

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені В. Н. КАРАЗІНА

Біологічний факультет

Кафедра молекулярної біології та біотехнології

**СУЧАСНІ АСПЕКТИ НАНОБІОТЕХНОЛОГІЇ РОСЛИН:
НАНОЧАСТИНКИ В РОСЛИНАХ, ТРАНСПОРТ, ПОГЛИНАННЯ,
ФІЗІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ**

Кваліфікаційна робота

студентки 4 курсу

Групи БЗБТ-41

Любиченко Сніжани

В'ячеславівни

Науковий керівник:

Авксентьева О.О.

Харків 2024

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота на тему: «Сучасні аспекти нанобіотехнології рослин: наночастинки в рослинах, транспорт, поглинання, фізіологічна активність».

Робота включає: 67 сторінок, 1 таблиця, 6 рисунків, використаних джерел – 71, з них англomовних – 70.

В роботі представлений аналіз сучасного стану фундаментальних та експериментальних робіт в галузі нанобіотехнології вищих рослин. Основні методи, використані в дослідженні – інформаційно-пошуковий та аналітичний. За аналізом оглядових та експериментальних наукових статей встановлено, що нанофітобіотехнологія є сучасною, активно досліджуваною галуззю нанобіотехнології. Показано, що основні напрями сучасних досліджень в галузі нанобіотехнологій рослин спрямовані на вивчення: механізмів поглинання НЧ надземною та кореневої системою рослинного організму, транслокації НЧ по транспортним шляхам в рослини, фізіологічної дії та фітотоксичності НЧ різної природи, активізації адаптивних реакцій на дію стресових факторів абіотичної та біотичної природи за впливу НЧ. Окреслено перспективи практичних сфер застосування НЧ у сучасному рослинництві, які пов'язані з адресною доставкою та контрольованим вивільненням агрохімікатів різної природи – мінеральних добрив, пестицидів, фунгіцидів та ін., також зі стимуляцією захисних реакцій та використанням у генетичній інженерії рослин. На прикладі детального аналізу експериментальної роботи показаний вплив композиції наночастинок металів на параметри антиоксидантного метаболізму рослин.

Ключові слова: *фітонанобіотехнології, наночастинки (НЧ), поглинання, транспорт, фізіологічна активність, фітотоксичність, антиоксидантна система.*

ABSTRACT

Qualification work on the topic: "Modern aspects of plant nanobiotechnology: nanoparticles in plants, transport, absorption, physiological activity."

The work includes: 67 pages, 1 table, 6 figures, used sources – 70, of which 70 are in English.

The paper presents an analysis of the current state of fundamental and experimental work in the field of nanobiotechnology of higher plants. The main methods used in the research are information-search and analytical. Based on the analysis of review and experimental scientific articles, it was established that nanophytobiotechnology is a modern, actively researched branch of nanobiotechnology. It is shown that the main directions of modern research in the field of nanobiotechnologies of plants are aimed at studying: the mechanisms of absorption of NPs by the above-ground and root systems of plant organisms, the translocation of NPs along transport routes into plants, the physiological action and phytotoxicity of NPs of various natures, the activation of adaptive reactions to the action of stress factors of abiotic and of biotic nature under the influence of NPs.

The prospects of practical areas of application of NPs in modern crop production are outlined, which are related to targeted delivery and controlled release of agrochemicals of various nature - mineral fertilizers, pesticides, fungicides, etc., as well as stimulation of protective reactions and use in genetic engineering of plants.

The influence of the composition of metal nanoparticles on the parameters of the antioxidant metabolism of plants is shown on the example of a detailed analysis of the experimental work.

Key words: *phytonanobiotechnology, nanoparticles (NPs), absorption, transport, physiological activity, phytotoxicity, antioxidant system.*

