єктами та навколишнім середовищем. Наночастинки можна отримати різними методами, і хімічними, і фізичними, і біологічними (рис. 1). Хімічні і фізичні методи синтезу наночастинок передбачають застосування досить токсичних і агресивних хімічних речовин, які потенційно можуть нести небезпеку для довкілля. Окрім того, відновлюючі чи блокуючі сполуки, які використовуються у хімічних та фізичних методах, є досить вартісними (Ijaz et al., 2020). Крім того, необхідна подальша хімічна модифікація поверхні молекул наночастинок для підвищення їх стабільності, водорозчинності і біодоступності (Prylutska et al., 2007).

«Зелений» синтез наночастинок різних металів (Pd, Fe, Pt, Au, Ag, Cu, Zn, Se) здійснюється шляхом використання відповідних рослинних матриць чи екстрактів, які містять біологічно активні сполуки (флавоноїди, сапоніни, фенольні сполуки, алкалоїди, стероїди, ферменти, тощо), а також за допомогою певних мікроорганізмів (Huston et al., 2021; Kumari

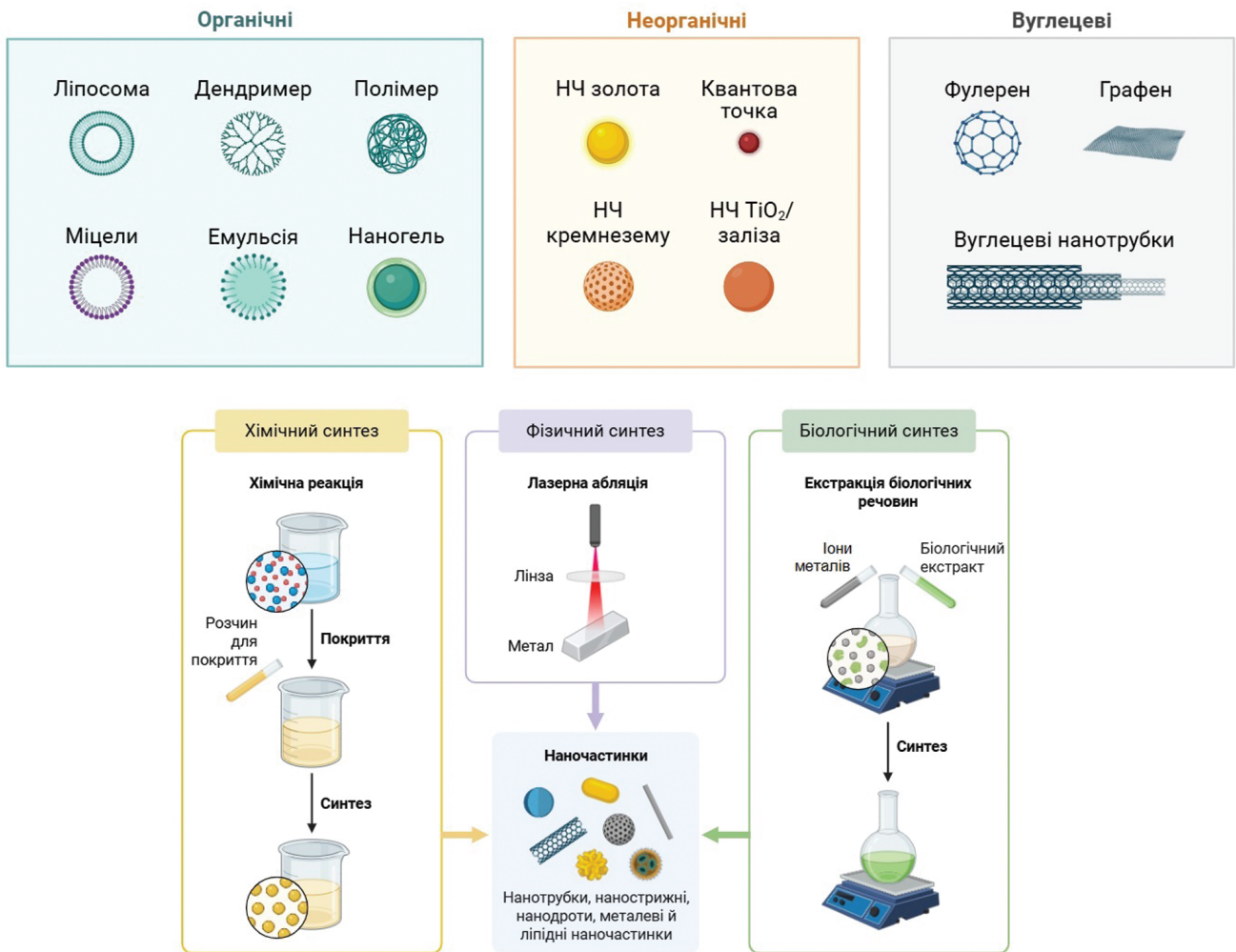


Рис. 1. Види наночастинок і методи їх синтезу

et al., 2022). На фізико-хімічні параметри, зокрема розмір, форму, вихід і тривалість утворення, таких біосинтезованих наноструктур суттєво впливає біохімічний склад рослинних матриць/екстрактів, а саме відновний потенціал і стабілізуюча ефективність його біологічно активних молекул (Meenu et al., 2021; Krkobabić et al., 2024). «Зелений» синтез дозволяє отримати дешеві біосумісні, екологічно дружні наночастинки з мало вираженою або низькою токсичністю (Huston et al., 2021; Abasi et al., 2022; Singh et al., 2023; Vorovaya et al., 2022).

Стрімкий розвиток нанотехнологій призвів до широкого використання наночастинок хімічних елементів у різних галузях промисловості завдяки їх унікальним фізичним, хімічним і біологічним властивостям. Перехід на нові фор-

ми захисту рослин від різноманітних стресових чинників і підвищення їх продуктивності призводить до все більш широкого застосування наночастинок на різних етапах вирощування важливих видів рослин (Khan et al., 2019).

Проте баланс між ефективністю дії наночастинок на організм рослин та екологічними ризиками застосування конкретних наноматеріалів не є однозначним. Аналіз наукових даних щодо впливу наночастинок, отриманих різними методами, зокрема шляхом «зеленого» синтезу, на ріст і розвиток рослин, клітинні функції, механізми захисту від стресових біотичних та абіотичних чинників, є важливим, оскільки дозволяє зважити потенційні ризики та прийняти оптимальне рішення стосовно їх подальшого практичного застосування (рис.2).

Стрес абіотичний/
біотичний

- продукування АФК
- пошкодження мембран
- окислення амінокислот, ліпідів, нуклеїнових кислот
- зниження фотосинтетичної активності
- порушення водного обміну



- ↑ • вміст фотосинтетичних пігментів
- ↓ • вміст АФК
- ↑ • активність АОЕ
- ↑ • іонний обмін
- ↑ • стійкість до абіотичних/біотичних стресів
- ↑ • стимуляція росту

Рис. 2. Особливості впливу наночастинок на рослини

Наночастинки срібла (AgNPs) широко застосовуються в різних сферах промисловості. Однак ці наночастинки також активно використовуються і в рослинництві як фунгіциди (Malandrakis et al., 2020; Moreno-Vargas et al., 2023), нанопестициди (Yasur et al., 2015; Martínez-Cisterna et al., 2024), стимулятори росту рослин (Mehmood, 2018), проростання насіння (Pražak et al., 2020), для підвищення толерантності до абіотичного стресу (Gupta et al., 2018; Wahid et al., 2020; Şener et al., 2023), тощо. Наночастинки срібла, отримані класичними хімічними методами синтезу, проявляють досить високу ефективність у боротьбі з біотичними стресовими чинниками рослин, оскільки здатні безпосередньо впливати на розвиток фітопатогенів. Так, встановлено, що фунгіцидна дія AgNPs реалізується шляхом їх впливу на розвиток фітопатогенних грибів через пошкодження клітинної стінки, а також внаслідок порушення різних метаболічних шляхів (Jian et al., 2021), розвитку конідиальної аутофагії, пригнічення утворення апресорію (Shi et al., 2023).

Біосинтезовані наночастинки срібла також демонструють фунгіцидну активність, зокрема викликають повне інгібування *Sclerotinia sclerotiorum* і *Colletotrichum falcatum* і переважно інгібування *Colletotrichum gloeosporioides* і *Rhizoctonia solani* (Singh et al., 2024), *Fusarium oxysporum* (Qureshi et al., 2023; Tabassum et al., 2024), *Fusarium graminearum* (Jian et al., 2021) та багатьох інших фітопатогенних грибів (Kim et

al., 2012; Gopinath et al., 2013; Mallmann et al., 2015). Окрім того, AgNPs проявляють виражені антибактерицидні властивості (Kathiravan et al., 2015; Vorovaaya et al., 2020; Khanet et al., 2024), а також здатні протидіяти вірусам, що вражають рослини (Jain et al., 2014; Elbeshehy et al., 2015). Використання AgNPs в якості пестицидів базується на їх здатності спричиняти вади розвитку лялечок, затримувати появу дорослої особини, а також порушувати реплікацію ДНК і трансляцію білків (Yasur et al., 2015; Fouad et al., 2021; Martínez-Cisterna et al., 2024).

За допомогою трансмісійної електронної мікроскопії встановлено, що обробка насіння гороху (*Pisum sativum* L.) різними концентраціями (20–160 мг/л) наночастинок срібла призводить до суттєвих змін ультраструктури клітин коренів гороху проростків, отриманих на 7 добу після пророщування насіння. Крім того, спостерігалося накопичення наночастинок діаметром менше 15 нм в клітинній стінці, плазмодесмах, міжклітинних просторах, що супроводжувалося плазмолізмом, вакуолізацією, структурними порушеннями клітинної стінки та мітохондрій клітин рослин (Labeeb et al., 2022).

Встановлено, що AgNPs впливають на ріст і розвиток рослин на різних стадіях онтогенезу та за різних умов їх вирощування. Зокрема виявлено, що хімічно синтезовані наночастинки срібла запобігають гальмуванню розвитку пагонів і коренів бойзенової ягоди *in vitro*

за умов штучно змодельованої посухи. При цьому в листях рослин спостерігали посилення активності антиоксидантних ензимів, зокрема супероксиддисмутази (SOD) і каталази (CAT), та зниження вмісту малонового діальдегіду (Şener et al., 2023).

Обробка AgNPs призводила до розвитку варіацій геномної ДНК і точкових мутацій, що може свідчити про їх генотоксичність (Labeeb et al., 2022). Існують дані, що AgNPs за високих концентрацій (250 та 500 мг/л) викликають ушкодження молекул ДНК, а також індукують експресію генів, пов'язаних із вторинним метаболізмом (глюкозинолати, антоціани) та антиоксидантною активністю у проростків *B. rapa* (Baskar et al., 2018).