ЗМІСТ

| | |
|--|-----------|
| ВСТУП..... | 6 |
| РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 8 |
| 1.1 НАНОБІОТЕХНОЛОГІЇ | 8 |
| 1.3 ПОГЛИНАННЯ, ТРАНСЛОКАЦІЯ ТА БІОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК У РОСЛИН..... | 12 |
| 1.4 МОБІЛІЗАЦІЯ НАНОЧАСТИНОК У РОСЛИН..... | 13 |
| 1.6. ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА «ЗЕЛЕНИЙ» СИНТЕЗ НАНОЧАСТИНОК | 18 |
| 1.7. МЕХАНІЗМИ ДІЇ НАНОМАТЕРІАЛІВ У РОСЛИНАХ..... | 19 |
| РОЗДІЛ 2. ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК У КОРЕНЯХ РОСЛИН | 22 |
| 2.1. МЕХАНІЗМИ ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК РОСЛИНАМИ | 22 |
| 2.2. ШЛЯХИ ПОГЛИНАННЯ КОРЕНЕМ | 24 |
| 2.3. КЛЮЧОВІ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЧЕРЕЗ КОРІННЯ | 25 |
| 2.3.1. ВПЛИВ РОЗМІРУ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ | 25 |
| 2.3.2. ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗАРЯДУ | 26 |
| 2.4. ТРАНСПОРТ НАНОЧАСТИНОК У КОРЕНІ | 27 |
| 2.5.1. ТРАНСПОРТНИЙ ШЛЯХ | 29 |
| 2.4.2. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК, ЩО ПОГЛИНАЮТЬСЯ ЧЕРЕЗ КОРІННЯ | 30 |
| 2.4.2.1. ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ | 30 |
| 2.4.2.2. ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗАРЯДУ | 31 |
| РОЗДІЛ 3. ТРАНСПОРТ ТА РОЗПОДІЛ НАНОЧАСТИНОК У ЛИСТКАХ..... | 32 |
| 3.1. ТРАНСПОРТНИЙ ШЛЯХ НАНОЧАСТИНОК У ЛИСТІ | 32 |
| 3.2. РОЗПОДІЛ НАНОЧАСТИНОК, ПОГЛИНЕНИХ ЛИСТЯМ | 32 |
| 3.3. КЛЮЧОВІ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК, ПОГЛИНЕНИХ ЛИСТЯМ | 33 |
| 3.3.1. ВПЛИВ РОЗМІРУ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.2. ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗАРЯДУ | 34 |
| 3.3.3. ІНШІ ФАКТОРИ ВПЛИВУ | 35 |
| РОЗДІЛ 4. ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЛИСТЯМ РОСЛИН | 36 |
| 4.1. ШЛЯХИ ПОЗАКОРЕНЕВОГО ПОГЛИНАННЯ | 36 |
| 4.2. КЛЮЧОВІ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЧЕРЕЗ ЛИСТЯ..... | 37 |
| 4.2.1. ВПЛИВ РОЗМІРУ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ | 37 |
| 4.2.2. ВПЛИВ ФОРМИ ТА ЗАРЯДУ ПОВЕРХНІ..... | 39 |
| 4.2.3. ВПЛИВ ВИДІВ РОСЛИН | 40 |
| РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК НА ФІЗІОЛОГІЧНУ АКТИВНІСТЬ РОСЛИН | 41 |
| 5.1. НАНОЧАСТИНКИ СПРИЯЮТЬ РОЗВИТКУ РОСЛИН І ВРОЖАЙНОСТІ..... | 41 |
| 5.2. НАНОЧАСТИНКИ ПОЛЕГШУЮТЬ АБІОТИЧНИЙ СТРЕС РОСЛИН | 44 |
| 5.3. ТОКСИЧНІСТЬ НАНОЧАСТИНОК ДЛЯ РОСЛИН..... | 45 |
| 5.3.1. ІНГІБУЮЧА ДІЯ НАНОЧАСТИНОК НА РІСТ РОСЛИН | 46 |
| 5.3.2. ГЕНОТОКСИЧНІСТЬ ТА ПОШКОДЖЕННЯ НАНОЧАСТИНОК У РОСЛИНАХ, ВИКЛИКАНЕ ОКИСЛЮВАЛЬНИМ СТРЕСОМ | 46 |
| РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ РОБОТИ | 49 |
| МЕТОДИКА | 51 |
| РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ | 54 |
| ВИСНОВКИ: | 59 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:..... | 60 |

ВСТУП

Сучасна наукова спільнота все більше звертає увагу на застосування нанобіотехнологій у рослинництві, враховуючи потребу у високопродуктивних і стійких сортах. Завдяки своїм унікальними властивостям наночастинки можуть запропонувати інноваційне рішення для дефіциту поживних речовин у культурах, сприяти росту та розвитку рослин, а також пригнічувати патогени рослин. [1]

Наночастинки мають широкий спектр застосувань, зокрема модифікація генетики рослин, покращення росту та розвитку сільськогосподарських культур та контроль вивільнення агрохімікатів. Наночастинки можуть переносити чужорідні речовини в рослинні клітини завдяки своєму малому розміру, одночасно захищаючи сторонні речовини від деградації. Також вони забезпечують новий метод захисту рослин від конкретних сільськогосподарських проблем. Тим не менш, дослідження показали, що наночастинки можуть негативно впливати на ріст рослин і спричиняти фітотоксичність. [2]

Наночастинки можуть поглинатися та транспортуватися рослинами, що залежить від різних факторів, наприклад, розмір, поверхневий заряд, концентрація, час впливу та вид рослин. Наночастинки можуть потрапляти в рослинну систему кількома шляхами, такими як продихи, кореневі волоски та тріщини на поверхні листя. Потрапляючи всередину рослини, наночастинки можуть рухатися через систему рослин шляхом дифузії, об'ємного потоку та завантаження флоєми. [1, 3]

Розуміння механізму дії та біоаккумуляції наночастинок у рослинах може допомогти прояснити біологічну безпеку наночастинок і надати вказівки щодо безпечного використання наночастинок.

Метою цієї роботи є проведення аналізу сучасного стану фундаментальних та експериментальних робіт в галузі нанобіотехнології вищих рослин

Завданнями роботи є :

1. Проведення інформаційно-пошукового аналізу наукових статей з сучасних аспектів нанобіотехнології рослин за використання пошукових інтернет-платформ.
2. Аналіз основних напрямів сучасних досліджень в галузі нанобіотехнології рослин.
3. Розгляд та аналіз теоретичних аспектів фітонанобіотехнологій: механізми поглинання, транспорт та фізіологічна дія та фітотоксичність наночастинок в рослинному організмі.
4. Оцінка перспективи можливих практичних сфер застосування фітонанобіотехнологій у сучасному рослинництві.
5. Аналіз впливу наночастинок металів на параметри антиоксидантного метаболізму рослин на прикладі експериментальної наукової роботи.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Нанобіотехнології

Нанобіотехнології – це галузь науки, яка поєднує в собі нанотехнологію і біологію: застосовує наномасштабні методи для виконання процесів на молекулярних рівнях, займається розробкою біотехнологічних продуктів, розміри яких варіюються від 1 до 100 нм; використовує біологічні молекули із нанотехнологічною метою; застосовує нанотехнологічні пристрої та наноматеріали у біотехнології.

Завданням нанобіотехнологій є аналіз біологічних наносистем як джерела розробки нових матеріалів — модифікованих біологічних систем як основу для вивчення фундаментальних принципів біо- та нанопроцесів. Прикладом використання біомакромолекул може слугувати ДНК-нанотехнологія, що ґрунтується на принципі комплементарності основ ДНК задля для конструювання наноструктур із заданими формою і розміром. [1]

Розробка нових методів синтезу та модифікації матеріалів на основі біологічних наносистем

Нанотехнологія — це багатодисциплінарна галузь науки, яка займається маніпулюванням речовини в атомному та молекулярному масштабі. Вона поєднує фізику, хімію, біологію, інженерію та інформатику для створення нових матеріалів і пристроїв з унікальними властивостями. Нанотехнологія швидко розвивається і включає в себе маніпуляції матерією на нанорівні. Ця технологія має потенціал для революції в різних галузях промисловості, включаючи медицину, електроніку, енергетику та матеріалознавство. Нанотехнології охоплюють розробку та створення нових матеріалів і пристроїв з унікальними властивостями, яких немає в масових аналогах [1, 2]. Сфера нанотехнологій вже принесла багато проривів, таких як покращені системи доставки ліків, більш ефективні сонячні батареї та міцніші і легші матеріали.

Концепція нанотехнології була вперше представлена фізиком Річардом Фейнманом у його знаменитій лекції «На дні є багато місця» в 1959 році. Однак лише у 1980-х роках вчені змогли маніпулювати окремими атомами та молекулами за допомогою скануючої тунельної мікроскопії (СТМ) та атомно-силової мікроскопії (АСМ). Відтоді нанотехнології стрімко розвивалися і стали однією з найперспективніших галузей науки. [3, 4]

Однією з найбільш значущих переваг нанотехнології є її здатність створювати матеріали з унікальними властивостями, яких немає в природі. Наприклад, вуглецеві нанотрубки неймовірно міцні та легкі, що робить їх ідеальними для використання в аерокосмічній галузі. Наночастинки також можна використовувати для створення матеріалів, які самоочищаються або мають антимікробні властивості [4]. Ще одна сфера, де нанотехнології показали великі перспективи, – медицина. Наночастинки можна використовувати як системи доставки ліків, що дозволяє націлювати ліки безпосередньо на ракові клітини або інші хворі тканини, мінімізуючи побічні ефекти на здорові клітини. Наносенсори також можна використовувати для раннього виявлення таких захворювань, як рак або хвороба Альцгеймера. Нанотехнології також мають потенційне застосування у виробництві та зберіганні енергії. Наприклад, сонячні елементи, виготовлені з наночастинок, можуть бути більш ефективними, ніж традиційні кремнієві сонячні елементи. Наноматеріали також можна використовувати для зберігання енергії в батареях або суперконденсаторах [5]. Завдяки продовженню досліджень і розробок нанотехнології обіцяють суттєві досягнення в різних сферах, які можуть мати глибокий вплив на суспільство.

Ця молекулярна техніка суттєво перевершує види доступних методів, використовуваних людьми в традиційних виробничих технологіях. Наприклад, у клітинах бактерій *Escherichia coli* діаметром приблизно 1 мм знаходиться

цифрова пам'ять у геномі, еквівалентна дискеті високої щільності. Рибосома самозбирається з понад 50 різних білків, еукаріотичні клітини контролюють синтез ДНК з частотою помилок менше, ніж 10 на кожен доданий нуклеотид, а зелені рослини перетворюють більше енергії та синтезують більшу кількість різноманітних хімічних сполук, ніж у сучасній світовій хімічній промисловості.

Можливе створення нових класів міцних, легких та екологічно безпечних матеріалів, пристроїв та систем, здатних революціонізувати виробництво електроніки, схем, комп'ютерів, сенсорів, конструкційних та інтелектуальних матеріалів, а також систем доставки ліків, мікророботів та хірургічних інструментів. Реалізація цих технологій і систем вимагатиме розробки абсолютно нових підходів до створення дво- і тривимірних наноархітектур, заснованих на неорганічних, органічних або біологічних шаблонах. [7]

Це відкриває широкі можливості для профілактики та лікування різноманітних захворювань, що може призвести до значного покращення якості життя та подовження тривалості життя людей.