Вирощування проростків *Arabidopsis thaliana* на гідропонії після додавання сублетальних концентрацій наночастинок срібла та звичайних іонів срібла (0,2–1 мг/л) також свідчило про високу токсичність досліджуваних наночастинок, яка супроводжувалася зниженням вмісту пігментів, посиленням процесів перексидного окиснення, зміною потенціалу мітохондріальних мембран в клітинах коренів проростків, посиленням експресії генів асиміляції сірки, біосинтезу глутатіону, а також активності глутатіон-S-трансферази та глутатіонредуктази (Nair et al., 2014). Аналогічні результати було отримано й іншими авторами, які порівнювали дію іонів Ag^+ з AgNPs. Зокрема, було встановлено, що AgNPs характеризуються вищою токсичністю, яка супроводжувалася порушенням структури тилакоїдної мембрани та негативним впливом на транскрипцію генів антиоксидантів та аквапорину (Qian et al., 2020).

Абсолютно протилежні результати було отримано по вивченню впливу хімічно синтезованих наночастинок срібла за використання їх в низьких концентраціях. Зокрема, було показано, що вони сприяють швидкому і рівномірному проростанню насіння стручкової квасолі (*Phaseolus vulgaris* L.) як в лабораторних, так і польових умовах, а також позитивно впливають на розвиток проростків (висоту пагонів, сиру і суху масу, вміст фотосинтетичних пігментів). При цьому в умовах низькотемпературного стресу ефект стимулювання росту був більш виражений, ніж за оп-

тимальної температури, що на думку авторів свідчить про здатність AgNPs підвищувати стійкість рослини до несприятливих абіотичних чинників (Pražak et al., 2020). За іншими даними (Nejatzadeh, 2021) наночастинки срібла також підвищували стійкість рослин до засолення, зокрема чабера садового (*Satureja hortensis*).

Біосинтезовані наночастинки срібла, отримані шляхом «зеленого» синтезу, також позитивно впливали на ріст і розвиток рослин пшениці, ефективно підвищували їх резистентність до солявого стресу, позитивно впливали на проростання насіння, підвищували концентрацію K^+ в клітинах, утворення абсцизової кислоти, вміст глутатіону і аскорбату, активність проліноксидази і глутамілкінази та накопичення такого осмоліту, як пролін (Wahid et al., 2020). Іншими авторами також виявлено позитивну дію біосинтезованих AgNP на рослини. Так, показано зростання активності антиоксидантних ензимів каталази, пероксидази і аскорбатпероксидази, вмісту глутатіону та аскорбату, зменшення вмісту малонового діальдегіду в рослинах кукурудзи, пажитника та цибулі (Soliman, 2020).

Після обробки насіння рису біосинтезованими AgNPs встановлено покращення показників проростання порівняно з необробленим насінням та насінням, на яке впливали гідропраймуванням та праймуванням $AgNO_3$. Це було пов'язано з посиленням експресії генів аквапорину та утворенням активних форм кисню у проростаючому насінні (Mahakham et al., 2017). Інші автори (Gupta et al., 2018) також показали, що біосинтезовані AgNPs стимулювали проростання насіння рису, ріст пагонів і коренів проростків в умовах *in vitro*, однак при цьому спостерігали пригнічення перексидного окиснення ліпідів, зниження вмісту H_2O_2 та активних форм кисню (Gupta et al., 2018).

Наночастинки купруму (CuNPs), синтезовані з використанням водного екстракту ентомопатогенного гриба *Metarhizium robertsii* характеризувалися ларвіцидною активністю щодо личинок комарів *Anopheles stephensi*, *Aedes aegypti*, *Culex quinquefasciatus*, *Tenebrio molitor* та були нетоксичними для нецільових біоіндикаторних водних і ґрунтових організмів (Viveka-

nandhan et al., 2021). Біосинтезовані CuNPs також ефективно діяли проти личинок переносника малярії *Anopheles subpictus*, лихоманки денге *Aedes albopictus* та японського енцефаліту *Culex tritaeniorhynchus* (Govindarajan et al., 2016). Також було встановлено, що CuNPs, отримані методом «зеленого» синтезу, проявляли виражену антимікробну активність, зокрема ефективно інгібували ріст збудника бактеріального опіку листя рису *Xanthomonas oryzae* pv. *Oryzae* (Kala et al., 2016), *Erwinia amylovora*, *Pseudomonas savastanoi*, *Agrobacterium tumefaciens*, *Pectobacterium carotovorum*, *Dickeya dadantii*, *Pseudomonas corrugata* (Varympori et al., 2020).

Відомо, що CuNPs здатні накопичуватись в рослинах. Так, після обробки наночастинками рослин огірка (*Cucumis sativus*), вирощених на гідропонії, спостерігалось їх дозозалежне накопичення в тканинах, особливо в коренях, що супроводжувалося пошкодженням плазматичної мембрани клітин та підвищенням витоком електроліту (Mosa et al., 2018). Деякими авторами було продемонстровано, що наночастинки CuO можуть переміщуватися флоємою від пагонів назад до коренів та відновлюватися під час транслокації з Cu (II) до Cu (I) (Wang et al., 2012).

Емпіричні моделі, в яких увага приділялась впливу гідродинамічного розміру та ζ -потенціалу на доставку наночастинок в клітини листків рослин, показують, що гідрофільні наночастинки з розміром <20 нм (для бавовника) і <11 нм (для кукурудзи), відповідно, і позитивним зарядом (>15 мВ), демонструють найвищу ефективність доставки в клітини листка (100 %), позаклітинний простір (90,3 %) і хлоропласти (55,8 %) (Hu et al., 2020).

Доведено, що CuNPs, отримані класичними хімічними методами, викликають модифікації геномної ДНК, а також несприятливі фенотипові зміни, зниження рівня хлорофілів *a* і *b*, збільшення вмісту H_2O_2 та малонового діальдегіду (Mosa et al., 2018). Аналогічну фітотоксичність CuNPs виявляли щодо коріандру (*Coriandrum sativum*) (AlQuraidi et al., 2019); наночастинки оксиду Cu – щодо рослин дині (*Cucumis melo*) (Shahet et al., 2023), індійської гірчиці (*Brassica juncea* L.) (Nair et al., 2015), сої (*Glycine max* L.) (Nair et al., 2014) і різушки Таля (*Arabidopsis thaliana*) (Nair et al., 2014)

Біосинтезовані CuNPs не спричиняли токсичного впливу на рослинні клітини і не викликали ультраструктурні зміни органел, крім того, підвищували ефективність фотосинтетичних реакцій (Teyabeen et al., 2023). Також доведено, що біосинтезовані наночастинки оксиду Cu за дози 20 ppm позитивно впливали на проростання насіння томатів, ріст розсади, вміст пігментів та активність антиоксидантних ензимів (Ananda et al., 2019; Oraibi et al., 2023). Аналогічні результати було отримано за використання біосинтезованих CuNPs при пророщуванні насіння пшениці, при цьому оптимальна схожість і швидкість росту сортів відмічалась за різних доз: 50 мг/л (сортів 18-Elite Line 1, Elite Line 3 і 18-Elite Line 6), 25 мг CuNPs/л – сорт 18-Elite Line 5 (Kausar et al., 2022). З усіх досліджуваних способів доставки біосинтезованих CuNP найбільш ефективним є метод розпилення наночастинок на листя, що продемонстровано на рослинах авокадо (Teyabeen et al., 2023).

Подібні результати було отримано за використання хімічно синтезованих наночастинок Cu і Se. Так доведено, що за їх застосування покращувалась якість плодів полуниці, підвищувався вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофіл *a*, хлорофіл *b* і загальний хлорофіл) у листі рослин, а також ефективність поглинання води рослинами. За рахунок цього рослини полуниці були більш толерантними до дії посухи, при цьому додатково зростала активність антиоксидантних ферментів (каталази, пероксидази, супероксиддисмутази) та знижувався вміст малонового діальдегіду у порядку зростання: контроль < CuNPs < SeNPs < CuNPs + SeNPs (Liu et al., 2024).

Застосування CuNPs у концентрації 300 мг/л на різних стадіях розвитку пшениці за умов моделювання посухового стресу суттєво пом'якшувало його несприятливі наслідки, зокрема в листі підвищувались показники відносного вмісту води, а також вміст хлорофілу; збільшувалась кількість зерен у колосі, а також маса тисячі зерен (Raza et al., 2024). За використання наночастинок оксиду Cu шляхом позакореневого обприскування рослин кукурудзи, які вирощували в умовах засолення, спостерігалось зниження несприятливого впливу стресу, яке супроводжувалося покращен-

ням показників росту та загальної кількості білків і вільних амінокислот, вмісту фенолів та хлорофілу (Shafiq et al., 2024).

Відомо, що біотичний стрес суттєво впливає на вміст хлорофілу та ефективність фотосинтетичних реакцій. За умови позакореневої обробки томатів, уражених *Alternaria solani*, наночастинками Cu і Se спостерігалось підвищення вмісту хлорофілу, а за високих доз наночастинок значно зростала активність ензимів антиоксидантного захисту – супероксиддисмутази, аскорбатпероксидази, фенілаланін-амоніази в листі, а також глутатіонпероксидази у листі та плодах. У плодах також було виявлено підвищення вмісту низькомолекулярних антиоксидантів – аскорбінової кислоти, глутатіону, фенолів і флавоноїдів (Quiterio-Gutiérrez et al., 2019).

Доведено позитивний вплив позакореневої обробки пшениці наночастинками CuO на врожайність, висоту рослин, довжину колоса, вміст хлорофілу та біомасу соломи за дії кадмієвого стресу. Окрім того, відмічено зростання активності антиоксидантних ензимів у листі та зниження концентрації Cd в тканинах (Alhaithloul et al., 2023).

Біосинтезовані CuNPs також запобігали впливу різних стресів на організм рослин. Так, CuNPs, отримані з використанням екстракту *Solenostemma argel*, за доз 25 і 50 мг/л суттєво пом'якшували негативний вплив сольового стресу на рослини ячменю (*Hordeum vulgare*), що супроводжувалося покращенням їх ростових параметрів, попереджало окисне пошкодження шляхом зниження накопичення осмолітів, H₂O₂, загального фенолу та флавоноїдів одночасно з підвищенням активності антиоксидантних ензимів (Shaikhaldein et al., 2023). Разом з тим, у прояві таких ефектів важливою є доза наночастинок. При низькій концентрації (0,025 мг/л) біосинтезованих наночастинок оксиду Cu зростала активність захисних ензимів пероксидази, фенілаланін-аміакліази, поліфенолоксидази і β-1,3 глюканази, але за вищої концентрації проявлялися фітотоксичні ефекти (Sarkar et al., 2020).

Наночастинки цинку (ZnNPs) у дослідженнях використовуються в основному в двох формах – оксиду цинку, рідше як наночастинки чистого елемента (Pramod et al., 2011;

Adil et al., 2022; Ukidave et al., 2022 Okaiyeto et al., 2024). Методи отримання наночастинок цього елемента не відрізняються від інших металів (Ihsan et al., 2023). Біосинтезовані наночастинки оксиду Zn розглядаються як перспективні засоби у медицині та фармації, оскільки доведено їх ефективну антибактеріальну та антиоксидантну дію (Dey et al., 2022; Ihsan et al., 2023; Okaiyeto et al., 2024; Vasiljevic et al., 2024).

Не менш перспективним є використання наночастинок цього елемента при вирощуванні рослин, оскільки, високі концентрації Zn у тканинах насіння є важливими під час його проростання (Takahashi et al., 2009). Доведено, що проникнення і біологічні ефекти наночастинок оксиду Zn суттєво залежать від їх розмірів (Lv et al., 2021). Так, наночастинки розміром 9 нм, порівняно з наночастинками 40 нм, краще проникають в корені через клітини епідермісу і кори, досягають центрального циліндра і транспортуються до пагонів через ксилему. Авторами також встановлено, що наночастинки оксиду Zn накопичуються у вакуолях клітин коренів, а також можуть транспортуватися через везикули. На розподіл ZnNPs в ґрунті впливає рН, зокрема показано, що у кислому ґрунті наночастинки швидше розчиняються порівняно з лужним середовищем (Cupřichová et al., 2025). Наночастинки оксиду Zn, інкапсульовані у цинк-фосфатній оболонці Zn₃(PO₄)₂, проявляли вищу мобільність Zn і швидше перемішувалися в рослинах, відповідно у більших дозах їх було виявлено у плодах перцю, порівняно зі звичайними наночастинками ZnO (Rodrigues et al., 2024).

Дані щодо впливу наночастинок Zn/оксиду Zn на різні рослини є суперечливими. Так, авторами (Rao et al., 2014) виявлено фітотоксичний вплив наночастинок оксиду Zn розміром 30–75 нм, що проявлялось зменшення біомаси рослин *Brassica juncea*, підвищенням рівня пероксидного окиснення ліпідів у листках, пагонах і коренях. Іншими авторами (Zhang et al., 2015) показано зменшення довжини кореня кукурудзи та огірка за дії наночастинок оксиду Zn (1000 мг/л) та відсутність негативного впливу на проростання насіння цих рослин.

Крім фізико-хімічних особливостей наночастинок їх токсичність залежить також і від

концентрації, що використовується. Так, після обробки насіння ріпаку і рижію наноксидом Zn за концентрації 10 ppm збільшувався відсоток його проростання і інтенсивність росту коренів проростків, тоді як ці ж наночастинки за концентрації вище 50 ppm виявляли токсичну дію на дані види рослин (Sarkhosh et al., 2022). Наноксид Zn позитивно впливав на ріст коренів і пагонів проростків вігні (*Vigna radiata*) і нуту (*Cicer arietinum*) у діапазоні досліджуваних концентрацій. Для вігні максимально ефективною була концентрація 20 ppm наноксиду цинку, тоді як для нуту – 1 ppm. Концентрації вище вказаних (50, 100, 500, 1000 та 2000 ppm) мали зворотній ефект, що на думку авторів зумовлено накопиченням наночастинок оксиду Zn в клітинах коренів (Pratmod et al., 2011).

Оксид Zn у наноформі, отриманий хімічним методом при розкладанні оксалату, в дозі 1500 ppm підвищував відсоток схожості насіння кукурудзи та індекс виживаності проростків порівняно з сульфатом цинку (Subbaiah et al., 2016).

ZnNPs, отримані методом «зеленого» синтезу за використання екстракту гвоздики проявляли позитивний вплив на ріст і розвиток рослин гороху (*Pisum sativum* L.), а саме викликали збільшення площі листків, довжини коренів, пагонів та кількості прилистків, порівняно з сульфатом цинку, проте за високих концентрацій (800, 1000 ppm) характеризувалися фітотоксичністю (Ahmed et al., 2022). Після обробки біосинтезованими наночастинками оксиду Zn порівняно з аналогічного розміру хімічно синтезованими наночастинками, пришвидшувалася схожість насіння чилі й томатів, збільшувалася довжина та біомаса коренів і наземної частини рослин без суттєвих фітотоксичних ознак (Sánchez-Pérez et al., 2023). Подібні ефекти ці наночастинки проявляли щодо ячменю (Shaban et al., 2024), зеленої та червоної квасолі (Nguyen et al., 2021), а також гірчиці чорної (Rafique et al., 2021).

Аналогічно до попередніх досліджень, біосинтезовані наночастинки оксиду Zn за використання екстрактів м'яти та базиліку, покращували проростання насіння пшениці (Doğaroğlu et al., 2023). Згідно дослідження (Asmat-Campos et al., 2022) вища біосумісність

біосинтезованих наночастинок пов'язана з утворення комплексу Zn⁰-фенолят, якому притаманний хелатний ефект. Окрім того доведено вплив наночастинок Zn на фізіолого-біохімічні показники рослин. Так, за використання біосинтезованих наночастинок оксиду Zn збільшувався вміст білка та хлорофілу у різних видах нуту (Ukidave et al., 2022), підвищувалися накопичення поживних речовин, мікроелементів та флавоноїдів у листях гірчиці (Geremew et al., 2023), загальний вміст розчинного цукру та активність амілази в насінні рису (Sharma et al., 2021).

За умови позакореневої обробки рослин хімічно синтезованим наноксидом Zn у поєднанні з внесенням у ґрунт компосту і гіпсу покращувалася якість солонцюватого ґрунту, підвищувалася продуктивність пшениці, оптимізувалося поглинання поживних речовин, що збільшувало їх вміст у рослинах, а відповідно і в зерні (El-Sharkawy et al., 2024).

Праймування насіння різних культур наночастинками оксиду Zn має позитивні ефекти в боротьбі з біотичними і абіотичними стресами рослин. Зокрема, обробка насіння кукурудзи наночастинками оксиду Zn пом'якшувала фітотоксичність, спричинену кобальтовим стресом, зокрема покращувався ріст рослин, накопичення біомаси та фотосинтетичні механізми (Donia et al., 2023). Окрім того, зменшувалося накопичення кобальту і його поглинання за рахунок зростання стабільності внутрішньоклітинних структур та ефективності фотосинтетичного апарату рослин (Salam et al., 2022).

Внесення наночастинок оксиду Zn в ґрунт за модельованого сольового стресу також сприяло адаптації рослин, яка супроводжувалася значним підвищенням вмісту хлорофілів *a* і *b*, висоти рослин пшениці на стадії вегетації та зрілості, довжини пагонів і колосів, сирої/сухої маси та урожайності зерна (Adil et al., 2022). Наночастинки оксиду Zn покращували параметри газообміну та активність антиоксидантних ензимів шпинату, таких як супероксиддисмутази, каталази, аскорбатпероксидази (Ahmad et al., 2024). В умовах засолення ґрунту наноксид цинку в поєднанні з мікоризними грибами знижував стрес у рослин змієголовника (*Dracocephalum*

moldavica), підвищував вміст хлорофілу, каротиноїдів, антоціанів та ефірної олії, а також відсоток основних компонентів ефірної олії, зокрема терпеноїдів (Ghaffari Yaichi et al., 2025). Згідно інших літературних даних наночастинки оксиду Zn відігравали важливу роль у зниженні токсичності NaCl для рослин, шляхом підвищення вмісту білка та активності антиоксидантних ензимів у томатів (Faizan et al., 2021) та шпинату (Ahmad et al., 2024).

ZnNPs/наночастинки оксиду Zn, отримані як методом біологічного синтезу, так і фізичним чи хімічним методами, здатні проявляти високу ефективність у протидії стресу, спричиненого важкими металами. Показано, що наноксид Zn зменшував комбінований стрес, спричинений фенантеном і кадмієм на рослини салату, модулював метаболізм гліцерофосфоліпідів та амінокислот в листі, стимулював ріст екстремальних та стресостійких бактерій в коренях і листі, а також бактерій, стійких до дії важких металів і поліароматичних вуглеводів, у ризосферному ґрунті (Cao et al., 2025). За виключно кадмієвого стресу наночастинки оксиду Zn підвищували активність антиоксидантних ензимів (супероксиддисмутази і каталази), вміст проліну в рослинах рису (Faizan et al., 2021), вміст фенолів і флавоноїдів у перці (Tahira et al., 2025). За позакореневого внесення наночастинок Zn в концентрації 100 мг/л зменшувався вплив свинцевого стресу на рослини ріпаку, а також знижувалася концентрація цього важкого металу в коренях і пагонах (Sehrish et al., 2024). Тоді як використання наночастинок оксиду Zn (1000 ppm) за аналогічного впливу важкого металу покращувало морфометричні показники гірчиці (*Brassica juncea* L): збільшувалась кількість стручків, маса та кількість насіння в них, у рослинах підвищувався вміст хлорофілу, каротиноїдів, загального розчинного білка та активність нітратредуктази (Singh et al., 2025).

Порівняно з хімічно синтезованими, біосинтезовані ZnO NPs ефективніше активували систему захисту рослин, збільшуючи кількість біоактивних сполук і ферментативну активність навіть у низьких концентраціях (Sharma et al., 2021; Sánchez-Pérez et al., 2023). Так, біосинтезовані наночастинки оксиду Zn у діапазоні концентрацій до 200 мг/л підвищували

антиоксидантний потенціал в клітинах листя гірчиці та зменшували токсичний вплив АФК (Geremew et al., 2023). Окрім того, вони запобігали біотичним стресам завдяки протигрибковій дії щодо *Alternaria alternata*, *Aspergillus niger*, *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum* і *Penicillium expansum* (Jamdagni et al., 2016).

Наночастинки силіцію (SiNPs) використовуються переважно як нанопестициди, наногербициди та нанодобрива, а також, за рахунок мезопористої природи, як носії для доставки і транслокації поживних елементів (Rastogi et al., 2019). Встановлено, що наноксид Si може транспортуватися від коренів до пагонів рослин через сік ксилеми, характеризується певною фітотоксичністю, зокрема призводить до зменшення висоти і біомаси рослин бавовника (Le et al., 2014). Проте деякі дослідники вважають, що токсичність силіцію в дозах до 1000 ppm для рослин обумовлена не впливом самих наночастинок, а зміною рН середовища (Slomberg et al., 2012).

Більшість досліджень все ж таки свідчать про позитивний вплив SiNPs на ріст рослин, зокрема за дії стресових чинників. В умовах посухи позакореневе підживлення виноградної лози наночастинками оксиду Si у концентрації 10 ppm супроводжувалося покращенням ростових параметрів, збільшенням відносного вмісту води в листі, продигової провідності, вмісту білка та зменшенням показників окисного стресу, включаючи індекс посухи, індекс пошкодження мембрани, вміст пероксиду водню та рівень малонового діальдегіду (Daler et al., 2024).