У майбутньому методи нанобіотехнології можуть кардинально змінити фармацевтичну сферу завдяки розробці нанопрепаратів та інноваційних методів їх доставки до осередків ураження на рівні тканин та клітин. Це відкриє широкі можливості для профілактики та лікування різноманітних захворювань, що призведе до значного покращення якості життя та подовження його тривалості.

Розвиток нанобіотехнологій знаменує нову еру в науці, відкриваючи широкі можливості для вирішення проблем, пов'язаних зі здоров'ям людини, охороною навколишнього середовища та стійким розвитком.

1.2 НАНОЧАСТИНКИ В РОСЛИННИЦТВІ

Відповідно до стандартів ASTM, наноматеріали (НМ) можна визначити як природні або промислові матеріали, як правило, в межах від 1 до 100 нм. НМ мають невеликий розмір і високе відношення поверхні до об'єму, що надає їм чудових хімічних і фізичних властивостей порівняно з їх об'ємними аналогами. НМ мають унікальні та різноманітні фізико-хімічні властивості, що робить їх придатним для використання в різних галузях. Останнім часом нанотехнології набувають інтересу також у рослинництві через необхідність розробки мініатюрних ефективних систем для покращення проростання насіння, росту та захисту рослин від абіотичних і біотичних стресів. [6, 10]

Металеві наночастинки (НЧ), такі як НЧ золота (Au) і срібла (Ag), були широко впроваджені в рослинництві для різних застосувань. Їх хімічний синтез є досить дорогим і вимагає використання небезпечних хімікатів. Проте були розроблені більш екологічні підходи, засновані на використанні рослинних екстрактів, а також хімії іонізуючого випромінювання у водних розчинах. Крім того, окислені НМ, такі як MgO, CaO, ZnO та TiO₂ НМ, були широко запропоновані завдяки їхнім чудовим електричним, каталітичним властивостям та властивостям поглинання світла. За останні роки інтерес до полімерних наноматеріалів переважно зростає через їх біосумісність, недорогий синтез і здатність реагувати на зовнішні подразники [6, 9]. Ядро та оболонка НЧ також доступні та можуть бути виготовлені з різними комбінаціями матеріалів, таких як неорганічні/неорганічні, неорганічні/органічні, органічні/неорганічні та органічні/органічні матеріали. Вибір оболонки НЧ сильно залежить від кінцевого застосування та використання. Наприклад, було запропоновано полімерні оболонки для покращення біосумісності наночастинок. Також були синтезовані наночастинки з наноструктурованою оболонкою, такі як наночастинки

мезопористого кремнезему, виготовлені з мезопористої структури з площею поверхні, яка добре функціоналізується. [7, 9]

1.3 ПОГЛИНАННЯ, ТРАНСЛОКАЦІЯ ТА БІОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК У РОСЛИН

Застосування нанотехнологічних стратегій у рослинах потребує превентивної точної оцінки взаємодії наночастинок і рослин, включаючи розуміння механізмів їх поглинання, транслокації та накопичення разом з оцінкою потенційних негативних впливів на ріст і розвиток рослин. Поглинання НЧ рослинами важко передбачити, це залежить від багатьох факторів, пов'язаних із самою наночастиною (розмір, хімічний склад, чистий заряд і функціональність поверхні), а також від шляхів застосування, взаємодії з компонентами навколишнього середовища (структура ґрунту, наявність води, мікробіота), обмеження через наявність клітинної стінки, фізіологію та багатогранну анатомію окремих видів рослин. Більшість попередніх досліджень у рослин стосуються поглинання невеликих НЧ металів і оксидів металів завдяки їх широкому використанню в промисловості та легкому виявленню та відстеженню за допомогою методів мікроскопії. [8, 13]

Методи доставки та первинні взаємодії на поверхні рослини.

В основному розроблені наноматеріали можна наносити або на коріння, або на вегетативну частину рослин, переважно на листя. На знімальній поверхні НЧ можуть пасивно поглинатися через природні отвори рослин із нано- або мікромасштабним виключеним розміром, таким як пори, гідатоци, стигми та текстура кори. Однак для кращого розуміння динаміки взаємодії НЧ-рослини необхідно враховувати додаткові анатомічні та фізіологічні аспекти рослин. [10, 13]

1.4 МОБІЛІЗАЦІЯ НАНОЧАСТИНОК У РОСЛИН

Після проникнення через зовнішні захисні шари рослини та незалежно від повітряного чи гіпогеального впливу НЧ мають два шляхи мобілізації в рослині: апопластичний та симпластичний шляхи. Апопластичний транспорт відбувається за межами плазматичної мембрани через клітинну стінку та позаклітинні простори, тоді як симпластичні рухи включають транспорт води та розчинених речовин між цитоплазмою сусідніх клітин, з'єднаних плазмодесмами та порами ситоподібних пластинок. [13, 14]