Встановлено, що SiNPs викликають підвищення рівні експресії ключових генів пшениці, пов'язаних із розчинними цукрами, хлорофілом (Mg-хелатази, хлорофілід-оксигенази та протохлорофілідоксидоредуктази), ауксином та абсцизовою кислотою, тоді як рівень експресії гену ізопентенілтрансферази, пов'язаної з біосинтезом цитокініну, зменшувався (Li et al., 2023). При комбінованому застосуванні мелатоніну та наночастинок оксиду Si значно підвищувався вміст хлорофілу та білка, активність антиоксидантних ензимів, покращувався ріст, газообмін і фотосинтез (Faisal et al., 2024). За обробки рослин цукрових буряків (*Beta vulgaris*) двома мікроорганізмами *Pseudomonas kore-*

ensis, *Bacillus coagulans* та SiNPs зменшувався індукований шкідливий вплив комбінованих стресорів (засолення ґрунту та зрошення солоною водою), що супроводжувалося покращенням морфологічних параметрів, продуктивності та якості цієї культури (Alharbi et al., 2022). Праймування насіння *Elymus sibiricus* (L.) SiNPs зменшувало окисне пошкодження, індуковане посухою та сольовим стресом, шляхом підвищення активності антиоксидантних ензимів та рівня окремих фітогормонів. Також за дії цих наночастинок знижувалася концентрація Na^+ та збільшувалася концентрація K^+ у рослинах (Khan et al., 2024). SiNPs позитивно впливали на рослини після дії важких металів. Зокрема, доведено значне зниження накопичення Pb та Cd у листках шавлії (Bakhtiari et al., 2023). SiNPs зменшували токсичність, спричинену хромом, знижуючи окисне пошкодження клітин та накопичення металу в клітинах ріпаку, а також ефективно підвищували нефотохімічне гасіння, електронний транспорт і квантовий вихід для фотосистеми II. Підвищення толерантності рослин до хрому, на думку дослідників пов'язане з посиленням регуляції генів, пов'язаних з антиоксидантними ензимами (Huang et al., 2024).

Аналогічні результати було отримано при використанні SiNPs для позакореневої обробки рослин пшениці та праймування її насіння за кадмієвого стресу (Ali et al., 2019; Hussain et al., 2019). В той же час наночастинки оксиду Si, отримані методом «зеленого» синтезу за використання екстракту *Rhus coriaria* L., є більш стабільними та мають більшу площу поверхні порівняно з хімічно синтезованими аналогами (Rahimzadeh, 2022). Показано, що біосинтезовані наночастинки оксиду Si в концентрації 75 мг/л ефективно знижували токсичну дію кадмію на рослини дині (*Cucumis melo*), що супроводжувалося покращенням морфологічних і фізіологічних параметрів за рахунок зростання активності антиоксидантних ензимів і регуляції експресії генів, пов'язаних зі стресом (Malik et al., 2025). Також продемонстровано, що біосинтезовані наночастинки оксиду Si у концентрації 500 мг/кг позитивно впливали на ріст кореня, пагона, вміст в рослинах *Eruca sativa* хлорофілу, анти-

оксидантів, фенолів і флавоноїдів (Mathur et al., 2023).

Наночастинки титану (TiNPs) також представляють інтерес в нанобіотехнологічних дослідженнях. Не зважаючи на досі не з'ясовані механізми дії титану, показано, що цей елемент здатен покращувати врожайність шляхом підвищення активності певних ензимів, вмісту хлорофілу та ефективності фотосинтезу, сприяти поглинанню поживних речовин, посилювати стресостійкість рослин (Lyu et al., 2017). Наночастинки оксиду Ti, синтезовані хімічним шляхом, також позитивно впливають на проростання насіння амаранту (*A. mangostanus*) (Li et al., 2022), сприяють підвищенню вмісту ефірної олії та її компонентів (гераніалу, геранілацетату, z-цитралю, неролу, міртенолу та гермакрону D) у рослинах меліси молдавської (Gohari et al., 2020). Такі наночастинки здатні мінімізувати токсичну дію хрому на рослини соняшнику *H. annuus* L., знижуючи накопичення цього важкого металу, утворення H_2O_2 і малонового діальдегіду, тим самим запобігаючи пошкодженню ДНК. Встановлено позитивний вплив цих наночастинок на вміст фотосинтетичних пігментів, аскорбат-глутатионовий цикл і синтез фітохелатинів – багатих на цистеїн поліпептидів, які ефективно хелатують важкі метали (Kumar et al., 2023).

Застосування нанооксиду Ti з мелатоніном, зменшувало токсичність Cr щодо рослин меліси лікарської *Melissa officinalis* L. за концентрації 50 мг/кг, яке проявлялося збільшенням сирової маси, вмісту хлорофілу, при одночасному збільшенні вмісту фенолів, загального вмісту флавоноїдів (Soliman et al., 2024), посиленням активності антиоксидантних ензимів, зниженням вмісту малонового діальдегіду і перекису водню в рослинах *Brassica napus* (Gatasheh et al., 2024).

Згідно дослідження (Mustafa et al., 2022) наночастинки оксиду титану, отримані методом «зеленого» синтезу, ефективно запобігали стресу у рослин пшениці, викликаного засоленням різного рівня (100 і 150 mM NaCl). Зокрема, відмічалось підвищення показника проростання насіння, осмотичного і водного потенціалу листя, вмісту проліну, каротиноїдів, загальних фенолів і флавоноїдів, розчинного цукру, амінокислот, білка. Також було встанов-

лено підвищення активності супероксиддисмутази і зниження рівня малонового діальдегіду. Разом з тим за вищих концентрацій (60 і 80 мг/л) таких наночастинок було виявлено їх негативний вплив на вищезазначені показники. Аналогічні результати продемонстрували біосинтезовані наночастинки оксиду Ті в умовах засолення на рослинах сої, при цьому відмічено підвищення активності поглинання вільних радикалів DPPH (2,2-Дифеніл-1-пікрілгідрозилу) (Abdalla et al., 2022).

Нещодавно було продемонстровано, що біосинтезовані TiNPs характеризуються вираженою дозозалежною протигрибковою дією щодо *Colletotrichum graminicola* (збудника антракнозу злаків, що викликає плямистість листя і стеблову гниль). Окрім того, за біотичного стресу, викликаного грибами патогенами, збільшувався вміст захисних речовин – загальний вміст фенолів, активність АОЕ пероксидази, фенілаланін аміакліази і поліфенолоксидази, фотосинтетичних пігментів і загального вмісту білка (Nabi et al., 2024).

Наночастинки на основі вуглецю або вуглецеві наноматеріали, як показує переважна більшість досліджень по вивченню їх впливу на рослини стосується наночастинок, отриманих фізичними або хімічними методами синтезу. Для них характерний перелік неоднозначних впливів на ріст і розвиток рослин, структуру і функціональний стан їх клітин та стресостійкість рослин загалом (Wang et al., 2014; Zhang et al., 2021; Samadi et al., 2023; Zhuzhukin et al., 2023; Prylutska et al., 2023; Buziashvili et al., 2024). В цілому, згідно різних досліджень доза вуглецевих наночастинок має одне з вирішальних значень у прояві їх ефектів на рослини. Переважно вони стимулюють ріст рослин в низьких концентраціях та сповільнюють у високих (Zhao et al., 2021; Prylutska et al., 2022).

Не останню роль відіграє також форма і розмір таких наноматеріалів. Так, одношарові вуглецеві нанотрубки здатні проникати через клітинні стінки рослин і агломеруватися всередині клітини (Samadi et al., 2023). Разом з тим графен ушкоджує клітинну стінку та плазматичну мембрану, але утворення його агломератів спостерігається не завжди (Gao et al., 2019; Zhang et al., 2021; Xiao et al., 2022). Фулерени накопичуються в тканинах і клітинах

кореня, стебла, черешка, листків, квітів та плодах гіркої дині (*Momordica charantia*) (Kole et al., 2013). У рослин пшениці фулерен C₆₀ блокує структуру пор клітин коренів, а також пошкоджує клітинну стінку його епідермальних клітин внаслідок екструзії наночастинок (He et al., 2021).

Зустрічаються повідомлення як про позитивний вплив наночастинок вуглецю на ріст і розвиток рослин, так і про його фітотоксичну дію. Так, карбоксильовані багатшарові вуглецеві нанотрубки викликають окисний стрес та посилюють біохімічні і субклітинні пошкодження в листках квасолі *Vicia faba* L. за обробки Pb+Cd (Wang et al., 2014). Відновлений оксид графену порушує фотосинтез *Brassica napus* L. внаслідок зниження вмісту хлорофілу та активності Rubisco, що згідно з дослідженням авторів, є наслідком токсичного впливу на трансмембранний транспортер сульфату та метаболізм азоту. Транскриптомний аналіз показав, що оксид графену токсично впливає на мембрану хлоропластів, фотосистему, фотосинтетичний транспорт електронів і АТФ-азу F-типу в рослинах ріпаку *Brassica napus* L. (Xiao et al., 2022). Аналіз диференційно експресованих генів у рослин сосни червоної китайської (*Pinus tabulaeformis* Carr.) показав, що обробка графеном індукує різновид абіотичного стресу, подібний до сольового стресу, але разом з тим полегшує реакцію рослин на біотичний стрес (Zhang et al., 2021).

Проте доведено і протекторну роль вуглецевих наночастинок за дії різноманітних стресів (Prylutska et al., 2023; Shah et al., 2024). За використання багатшарових вуглецевих нанотрубок у концентрації 1 мг/л на рослині берези видів *Betula pubescens* та *B. pendula* суттєво підвищувалася експресія генів стресостійкості *DREB2* і *PR-10* та, навпаки, знижувалася за їх вищих концентрацій (Zhuzhukin et al., 2023). Одношарові вуглецеві нанотрубки сприяли підвищенню відсотку проростання насіння сої за умов модельованого посухового стресу (Sun et al., 2020). Різні нанотропи вуглецю здатні регулювати експресію генів аквапорину, що підвищує стійкість проростаючого насіння до осмотичного стресу (Prylutska et al., 2024).

Позакоренева обробка фулеренолом з інокуляцією арбускулярних мікоризних грибів *Brassica napus* L. ефективно пом'якшує окисний стрес, спричинений Pb, шляхом підвищення активності антиоксидантних ензимів – каталази, пероксидази, супероксиддисмутази, аскорбатпероксидази, глутатіонредуктази, фенілаланін-аміако-ліази та поліфенолпероксидази (Shah et al., 2024). Не зважаючи на широке застосування біологічного синтезу для отримання наночастинок металів, для синтезу наночастинок вуглецю він наразі використовується менше, а дані щодо їх впливу на організм рослин є обмежені (Adorinni et al., 2021).

«Зелений» синтез вуглецевих наночастинок проводять з використанням каталізатора, отриманого з рослин чи відходів переробки рослин (Tripathi et al., 2017; Abinaya et al., 2024). На думку дослідників, біосинтезовані вуглецеві наночастинок, мають ряд суттєвих переваг, оскільки не містять залишків токсичного металевого каталізатора, потребують низької температури синтетичних реакцій, не зменшують при цьому вихід цільового продукту, а також відсутня потреба у дорогому і складному обладнанні для їх синтезу і очистки (Tripathi et al., 2017). Біосинтезовані вуглецеві точки містять більше функціональних груп, таких як C=O, C-F, C-O, C=C і OH-групи на поверхні, що покращує їх гідрофільність та стабільність (Abinaya et al., 2024).

Застосування вуглецевих точок (CD), синтезованих за використання шкаралупи арахісу методом піролізу, для праймування насіння *Vigna mungo* L. призводило до покращення поглинання води та інших параметрів, пов'язаних з його проростанням. Також нанесення CD методом обприскування листя за концентрації 50 ppm призводило до збільшення фотосинтетичної активності у рослин *V. mungo* (Abinaya et al., 2024). Внесення у ґрунт біосинтезованого в екстракті насіння чорного кмину оксиду графену у діапазоні концентрацій до 1200 мг/л шляхом зрошення супроводжувалося позитивним впливом на морфометричні показники рослин вігні виду *Vigna radiata* L., а саме збільшувалась довжина коренів і пагонів, кількість листя, кількість кореневих бульбочок на рослину, кількість стручків і насіння на стручок (Mirza et al., 2022).

Таким чином, наноматеріали, які наразі використовуються у клітинній біології, фізіології та біотехнології рослин, характеризуються різною природою, формою, розміром, фізичними, хімічними і біологічними властивостями, розчинністю, метаболізмом, способом обробки та дозою тощо, які і обумовлюють ефекти їх застосування. Незважаючи на велику кількість літературних даних, сучасні дослідження вийшли на новий рівень, в якому особлива увага приділяється екологічним шляхам виробництва та модифікації наночастинок задля максимального збереження чистоти довкілля. В цьому дослідженні було проаналізовано і приділено особливу увагу порівняльному впливу наночастинок металів, металоїдів, вуглецю, отриманих різними методами синтезу – хімічним, фізичним і біологічним на організм рослин. Аналіз сучасних наукових даних підтверджує перспективність використання наночастинок, отриманих шляхом «зеленого» синтезу для стимулювання росту і розвитку рослин, а також підвищення їх толерантності до біотичних і абіотичних стресів.

Дотримання етичних стандартів. Ця стаття не містить жодних досліджень із тваринами, проведених будь-яким із авторів.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування. Роботу виконано в рамках проекту МОН України «Регуляція внутрішньоклітинних механізмів стресостійкості сільськогосподарських рослин за використання вуглецевих наноматеріалів» (2023–2025 рр.) і частково за фінансової підтримки НАН України (бюджетна програма КПКВК 6541030, 2024–2028 рр., державний реєстраційний номер: 0124U002424) для ВМК.

NANOPARTICLES OF DIFFERENT NATURE IN PLANT BIOTECHNOLOGY: EFFECTIVENESS, SAFETY AND PROSPECTS OF APPLICATION

S.V. Prylutska, T.A. Tkachenko,
V.V. Tkachenko, V.M. Kyrylenko, A.I. Yemets

National University of Life Resources and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroiv Oborony St., 15, Kyiv, 03041, Ukraine
Institute of Food Biotechnology and Genomics
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Baydy-Vyshnevetskoho St., 2A, Kyiv, 04123, Ukraine

E-mail: yemets.alla@nas.gov.ua

Data on the biological activity of nanoparticles of various natures — metallic (Ag, Cu, Zn, Ti), silicon (Si) and carbon nanomaterials — on plants are summarized. Their influence on the growth, development and resistance of plants to biotic and abiotic stresses at the molecular, cellular and organismal levels is considered. Special attention is paid to nanoparticles obtained by “green” synthesis, which are characterized by high bioactivity, biocompatibility, stability and environmental safety. The physiological and biochemical effects of the action of nanoparticles are analyzed, in particular their influence on seed germination, photosynthetic activity, antioxidant system, expression of stress-induced genes, etc. It has been demonstrated that biosynthesized nanoparticles in most cases cause a positive effect without toxicity, while chemically synthesized analogues can cause significant negative changes in plants. The advantages of biosynthesized nanoparticles are emphasized: their high level of environmental safety, fungicidal, antibacterial and antiviral activity. The need for further research to optimize dosage, methods of application and assessment of long-term effects of nanomaterials, taking into account the balance between efficiency and environmental safety, is emphasized. The results obtained emphasize the prospects for the use of nanomaterials in cell biology, physiology and biotechnology of plants.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Abdalla, H., Adarosy, M.H., Hegazy, H.S., and Abdelhameed, R.E., Potential of green synthesized titanium dioxide nanoparticles for enhancing seedling emergence, vigor and tolerance indices and DPPH free radical scavenging in two varieties of soybean under salinity stress, *BMC Plant Biol.*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 560. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03945-7>
- Abinaya, K., Raja, K., Raja, K. et al., Impact of green carbon dot nanoparticles on seedling emergence, crop growth and seed yield in blackgram (*Vigna mungo* L. Hepper), *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, pp. 23783 <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75366-5>
- Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., et al., Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress, *Front. Plant Sci.*, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.932861>
- Adorinni, S., Cringoli, M.C., Perathoner, S., et al., Green Approaches to Carbon Nanostructure-Based Biomaterials, *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, no. 6, pp. 2490. <https://doi.org/10.3390/app11062490>
- Ahmad, S., Khan, Sehrish A., Hussain, A., et al., Salt stress amelioration and nutrient strengthening in spinach (*Spinacia oleracea* L.) via biochar amendment and zinc fortification: seed priming versus foliar application, *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, pp. 15062. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65834-3>
- Ahmed, S., Qasim, S., Ansari, M., Green synthesis of zinc nanoparticles and their effects on growth and yield of *Pisum sativum*, *J. King Saud University – Sci.*, 2022, vol. 34, no. 6, pp.102132. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102132>
- Alhathloul, H.A.S., Ali, B., Alghanem, S.M.S., et al., Effect of green-synthesized copper oxide nanoparticles on growth, physiology, nutrient uptake, and cadmium accumulation in *Triticum aestivum* (L.), *Ecotoxicol. Environ. Safety*, 2023, vol. 268, pp. 115701. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115701>
- Alharbi, K., Hafez, E., Omara, A.E.-D., et al., Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Silica Nanoparticles Stimulate Sugar Beet Resilience to Irrigation with Saline Water in Salt-Affected Soils, *Plants*, 2022, vol. 11, no. 22: pp. 3117. <https://doi.org/10.3390/plants11223117>
- AlQuraidi, A.O., Mosa, K.A., and Ramamoorthy, K., Phytotoxic and Genotoxic Effects of Copper Nanoparticles in Coriander (*Coriandrum sativum*-Apiaceae), *Plants (Basel)*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 19. <https://doi.org/10.3390/plants8010019>
- Ananda, S., Shobha, G., Shashidhara, K.S. et al., Nanocuprous Oxide Enhances Seed Germination and Seedling Growth in *Lycopersicon Esculentum* Plants, *J. Drug Delivery Therapeutics*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 296–302. <https://doi.org/10.22270/jddt.v9i2.2554>
- Asmat-Campos, D., Lypez-Medina, E., Montes de Oca-Vásquez, G. et al., ZnO Nanoparticles Obtained by Green Synthesis as an Alternative to Improve the Germination Characteristics of *L. esculentum*, *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2022, vol. 27, no. 7, pp. 2343. <https://doi.org/10.3390/molecules27072343>
- Bakhtiari, M., Raeisi Sadati, F., and Raeisi Sadati, S., Foliar application of silicon, selenium, and zinc nanoparticles can modulate lead and cadmium toxicity in sage (*Salvia officinalis* L.) plants by optimizing growth and biochemical status, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023, vol. 30, pp. 54223–54233. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25959-w>
- Baskar, V., Venkatesh, J., Park, S.W., Impact of biologically synthesized silver nanoparticles on the growth and physiological responses in *Brassica rapa ssp. pekinensis.*, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2015, vol. 22, no. 22, pp. 17672–17682. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4864-1>
- Borovaya, M., Horiunova, I., Plokhovska, S., Pushkarova, N., Blume, Y., Yemets, A., Synthesis, properties and bioimaging applications of silver-based quantum dots, *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22, pp. 12202. <https://doi.org/10.3390/ijms222212202>