Апопластичний транспорт сприяє радіальному пересуванню НМ, що може переміщувати НЧ до центрального циліндра кореня та судинних тканин, а також сприяє їхньому руху вгору надземної частини. Цей спосіб транслокації НР є інструментальним для програм, які потребують системної доставки НР. Однак Каспарієва смужка, поздовжньо орієнтований шар з лігніноподібних структур, перешкоджає завершенню цього радіального руху в кореневій ентодермі. Щоб подолати цей природний бар'єр, вода та інша розчинена речовина переходять з апопластичного на простий шлях. Особливо це може статися в тих анатомічних областях, де смужка Каспарія ще не сформована належним чином, наприклад, у кінчиках коренів і бічних з'єднаннях коренів. [3, 17]

Симпластичний транспорт НЧ вимагає, щоб у певний момент НЧ проникли всередину клітини. Наявність жорсткої стінки рослинної клітини створює фізичний бар'єр для входу в клітину і значно ускладнює внутрішньоклітинну доставку НЧ у рослинах по відношенню до клітин тварин. Клітинна стінка є багатошаровим каркасом, що складається переважно з целюлозних або геміцелюлозних мікрофібрил і каркасних білків, що створює пористе середовище, яке діє як вузький селективний фільтр із середнім діаметром <math><10\text{ нм}</math>, за деякими винятками до 20 нм. Насправді, це критичний

момент і наразі є однією з головних перешкод на шляху розробки та впровадження інструментів біоінженерії на рослинах. Проте було продемонстровано, що різні типи наночастинок із середнім діаметром від 3 до 50 нм і вуглецевих нанотрубок легко проходять через клітинну стінку багатьох видів рослин.

Потрапляючи в цитоплазму, переміщенню НЧ між клітинами сприяють плазмодесми, вкриті мембраною цитоплазматичні містки з гнучким діаметром (20–50 нм), які забезпечують безперервність мембрани та цитоплазми між клітинами по всій рослинній тканині.

Через симпластичні та апопластичні шляхи дрібні частинки можуть досягати судин ксилеми та флоєми та переміщатися по всій рослині до різних тканин і органів. Примітно, що такі органи, як квіти, фрукти та насіння, зазвичай мають потужну здатність імпортувати рідини з флоєми (активність поглинання) і мають тенденцію накопичувати НМ. Окрім токсичності для рослин, накопичення НР у спеціалізованих органах піднімає іншу важливу проблему, пов'язану з їх безпечним використанням для споживання людьми та тваринами. [5, 6]

1.5. МЕТОДИ СИНТЕЗУ НАНОЧАСТИНОК

Методи синтезу наночастинок, зокрема металевих, які традиційно використовуються, не є сталими. Вони постійно доповнюються новими підходами задля удосконалення. Такі методи орієнтовані на отримання більш стабільних систем НЧ, бо завдяки своїй високій поверхневій енергії схильні до агрегації. Від методів та умов синтезу залежать розмір, форма і властивості НЧ.

Для одержання наночастинок з необхідними властивостями, такими як форма, розмір і функції, існують два принципи синтезу: перший top-down (зверху-вниз), другий - bottom-up (знизу-вгору).

Перший метод - top-down (зверху-вниз). Він ґрунтується на фізичному подрібненні та диспергуванні об'ємних макроформ металів до нанорозмірних частинок. Такий метод зазвичай складний, тому потребує дороговартісного обладнання, а також не завжди дає змогу контролювати розмір, форму та стійкість наночастинок металів (MtNPs) з достатньою точністю [6, 9]

Другий метод - bottom-up (знизу-вгору). Він ґрунтується на хімічних та фізико-хімічних процесах, в яких катіони металів відновлюються до нейтральних атомів, які потім самозбираються в нанорозмірні кластери – MtNPs. Одним з ключових аспектів "знизу-вгору" є переведення металевих іонів у нульвалентні атоми. Такий метод зазвичай більш простий та дешевший, ніж метод «зверху-вниз», а також дає більший контроль над розміром формою та стійкістю.

Нині використання досягнень нанотехнологій дає змогу виробляти багато поліфункціональних матеріалів, однак у них є недоліки – використання небезпечних хімічних речовин, таких як боргідрид натрію (NaBH_4) і тринатрій цитрат ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$), складні і витратні методи та відсутність масштабованості процесів синтезу. Для оцінювання характеристик NPs враховують їх розміри, розподіл за розмірами, геометрію часток, фізичні властивості (оптичні, електричні, магнітні, теплопровідність) тощо. [7]

Сучасні досягнення нанотехнологій відкривають широкі можливості для створення поліфункціональних матеріалів з унікальними властивостями. Попри це, одним із суттєвих недоліків є використання хімічних речовин, наприклад, боргідрид натрію (NaBH_4) та тринатрій цитрат ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$), які становлять загрозу для здоров'я людей та навколишнього середовища, що робить їх використання небезпечним. Також недоліками є складність та висока вартість багатьох методів синтезу НЧ, що обмежує практичне застосування нанотехнологій, тому багато методів синтезу НЧ не є масштабованими.