- Borovaya, M., Naumenko, A., Horiunova, I., Plokhovska, S., Blume, Y., Yemets, A., “Green” synthesis of Ag₂S nanoparticles, study of their properties and bioimaging applications. *Applied Nanosci.*, 2020, vol. 10, no. 12, pp. 4931–4940. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01365-3>
- Buziashvili, A., Prylutska, S., Yemets, A., Effect of fullerene C₆₀ on tomato plants, *Innov. Biosyst. Bioeng.*, 2024, vol. 8, no. 4, pp. 13–22. <https://doi.org/10.20535/ibb.2024.8.4.317138>
- Cao, M., Lv, W., Wang, F., et al., Foliar Application of Zinc Oxide Nanoparticles Alleviates Phenanthrene and Cadmium-Induced Phytotoxicity in Lettuce: Regulation of Plant-Rhizosphere-Microbial Long Distance. *Environ. Sci. Technol.*, 2025, vol. 59, no. 1, pp. 730–743. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c07881>
- Cyprichová, V., Urík, M., Csbriová, S., et al., Interaction of zinc oxide nanoparticles with soil colloidal suspensions, *Chemosphere*, 2025, vol. 370, pp. 144001. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.144001>
- Daler, S., Kaya, O., Canturk, S., et al., Silicon Nanoparticles (SiO₂NPs) Boost Drought Tolerance in Grapevines by Enhancing Some Morphological, Physiological, and Biochemical Traits, *Plant. Mol. Biol. Rep.*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11105-024-01520-y>
- Dey, A., Somaiah, S., Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of *Thryallis glauca* (Cav.) Kuntze and their role as antioxidant and antibacterial, *Microsc. Res. Tech.*, 2022, vol. 85, no. 8, pp. 2835–2847. <https://doi.org/10.1002/jemt.24132>
- Doğaroğlu, Z.G., Uysal, Y., Çaylalı, Z., and Karakulak, D.S., Green nanotechnology advances: green manufacturing of zinc nanoparticles, characterization, and foliar application on wheat and antibacterial characteristics using *Mentha spicata* (mint) and *Ocimum basilicum* (basil) leaf extracts, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2023, vol. 30, no. 21, pp. 60820–60837. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26827-3>
- Donia, D.T., Carbone, M., Seed Priming with Zinc Oxide Nanoparticles to Enhance Crop Tolerance to Environmental Stresses. *Inter. J. Mol. Sci.*, vol. 24, no. 24, pp. 17612. <https://doi.org/10.3390/ijms242417612>
- Elbeshehy, E.K., Elazzazy, A.M., and Aggelis, G., Silver nanoparticles synthesis mediated by new isolates of *Bacillus spp.*, nanoparticle characterization and their activity against Bean Yellow Mosaic Virus and human pathogens, *Front. Microbial.*, 2015, vol. 6, no. 453. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00453>
- El-Sharkawy, M., Alotaibi, M.O., Li, J., et al., Effect of Nano-Zinc Oxide, Rice Straw Compost, and Gypsum on Wheat (*Triticum aestivum* L.) Yield and Soil Quality in Saline-Sodic Soil, *Nanomaterials*, 2024, vol. 14, no. 17, pp. 1450. <https://doi.org/10.3390/nano14171450>
- Faisal, M., Faizan, M., Soysal, S., Alatar, A.A., Synergistic application of melatonin and silicon oxide nanoparticles modulates reactive oxygen species generation and the antioxidant defense system: a strategy for cadmium tolerance in rice, *Front. Plant. Sci.*, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1484600>
- Faizan, M., Bhat, J.A., Chen, C., et al., Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) induce salt tolerance by improving the antioxidant system and photosynthetic machinery in tomato, *Plant Physiol. Biochem.*, 2021, vol. 161, pp. 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.002>
- Faizan, M., Bhat, J.A., Hessini, K., et al., Zinc oxide nanoparticles alleviates the adverse effects of cadmium stress on *Oryza sativa* via modulation of the photosynthesis and antioxidant defense system, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112401>
- Fouad, H., Yang, G., El-Sayed, A.A., et al., Green synthesis of AgNP-ligand complexes and their toxicological effects on *Nilaparvata lugens*, *J. Nanobiotechnol.*, 2021, vol. 19, no. 1, pp. 318. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-01068-z>
- Gao, M., Yang, Yujuan, Song, Z., Toxicity of cadmium to wheat seedling roots in the presence of graphene oxide, *Chemosphere*, 2019, vol. 233, pp. 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.127>
- Gatasheh, M.K., Shah, A.A., Sajid, A., et al., Synergistic application of melatonin and silicon alleviates chromium stress in *Brassica napus* through regulation of antioxidative defense system and ethylene metabolism, *Scientia Horticulturae*, 2023, vol. 321, pp. 112280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112280>
- Geremew, A., Carson, L., Woldesenbet, S., et al., Effect of zinc oxide nanoparticles synthesized from *Carya illinoensis* leaf extract on growth and antioxidant properties of mustard (*Brassica juncea*), *Front. Plant Sci.*, 2023, vol. 14, pp. 1108186. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1108186>
- Ghaffari Yaichi, Z., Hassanpouraghdam, M.B., Rasouli, F., et al., Zinc oxide nanoparticles foliar use and arbuscular mycorrhiza inoculation retrieved salinity tolerance in *Dracocephalum moldavica* L. by modulating growth responses and essential oil constituents, *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 492. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84198-2>
- Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., et al., Titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of *Dracocephalum*

- moldavica*, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, pp. 912. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57794-1>
- Gopinath, V., and Velusamy, P., Extracellular Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using *Bacillus* sp. GP-23 and Evaluation of Their Antifungal Activity towards *Fusarium Oxysporum*. *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2013, vol. 106, pp. 170–174. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.12.087>
- Govindarajan, M., Rajeswary, M., Muthukumar, U., et al., Single-step biosynthesis and characterization of silver nanoparticles using *Zornia diphylla* leaves: A potent eco-friendly tool against malaria and arbovirus vectors, *J. Photochem. Photobiol. B.*, 2016, vol. 161, pp. 482–489. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.06.016>
- Gupta, S.D., Agarwal, A., Pradhan, S., Phytostimulatory effect of silver nanoparticles (AgNPs) on rice seedling growth: An insight from antioxidative enzyme activities and gene expression patterns. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2018, vol. 161, pp. 624–633. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.023>
- He, A., Jiang, J., Ding, J., and Sheng, G., Blocking effect of fullerene nanoparticles (nC₆₀) on the plant cell structure and its phytotoxicity, *Chemosphere*, 2021, vol. 278, pp. 130474. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130474>
- Hu, P., An, J., Faulkner, M.M., et al., Nanoparticle Charge and Size Control Foliar Delivery Efficiency to Plant Cells and Organelles, *ACS Nano*, 2020, vol. 14, no. 7, pp. 7970–7986. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b09178>
- Huang, Q., Ayyaz, A., Farooq, M.A., et al., Silicon dioxide nanoparticles enhance plant growth, photosynthetic performance, and antioxidants defence machinery through suppressing chromium uptake in *Brassica napus* L., *Environ. Pollut.*, 2024, vol. 342, pp. 123013. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123013>
- Ihsan, M., Din, I.U., Alam, K., et al., Green Fabrication, Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using Plant Extract of *Momordica charantia* and *Curcuma zedoaria* and Their Antibacterial and Antioxidant Activities, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 2023, vol. 195, no. 6, pp. 3546–3565. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04309-5>
- Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A., et al., Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles, *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 223–245. <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1802517>
- Jain, D., and Kothari, S.L., Green Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Application in Plant Virus Inhibition, *J. Mycol Plant Pathol.*, 2014, vol. 44, pp. 21–24
- Jamdagni, P., Khatri, P., Rana, J.S., Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using flower extract of *Nyctanthes arbor-tristis* and their antifungal activity, *J. King Saud University – Science*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 168–175. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2016.10.002>
- Jian, Y., Chen, X., Ahmed, T., et al., Toxicity and action mechanisms of silver nanoparticles against the mycotoxin-producing fungus *Fusarium graminearum*, *J. Adv. Res.*, 2021, vol. 38, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.09.006>
- Kala, A., Soosairaj, S., Mathiyazhagan, S., and Raja, P., Green Synthesis of Copper Bionanoparticles to Control the Bacterial Leaf Blight Disease of Rice. *Current Sci.*, 2016, vol. 110, pp. 2011–2014
- Kathiravan, V., Ravi, S., Ashokkumar, S., et al., Green synthesis of silver nanoparticles using *Croton sparsiflorus* morong leaf extract and their antibacterial and antifungal activities, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2015, vol. 139, pp. 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.12.022>
- Kausar, H., Mehmood, A., Khan, R.T. et al., Green synthesis and characterization of copper nanoparticles for investigating their effect on germination and growth of wheat, *PLoS ONE*, 2022, vol.17, no. 6, pp. e0269987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269987>
- Khan, I., Awan, S.A., Rizwan, M., et al., Silicon nanoparticles improved the osmolyte production, antioxidant defense system, and phytohormone regulation in *Elymus sibiricus* (L.) under drought and salt stress, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2024, vol. 31, pp. 8985–8999. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31730-y>
- Khan, I., Saeed, K., and Khan, I., Nanoparticles: Properties, applications and toxicities, *Arabian J. Chemistry*, 2019, vol. 12, no.7, pp. 908–931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Khan, S., Rauf, A., Aljohani, A.S.M., et al., Green synthesis of silver and gold nanoparticles in *Callistemon viminalis* extracts and their antimicrobial activities, *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 2024, vol. 47, no. 8, pp. 1197–1211. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-02994-6>
- Kim, S.W., Jung, J.H., Lamsal, K., et al., Antifungal Effects of Silver Nanoparticles (AgNPs) against Various Plant Pathogenic Fungi, *Mycobiology*, 2012, vol. 40, no. 1, pp. 53–58. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2012.40.1.053>
- Kole, C., Kole, P., Randunu, K., et al., Nanobiotechnology can boost crop production and quality: first evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*). *BMC Biotechnol.*, 2013, vol. 13, pp. 37. <https://doi.org/10.1186/1472-6750-13-37>

- Krkobabić, A., Radetić, M., Zille, A., et al., Plant-Assisted Synthesis of Ag-Based Nanoparticles on Cotton: Antimicrobial and Cytotoxicity Studies, *Molecules*, 2024, vol. 29, no. 7, pp. 1447. <https://doi.org/10.3390/molecules29071447>
- Kumar, D., Dhankher, O.P., Tripathi, R.D., Seth, C.S., Titanium dioxide nanoparticles potentially regulate the mechanism(s) for photosynthetic attributes, genotoxicity, antioxidants defense machinery, and phytochelatin synthesis in relation to hexavalent chromium toxicity in *Helianthus annuus* L., *J. Hazard Mater.*, 2023, vol. 454, pp. 131418. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131418>
- Kumari, S., Khanna, R.R., Nazir, F., et al., Bio-Synthesized Nanoparticles in Developing Plant Abiotic Stress Resilience: A New Boon for Sustainable Approach, *Inter. J. Mol. Sci.*, 2022, vol. 23, no. 8, pp. 4452. <https://doi.org/10.3390/ijms23084452>
- Labeeb, M., Badr, A., Haroun, S.A., et al., Ultrastructural and molecular implications of ecofriendly made silver nanoparticles treatments in pea (*Pisum sativum* L.), *J. Genet. Engineer. Biotechnol.*, 2022. <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00285-1>
- Le, V.N., Rui, Y., Gui, X., et al., Uptake, transport, distribution and Bio-effects of SiO₂ nanoparticles in Bt-transgenic cotton, *J. nanobiotechnol.*, 2014, vol. 12, no. 50. <https://doi.org/10.1186/s12951-014-0050-8>
- Li, C.C., Jhou, S.M., Li, Y.C., et al., Exposure to low levels of photocatalytic TiO₂ nanoparticles enhances seed germination and seedling growth of amaranth and cruciferous vegetables, *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, pp. 18228. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23179-9>
- Li, Y., Xi, K., Liu, X., et al., Silica nanoparticles promote wheat growth by mediating hormones and sugar metabolism, *J. Nanobiotechnol.*, 2023, vol. 21, pp. 2. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01753-7>
- Liu, A., Xiao, W., Lai, W., et al., Potential Application of Selenium and Copper Nanoparticles in Improving Growth, Quality, and Physiological Characteristics of Strawberry under Drought Stress, *Agriculture*, 2024, vol. 14, no. 7, pp. 1172. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071172>
- Lv, Z., Sun, H., Du, W., et al., Interaction of different-sized ZnO nanoparticles with maize (*Zea mays*): Accumulation, biotransformation and phytotoxicity, *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 796, pp. 148927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148927>
- Lyu, S., Wei, X., Chen, J., et al., Titanium as a Beneficial Element for Crop Production, *Front. Plant Sci.*, 2017, vol. 8, pp. 597. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00597>
- Mahakham, W., Sarmah, A.K., Maensiri, S., and Theerakulpisut, P., Nanopriming technology for enhancing germination and starch metabolism of aged rice seeds using phytosynthesized silver nanoparticles, *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 8263. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08669-5>
- Malandrakis, A.A., Kavroulakis, N., and Chrysikopoulos, C.V., Use of silver nanoparticles to counter fungicide-resistance in *Monilinia fructicola*, *Sci. Total Environ.*, 2020, vol. 747, pp.141287. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141287>
- Malik, M.S., Rehman, A., Shah, I.H., et al., Green synthesized silicon dioxide nanoparticles (SiO₂NPs) ameliorated the cadmium toxicity in melon by regulating antioxidant enzymes activity and stress-related genes expression, *Environ. Pollution.*, 2025, vol. 366, no. 125459. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125459>
- Mallmann, E.J.J., Cunha, F.A., Castro, B.N.M.F., et al., Antifungal Activity of Silver Nanoparticles Obtained by Green Synthesis, *Rev. Inst. Med. Trop. Sao Paulo.*, 2015, vol. 57, pp. 165–167. <https://doi.org/10.1590/S0036-46652015000200011>
- Martínez-Cisterna, D., Rubilar, O., Tortella, G., et al., Silver Nanoparticles as a Potent Nanopesticide: Toxic Effects and Action Mechanisms on Pest Insects of Agricultural Importance-A Review, *Molecules*, 2024, vol. 29, no. 23, pp. 5520. <https://doi.org/10.3390/molecules29235520>
- Mathur, J., and Goswami, P., Positive Impact of Green Synthesized Silica Nanoparticles in Plant Growth Promotion and Physiological Responses of *Eruca sativa* Mill, *J. Soil. Sci. Plant. Nutr.*, 2024, vol. 24, pp. 2263–2275. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01725-w>
- Meenu, N.C., Manokari, S.L., and Senthil, T.S., Plant-mediated green synthesis, characterization and antibacterial efficacy of Ag-NPS using extracts of *Wrightia tinctoria* leaves for biological applications, *J. Optoelectron. Biomed. Mater.*, 2021, vol. 13, pp. 88. <https://doi.org/10.15251/JOBM.2021.132.77>
- Mehmood, A., Brief overview of the application of silver nanoparticles to improve growth of crop plants, *IET Nanobiotechnol.*, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 701–705. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2017.0273>
- Mirza, F.S., Aftab, Z.-E.-H., Ali, M.D., et al., Green synthesis and application of GO nanoparticles to augment growth parameters and yield in mungbean (*Vigna radiata* L.), *Front. Plant Sci.*, 2022, vol. 13, pp. 1040037. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1040037>
- Moreno-Vargas, J.M., Echeverry-Cardona, L.M., Moreno-Montoya, L.E., and Restrepo-Parra, E., Evaluation of Antifungal Activity of Ag Nanoparticles Synthesized by Green Chemistry against *Fusarium solani* and *Rhizopus stolonifera*, *Nanomaterials (Basel)*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 548. <https://doi.org/10.3390/nano13030548>