Традиційно використовувані методи синтезу НЧ мають суттєві недоліки, незважаючи на поширення. Вони часто є складними і дорогими, пов'язані з ризиком для довкілля та живих організмів. Це вимагає нагальної потреби для розробки альтернативних методів, які будуть водночас економічно доцільними та екологічно безпечними. Одним із перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є біонанотехнології, також відомі як "зелені" нанотехнології. Цей підхід ґрунтується на використанні біологічних систем, таких як мікроорганізми, рослини та ферменти, для синтезу НЧ. "Зелений" синтез NPs має ряд переваг порівняно з традиційними методами. Він є екологічно чистим, адже не потребує використання токсичних хімічних речовин та не генерує небезпечних відходів. Крім того, біонанотехнології дають змогу отримувати НЧ з бажаними розмірами і формою.[7, 8]

Впровадження принципів зеленої хімії (GC) у сферу нанотехнологій стало революційним кроком. GC пропонує 12 принципів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу хімічних процесів на довкілля та здоров'я людини. Ці принципи слугують основою для розробки нових методів синтезу НЧ. Об'єднання зеленої хімії та нанотехнологій дало поштовх до розвитку нової галузі - зеленої нанонауки. Ця галузь досліджує та розробляє екологічно чисті та безпечні методи синтезу НЧ, а також вивчає їх властивості та потенційні застосування. [7, 9]

Металеві наночастинки (MtNPs) - це важлива та широко досліджувана група матеріалів з широким спектром властивостей та застосувань. Використання MtNPs робить питання екологічно чистого виробництва все більш актуальним. «Зелений» синтез MtNPs пропонує альтернативу традиційним методам. Цей підхід ґрунтується на використанні біологічних систем, таких як рослини, мікроорганізми та ферменти, для синтезу MtNPs. [8]

Переваги «зеленого» синтезу MtNPs численні. Біосистеми, що використовуються як "біофабрики", містять різноманітні молекули, які одночасно відновлюють поверхню синтезованих MtNPs та стабілізують її, тим самим утворюючи шари покриття, які забезпечують біологічну сумісність та стійкість. Це значно знижує проблему агрегації, з якою часто стикаються MtNPs, синтезовані фізико-хімічними методами.[6, 13]

Механізм біосинтезу MtNPs *in vitro* ґрунтується на використанні редокс-активних компонентів вторинних метаболітів рослин. Ці компоненти ініціюють зародження НЧ шляхом відновлення іонів металів редукуючими сполуками присутніми у тканинних екстрактах фітохімічними речовинами. Далі ядра наночастинок збільшуються в розмірі за рахунок адсорбції атомів металу після відновлення, завдяки чому утворюються MtNPs. Важливу роль у стабілізації MtNPs відіграють також компоненти живих клітин, такі як вуглеводи, жири, білки, ферменти, флавоноїди та алкалоїди. Ці молекули здатні асоціювати іони металів, контролюючи розмір та форму наночастинок. "Зелений" синтез MtNPs є перспективним напрямком досліджень та розробок, який може суттєво вплинути на виробництво та застосування цих важливих матеріалів.

Біосинтез НЧ може відбуватися як позаклітинно, так і внутрішньоклітинно. Синтез НЧ металів (MtNPs) проходить через ряд послідовних реакцій, що призводить до встановлення рівноваги в полідисперсній системі, при цьому природа редукуючої речовини не є принциповою. Виділяють наступні основні фази "зеленого" синтезу MtNPs: 1.Активация: відбувається відновлення іонів металів (Me^+) до нульвалентних атомів (Me^0). 2.Нуклеация: Нейтральні атоми металу, що утворилися на стадії активації, об'єднуються, утворюючи протонаночастинки. 3.Ріст: Дрібні частинки, що утворилися на стадії нуклеації, збільшуються в розмірі за

рахунок приєднання нових атомів металу. Цей процес може відбуватися шляхом агрегації або дифузійного росту. 4.Агломерація: Більші частинки, що утворилися на стадії росту, об'єднуються в агломерати. [7, 9]

1.6. ФАКТОРИ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА «ЗЕЛЕНИЙ» СИНТЕЗ НЧ

Зелений синтез наночастинок є інноваційним і екологічно сталим підходом до виробництва наноматеріалів. Відмінною особливістю зеленого синтезу є використання біологічних систем, таких як рослини, мікроорганізми, гриби, або їх екстракти, для виробництва наночастинок. Цей метод пропонує альтернативу традиційним хімічним і фізичним методам синтезу, зосереджуючись на екологічних перевагах та біологічній сумісності. Основні аспекти та переваги зеленого синтезу наночастинок включають: [9,12]

Екологічна безпека. *Відсутність токсичних реагентів:* Замість використання шкідливих хімікатів, зелений синтез використовує природні речовини, які є нетоксичними і біодеградованими. *Зниження відходів:* Процес мінімізує виробництво небажаних побічних продуктів, сприяючи чистішому виробництву.

Економічність: *Зниження вартості:* Використання доступних біоресурсів знижує витрати на сировину і енергію. *Спрощеність процесів:* Біосинтез може відбуватися при кімнатній температурі і атмосферному тиску, що зменшує потребу в складному обладнанні.

Біологічна сумісність: *Висока біосумісність:* Наночастинки, синтезовані з використанням біологічних речовин, часто виявляються більш сумісними з біологічними системами. *Функціоналізація:* Біологічні молекули можуть сприяти функціоналізації поверхні наночастинок, поліпшуючи їх цільові властивості та ефективність.

Зелений синтез MtNPs має ряд переваг, таких як доступність дешевої сировини, низька токсичність та простота. Рослинна сировина, яка використовується в цьому методі, є відновлюваною, що робить його економічно вигідним та екологічно безпечним. [14]

На процес формування НЧ впливають численні фактори, такі як походження рослинного екстракту, рН реакційної суміші (впливає на активність, розчинність та стабільність), температура інкубації (впливає на швидкість реакції), тривалість реакції (впливає на розмір та форму НЧ), концентрація іонів металу (впливає на швидкість нуклеації та ріст), електрохімічний потенціал (впливає на ймовірність відновлення до нульвалентного стану). Зв'язок між цими факторами допомагає отримувати НЧ з бажаними характеристиками, такими як розмір, форма, хімічний склад та поверіневі властивості. [6]

1.7. МЕХАНІЗМИ ДІЇ НАНОМАТЕРІАЛІВ У РОСЛИНАХ

Наноматеріали можуть впливати на фізіологію та метаболізм рослин, від поглинання та транспортування до модифікації росту і розвитку. Розуміння механізмів, за допомогою яких наночастинки взаємодіють з рослинними системами, є ключовим для оптимізації їх використання та мінімізації потенційних ризиків. Основні аспекти механізмів дії наноматеріалів у рослинах:

1. Поглинання та транспортування

- **Поглинання:** Наночастинки можуть проникати в рослини через кореневу систему або листя. Розмір, форма та хімічна природа наночастинок визначають їхню здатність до проникнення в тканини.

- **Транспортування:** Після поглинання наночастинки можуть переміщатися в рослині через ксилему та флоему. Транспортування залежить від розміру частинок та їх взаємодії з рослинними компонентами.

2. Вплив на фізіологічні процеси

- **Фотосинтез:** Деякі наноматеріали можуть підвищувати фотосинтетичну активність через покращення світлопоглинання або захист фотосинтетичних структур від оксидативного стресу. [16, 19]

- **Водний обмін:** Наноматеріали можуть впливати на водний обмін, змінюючи проникність мембран і впливаючи на стоматальну кондуктивність.

- **Поживне забезпечення:** Частинки можуть впливати на доступність та засвоєння поживних речовин, а іноді виконувати роль каталізаторів у біохімічних реакціях.

3. Вплив на ріст та розвиток

- **Стимуляція росту:** Деякі наноматеріали можуть стимулювати ріст рослин, поліпшуючи регуляцію гормонів або активізуючи певні генетичні шляхи.

- **Захисні механізми:** Наночастинки можуть індукувати системну резистентність рослин до патогенів та шкідників.

4. Молекулярні взаємодії

- **Генна експресія:** Наноматеріали можуть змінювати експресію генів, які регулюють різні фізіологічні та оборонні процеси.

- **Сигнальні шляхи:** Металеві наночастинки та інші наноматеріали можуть взаємодіяти з клітинними сигнальними молекулами, ініціюючи або пригнічуючи певні сигнальні шляхи.

5. Екологічні взаємодії

- Взаємодія з мікробіомом: Наночастинки можуть впливати на мікробіом рослин, змінюючи склад або функціонування мікробних спільнот у ризосфері.
- Вплив на біорізноманіття: Потенційний довготривалий вплив на біорізноманіття, включаючи взаємодії з іншими рослинами та тваринами у екосистемі. [15, 21]

Розуміння цих механізмів дозволяє краще контролювати та оптимізувати використання наноматеріалів у рослинництві, мінімізуючи ризики та підвищуючи ефективність сільськогосподарських технологій. [4, 13]

РОЗДІЛ 2. ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК У КОРЕНЯХ РОСЛИН

2.1. МЕХАНІЗМИ ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК РОСЛИНАМИ

У ґрунті наночастинки проходять низку біо- та геотрансформацій, які визначають біодоступність і токсичність наночастинок. НЧ переміщуються в надземні частини після взаємодії з корінням рослин і накопичуються в клітинних або субклітинних органелах. Адсорбцію НЧ із ґрунту корінням рослин можна описати як перший крок у біоаккумуляції. [20]

Дослідження показують, що накопичення відбувається шляхом адсорбції в коренях, що супроводжується розповсюдженням через тканини рослин шляхом певних модифікацій, таких як розчинення кристалічної фази, біотрансформація та біонакопичення.[16] Розмір НЧ безпосередньо пов'язаний з поглинанням НЧ, оскільки це важливий параметр, який забезпечує його проникнення через пори клітинної стінки або продири рослин. Крім того, розмір визначає їх подальші транспортні процеси в клітині (тобто плазмодесми) або органели рослинних клітин, впливаючи на їх накопичення, токсичність і кінетику транспорту в рослинні клітини. Площа поверхні, агломерація та реактивність на поверхні клітини або всередині рослинних структур корелюють із формою наночастинок.[17, 18] Для визначення конкретної зони взаємодії між структурами рослинної клітини та НЧ розраховують поверхню НЧ за її площею та морфологією, які є основними параметрами. Через очевидний негативний заряд клітинної стінки прикріплення НЧ до поверхні рослинної клітини безпосередньо залежить від заряду НЧ. Після заряду та розміру частинок, гідрофобність, присутня на поверхні рослини, відіграє вирішальну роль у процесі поглинання та транслокації. Крім того, базова структура наноматеріалів доповнює оцінку їхнього впливу на поглинання, транслокацію та агрегацію НЧ у рослині. [24, 25]