- Mosa, K.A., El-Naggar, M., Ramamoorthy, K., et al., Copper Nanoparticles Induced Genotoxicity, Oxidative Stress, and Changes in Superoxide Dismutase (SOD) Gene Expression in Cucumber (*Cucumis sativus*) Plants, *Front. Plant. Sci.*, 2018, vol. 9, pp. 872. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00872>
- Mustafa, N., Raja, N.I., Ilyas, N., et al., Exogenous Application of Green Titanium Dioxide Nanoparticles (TiO₂ NPs) to Improve the Germination, Physiochemical, and Yield Parameters of Wheat Plants under Salinity Stress, *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 15, pp. 4884. <https://doi.org/10.3390/molecules27154884>
- Nabi, G., Anjum, T., Aftab, Z.E., et al., TiO₂ nanoparticles: Green synthesis and their role in lessening the damage of *Colletotrichum graminicola* in sorghum, *Food. Sci. Nutr.*, 2024, vol. 12, no. 10, pp. 7379–7391. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4297>
- Nair, P.M., and Chung, I.M., A mechanistic study on the toxic effect of copper oxide nanoparticles in soybean (*Glycine max* L.) root development and lignification of root cells, *Biol. Trace Elem. Res.*, 2014, vol. 162, no. 1–3, pp. 342–352. <https://doi.org/10.1007/s12011-014-0106-5>
- Nair, P.M., and Chung, I.M., Assessment of silver nanoparticle-induced physiological and molecular changes in *Arabidopsis thaliana*, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2014, vol. 21, no. 14, pp. 8858–8869. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2822-y>
- Nair, P.M., Chung, I.M., Study on the correlation between copper oxide nanoparticles induced growth suppression and enhanced lignification in Indian mustard (*Brassica juncea* L.), *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2015, vol. 113, pp. 302–313. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.013>
- Nejatzadeh, F., Effect of silver nanoparticles on salt tolerance of *Satureja hortensis* L. during *in vitro* and *in vivo* germination tests, *Heliyon*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. e05981. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05981>
- Nguyen, D.T.C., Le, H.T.N., Nguyen, T.T., et al., Multifunctional ZnO nanoparticles bio-fabricated from *Canna indica* L. flowers for seed germination, adsorption, and photocatalytic degradation of organic dyes, *J. Hazardous Materials*, 2021, vol. 420, no. 126586. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126586>
- Okaiyeto, K., Gigliobianco, M.R., and Di Martino, P., Biogenic Zinc Oxide Nanoparticles as a Promising Antibacterial Agent: Synthesis and Characterization, *Int. J. Mol. Sci.*, 2024, vol. 25, no. 17, pp. 9500. <https://doi.org/10.3390/ijms25179500>
- Oraibi, A.G., Rashad, A.A., and Ahmed, M.H., Carum carvi mediated green synthesis of copper nanoparticles and its effect on *Solanum lycopersicum* seedlings, *J. Aridland Agric.*, 2023, vol. 9, pp. 9–15. <https://doi.org/10.25081/jaa.2023.v9.8191>
- Pramod, M., Dhoke, S., Khanna, A., Effect of Nano-ZnO Particle Suspension on Growth of Mung (*Vigna radiata*) and Gram (*Cicer arietinum*) Seedlings Using Plant Agar Method, *J. Nanotechnol.*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/696535>
- Pražak, R., Świącilo, A., Krzepiło, A., et al., Impact of Ag Nanoparticles on Seed Germination and Seedling Growth of Green Beans in Normal and Chill Temperatures, *Agriculture*, 2020, vol. 10, no. 8, pp. 312. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080312>
- Prylutska, S.V., Franskevych, D.V., and Yemets, A.I., Cellular Biological and Molecular Genetic Effects of Carbon Nanomaterials in Plants, *Cytol. Genet.*, 2022, vol. 56, no. 4, pp. 351–360. <https://doi.org/10.1155/2011/69653510.3103/S0095452722040077>
- Prylutska, S.V., Matyshevska, O.P., Grynyuk, I.I., et al., Biological effects of C60 fullerenes *in vitro* and in a model system, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2007, vol. 468, pp. 265–274. <https://doi.org/10.1080/15421400701230105>
- Prylutska, S.V., Tkachenko, T.A., and Tkachenko, V.V., Application of Carbon Nanomaterials for the Regulation of Stress Resistance in Agricultural Plants, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 923–944. (In Ukrainian)
- Prylutska, S.V., Tkachenko, T.A., Tkachenko, V.V., Yemets, A.I. et al., The Role of Aquaporins and Carbon Nanomaterials in Abiotic Stress in Plants, *Cytol. Genet.*, 2024, vol. 58, pp. 428–439. <https://doi.org/10.3103/S0095452724050104>
- Qian, H., Peng, X., Han, X., et al., Comparison of the toxicity of silver nanoparticles and silver ions on the growth of terrestrial plant model *Arabidopsis thaliana*, *J. Environ. Sci.*, 2020, vol. 25, no. 9, pp. 1947–1955. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(12\)60301-5](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(12)60301-5)
- Quiterio-Gutiérrez, T., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., et al., The Application of Selenium and Copper Nanoparticles Modifies the Biochemical Responses of Tomato Plants under Stress by *Alternaria solani*, *Int. J. Mol. Sci.*, 2019, vol. 20, no. 8, pp. 1950. <https://doi.org/10.3390/ijms20081950>
- Qureshi, A.K., Farooq, U., Shakeel, Q., et al., The Green Synthesis of Silver Nanoparticles from *Avena fatua* Extract: Antifungal Activity against *Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici*, *Pathogens*, 2023, vol. 12, no. 10, pp. 247. <https://doi.org/10.3390/pathogens12101247>
- Rafique, M., Sohaib, M., Tahir, R., et al., Plant-Mediated Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Peel Extract of Citrus reticulata for Boosting Seed Germination of Brassica nigra Seeds, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 3573–3579. <https://doi.org/10.1166/jnn.2021.19015>

- Rahimzadeh, C.Y., Barzinjy, A.A., Mohammed, A.S., and Hamad, S.M., Green synthesis of SiO₂ nanoparticles from *Rhus coriaria* L. extract: Comparison with chemically synthesized SiO₂ nanoparticles, *PLoS One*, 2022, vol. 17, no. 8, pp. e0268184. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268184>
- Rao, S.T., and Shekhawat, G.S., Toxicity of ZnO engineered nanoparticles and evaluation of their effect on growth, metabolism and tissue specific accumulation in Brassica juncea, *J. Environ. Chem. Engineer.*, 2014, vol. 2, pp. 105–114
- Rastogi, A., Tripathi, D.K., Yadav, S., et al., Application of silicon nanoparticles in agriculture, *3 Biotech.*, 2019, vol. 9, no. 90. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>
- Raza, M.A.S., Amin, J., Valipour, M., et al., Cu-nanoparticles enhance the sustainable growth and yield of drought-subjected wheat through physiological progress, *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, pp. 14254. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62680-1>
- Rodrigues, S., Avellan, A., Bland, G.D., et al., Effect of a Zinc Phosphate Shell on the Uptake and Translocation of Foliarly Applied ZnO Nanoparticles in Pepper Plants (*Capsicum annum*), *Environ. Sci. Technol.*, 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08723>
- Salam, A., Khan, A.R., Liu, L., et al., Seed priming with zinc oxide nanoparticles downplayed ultrastructural damage and improved photosynthetic apparatus in maize under cobalt stress, *J. Hazard. Mater.*, 2022, vol. 423(Pt A), pp. 127021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127021>
- Samadi, S., Saharkhiz, M.J., Azizi, M., et al., Exposure to single-walled carbon nanotubes differentially affect in vitro germination, biochemical and antioxidant properties of *Thymus daenensis* celak. Seedlings, *BMC Plant Biol.*, 2023, vol. 23, pp. 579. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04599-9>
- Sánchez-Pérez, D.M., Márquez-Guerrero, S.Y., Ramírez-Moreno, A., et al., Impact of Biologically and Chemically Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles on Seed Germination and Seedlings' Growth, *Horticulturae*, 2023, vol. 9, no. 11, pp. 1201. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111201>
- Sarkar, J., Chakraborty, N., Chatterjee, A., et al., Green Synthesized Copper Oxide Nanoparticles Ameliorate Defence and Antioxidant Enzymes in *Lens culinaris*, *Nanomaterials*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 312. <https://doi.org/10.3390/nano10020312>
- Sarkhosh, S., Kahrizi, D., Darvishi, E. et al., Effect of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) on Seed Germination Characteristics in Two Brassicaceae Family Species: *Camelina sativa* and *Brassica napus* L., *J. Nanomaterials*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1892759>
- Sehrish, A.K., Ahmad, S., Alomrani, S.O., et al., Nutrient strengthening and lead alleviation in Brassica Napus L. by foliar ZnO and TiO₂-NPs modulating antioxidant system, improving photosynthetic efficiency and reducing lead uptake, *Sci. Rep.*, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70204-0>
- Şener, S., Saygi, H., The Role of Silver Nanoparticles in Response of In Vitro Boysenberry Plants to Drought Stress, *Horticulturae*, 2023, vol. 9, no. 11, pp. 1177. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111177>
- Shaban, A.S., Owda, M.E., Basuoni, M.M., et al., *Punica granatum* peel extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles: structure and evaluation of their biological applications, *Biomass Conv. Bioref.*, 2024, vol. 14, pp. 12265–12281. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03185-7>
- Shafiq, H., Shani, M.Y., Ashraf, M.Y., et al., Copper Oxide Nanoparticles Induced Growth and Physio-Biochemical Changes in Maize (*Zea mays* L.) in Saline Soil, *Plants*, 2024, vol. 13, no. 8, pp. 1080. <https://doi.org/10.3390/plants13081080>
- Shah, A.A., Aslam, S., Akbar, M., et al., Combined effect of Bacillus fortis IAGS 223 and zinc oxide nanoparticles to alleviate cadmium phytotoxicity in Cucumis melo. *Plant Physiol. Biochem.*, 2021, vol. 158, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.011>
- Shah, A.A., Usman, S., Noreen, Z., et al., Fullerenol nanoparticles and AMF application for optimization of Brassica napus L. resilience to lead toxicity through physio-biochemical and antioxidative modulations, *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 30992. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82086-3>
- Shah, I.H., Manzoor, M.A., Sabir, I.A., et al., Phytotoxic effects of chemically synthesized copper oxide nanoparticles induce physiological, biochemical, and ultrastructural changes in Cucumis melo, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2023, vol. 30, no. 18, pp. 51595–51606 <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26039-9>
- Shaikhaldein, H.O., Al-Qurainy, F., Nadeem, M., et al., Biosynthesis of copper nanoparticles using *Solenostemma argel* and their effect on enhancing salt tolerance in barley plants, *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, pp. 12701. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63641-4>
- Sharma, D., Afzal, S., and Singh, N.K., Nanoprimering with phytosynthesized zinc oxide nanoparticles for promoting germination and starch metabolism in rice seeds, *J. Biotechnol.*, 2021, vol. 336, pp. 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.06.014>
- Shi, H., Wen, H., Xie, Sh., et al., Antifungal activity and mechanisms of AgNPs and their combination with azoxystrobin against *Magnaporthe oryzae*, *Environ. Sci. Nano.*, 2023, vol. 10, pp. 2412–2426. <https://doi.org/10.1039/D3EN00168G>
- Singh, H., Desimone, M.F., Pandya, S., et al., Revisit-

- ing the Green Synthesis of Nanoparticles: Uncovering Influences of Plant Extracts as Reducing Agents for Enhanced Synthesis Efficiency and Its Biomedical Applications, *Int. J. Nanomedicine*, 2023, vol. 18, pp. 4727–4750. <https://doi.org/10.2147/IJN.S419369>
- Singh, J., Kumar, A., Nayal, A.S., et al., Comprehensive antifungal investigation of green synthesized silver nanoformulation against four agriculturally significant fungi and its cytotoxic applications, *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, pp. 5934. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56619-9>
- Singh, T., Saffellah, P., and Umar, S., Foliar application of zinc oxide (ZnO) nanoparticles ameliorates growth, yield traits, osmolytes, cell viability, and antioxidant system of *Brassica juncea* (L.) Czern. grown in lead (Pb) stress, *Chemosphere*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143950>
- Slomberg, D.L., and Schoenfisch, M.H., Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*, *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, no. 18, pp. 10247–10254. <https://doi.org/10.1021/es300949f>
- Soliman, M., Qari, S.H., Abu-Elsaoud, A., et al., Rapid green synthesis of silver nanoparticles from blue gum augment growth and performance of maize, fenugreek, and onion by modulating plants cellular antioxidant machinery and genes expression, *Acta Physiol. Plant*, 2020, vol. 42, pp. 148. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03131-y>
- Soliman, M.H., Alghanem, S.M.S., Alsudays, I.M., et al., Co-application of titanium nanoparticles and melatonin effectively lowered chromium toxicity in lemon balm (*Melissa officinalis* L.) through modifying biochemical characteristics, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2024, vol. 31, no. 17, pp. 25258–25272. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32771-7>
- Subbaiah, L.V., Prasad, T.N., Krishna, T.G., et al., Novel Effects of Nanoparticulate Delivery of Zinc on Growth, Productivity, and Zinc Biofortification in Maize (*Zea mays* L.), *J. Agric. Food Chem.*, 2016, vol. 64, no. 19, pp. 3778–3788. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00838>
- Sun, W., Shahrajabian, M.H., Huang, Q., Soybean seeds treated with single walled carbon nanotubes (SwCNTs) showed enhanced drought tolerance during germination, *Inter. J. Adv. Biol. & Biomed. Res.*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 9–16. <https://doi.org/10.33945/SAMI/IJABBR.2020.1.2>
- Tabassum, R.Z., Mehmood, A., Khalid, A.U.R., et al., Green synthesis of silver nanoparticles for antifungal activity against tomato fusarium wilt caused by *Fusarium oxysporum*, *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 2024, vol. 61, pp. 103376. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103376>
- Tahira, S., Bahadur, S., Lu, X., et al., ZnONPs alleviate cadmium toxicity in pepper by reducing oxidative damage, *J. Environ. Manage*, 2025, vol. 373, pp. 123796. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123796>
- Takahashi, M., Nozoye, T., Kitajima, N., et al., In vivo analysis of metal distribution and expression of metal transporters in rice seed during germination process by microarray and X-ray Fluorescence Imaging of Fe, Zn, Mn, and Cu, *Plant Soil*, 2009, vol. 325, pp. 39–51. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0045-7>
- Teyabeen, A.A., and Kostant, B., Effect of methods application of copper nanoparticles in the growth of avocado plants, *Sci. Total Environ.*, 2023, vol. 880, pp. 163341–163341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163341>
- Tripathi, N., Pavelyev, V., and Islam, S.S., Synthesis of carbon nanotubes using green plant extract as catalyst: unconventional concept and its realization, *Appl. Nanosci.*, 2017, vol. 7, pp. 557–566. <https://doi.org/10.1007/s13204-017-0598-3>
- Ukidave, V.V., Ingale, L.T., Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles from *Coriandrum sativum* and Their Use as Fertilizer on Bengal Gram, Turkish Gram, and Green Gram Plant Growth, *Inter. J. Agronomy*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8310038>
- Varympopi, A., Dimopoulou, A., Theologidis, I., et al., Bactericides Based on Copper Nanoparticles Restrict Growth of Important Plant Pathogens, *Pathogens*, 2020, vol. 9, no. 12, pp. 1024. <https://doi.org/10.3390/pathogens9121024>
- Vasiljevic, Z., Vunduk, J., Bartolic, D., et al., An Eco-friendly Approach to ZnO NP Synthesis Using *Citrus reticulata* Blanco Peel/Extract: Characterization and Antibacterial and Photocatalytic Activity, *ACS Appl. Bio. Mater.*, 2024, vol. 7, no. 5, pp. 3014–3032. <https://doi.org/10.1021/acsabm.4c00079>
- Vivekanandhan, P., Swathy, K., Thomas, A., et al., Insecticidal Efficacy of Microbial-Mediated Synthesized Copper Nano-Pesticide against Insect Pests and Non-Target Organisms, *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 2021, vol. 18, no. 19, pp. 10536. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910536>
- Wahid, I., Kumari, S., Ahmad, R., et al., Silver Nanoparticle Regulates Salt Tolerance in Wheat Through Changes in ABA Concentration, Ion Homeostasis, and Defense Systems, *Biomolecules*, 2020, vol. 10, no. 11, pp. 1506. <https://doi.org/10.3390/biom10111506>
- Wang, C., Liu, H., Chen, J., et al., Carboxylated multi-walled carbon nanotubes aggravated biochemical and subcellular damages in leaves of broad bean (*Vicia faba* L.) seedlings under combined stress of lead and cadmium, *J. Hazard. Mater.*, 2014, vol. 274, pp. 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.036>
- Wang, Z., Xie, X., Zhao, J., et al., Xylem- and phloem-

- based transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays* L.), *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, no. 8, pp. 4434–4441. <https://doi.org/10.1021/es204212z>
- Xiao, X., Wang, X., Liu, L., et al., Effects of three graphene-based materials on the growth and photosynthesis of *Brassica napus* L., *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2022, vol. 234, pp. 113383. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113383>
- Yasur, J., and Rani, P.U., Lepidopteran insect susceptibility to silver nanoparticles and measurement of changes in their growth, development and physiology, *Chemosphere*, 2015, vol. 124, pp. 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.029>
- Zhang, R., Zhang, H., Tu, C., et al., Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn(II) ion to corn (*Zea mays* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.) during germination, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2015, vol. 22, pp. 11109–11117. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4325-x>
- Zhang, X., Cao, H., Wang, H., et al., Effects of graphene on morphology, microstructure and transcriptomic profiling of *Pinus tabuliformis* Carr. roots, *PLOS ONE*, 2021, vol. 16, no. 7, pp. e0253812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253812>
- Zhao, F., Xin, X., Cao, Y., et al., Use of Carbon Nanoparticles to Improve Soil Fertility, Crop Growth and Nutrient Uptake by Corn (*Zea mays* L.), *Nanomaterials (Basel)*, 2021, vol. 11, no. 10, pp. 2717. <https://doi.org/10.3390/nano11102717>
- Zhuzhukin, K.V., Evlakov, P.M., Grodetskaya, T.A., et al., Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Growth and Expression of Stress Resistance Genes in Birch, *Forests*, 2023, vol. 14, no. 1, pp. 163. <https://doi.org/10.3390/f14010163>

Надійшла в редакцію 04.07.2025

Після доопрацювання 08.08.2025

Прийнята до друку 18.11.2025