Для розуміння та з'ясування процесів поглинання, транслокації та накопичення необхідне детальне дослідження природи НЧ. Щоб визначити їх рух і локалізацію в різних структурах і клітинних органелах всередині рослини, важливі моніторинг і відстеження наночастинок. [27, 31]

Малі наночастинки (діапазон діаметрів від 3 до 5 нм) проникають у коріння рослин разом із осмотичним тиском, капілярними силами або безпосередньо через епідермальні клітини кореня. Клітини епідермісу клітинної стінки кореня напівпроникні, містять дрібні пори та обмежують великі НЧ. Деякі НЧ індукували нові пори в епідермальній клітинній стінці, що полегшувало вхід. Після перетину клітинних стінок наночастинки апопластично транспортуються через позаклітинні простори, доки не досягнуть центрального судинного циліндра, дозволяючи ксилемі рухатися однонаправлено вгору. Проте НЧ повинні симпластично перетинати бар'єр смужки Каспарія, щоб увійти в центральний судинний циліндр. Це відбувається шляхом зв'язування з білками-носіями ентодермальної клітинної мембрани через ендцитоз, утворення пор і транспорт. НЧ переміщуються від однієї клітини до іншої через плазмодесми, інтерналізовані в цитоплазмі. НЧ, які не в змозі інтерналізувати, агрегуються на Каспарієвій смузі, тоді як НЧ, які досягли ксилеми, переносяться до пагонів і через флоему назад до коренів. НЧ, які поглинають рослини, можна знайти в клітинній стінці епідермісу, цитоплазмі кортикальних клітин і ядрах. НЧ, які не поглинаються кореневою поверхнею ґрунтового агрегату, можуть змінювати поглинання поживних речовин. Пряме поглинання НЧ у насінні може відбуватися шляхом надходження в оболонку через паренхіматичні міжклітинні простори, що супроводжується дифузією в сім'ядолі. [28, 35]

2.2. ШЛЯХИ ПОГЛИНАННЯ КОРЕНЕМ

Контакт між наночастинками та корінням рослин спочатку відбувається через адсорбцію на поверхні кореня. Оскільки кореневі волоски можуть виділяти хімічні речовини, такі як слиз або органічні кислоти, поверхня кореня має негативні заряди, тому наночастинки з позитивним зарядом частіше накопичуються в корені та легко поглинаються на поверхні кореня. Утворення бічних коренів може створити новий адсорбційний інтерфейс для наночастинок, забезпечуючи можливість для наночастинок увійти в кореневу колонку. [38]

Епідерміс кореня рослини за складом і функціями подібний до поверхні листя рослини. Однак епідерміс на поверхні кінчика кореня рослини та поверхні кореневого волоска первинного та вторинного коренів розвинений не повністю. Коли наночастинки піддаються впливу цієї області, вони безпосередньо контактують з кореневим епідермісом і перетинають його. Клітини епідермісу клітинної стінки кореня є напівпроникними. Клітинна стінка кореня містить дрібні пори, які можуть перешкоджати проходженню великих частинок. Коли кореню не вистачає екзодерми, наночастинки можуть проникати в центральний стовпчик або ксилему кореня. [40]

Дослідження показують, що деякі наночастинки можуть руйнувати плазматичну мембрану та індукувати утворення нових пор на клітинній стінці епідермісу, щоб полегшити проникнення наночастинок великого діаметру. Коли наночастинки потрапляють у рослинну тканину, вони можуть поглинатися рослинними клітинами кількома шляхами, такими як іонний шлях, ендоцитоз, зв'язування з білками клітинної мембрани або фізичне пошкодження.

Деякі дослідження показали, що наночастинки поглиналися корінням рослин і проникали в клітини головним чином через гідрофільний шлях. Однак через малий розмір пор надходження наночастинок у клітини цим шляхом дуже обмежене. [39]

Іншим важливим шляхом поглинання НЧ у клітинах рослин є ендоцитоз. Інвагінація плазматичної мембрани рослинної клітини приносить НЧ у клітини. Дослідження показали, що рослинні протопласти можуть інтерналізувати частинки розміром менше 1 мкм через ендоцитоз, таким чином, наночастинки, поглинені ендоцитозом, не мають селективності розміру частинок. Наночастинки на основі вуглецю та вуглецеві нанотрубки поглинаються клітинами кореня *catharanthus roseus* шляхом ендоцитозу [34]. Крім того, наночастинки можуть поглинатися рослинами шляхом поєднання з транспортними білками зовнішнього епідермісу. [35]

2.3. КЛЮЧОВІ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЧЕРЕЗ КОРІННЯ

Різні фактори мають значний вплив на поглинання наночастинок корінням рослин:

- розмір
- хімічний склад
- поверхневий заряд наночастинок. [41]

2.3.1. ВПЛИВ РОЗМІРУ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

Розмір наночастинок вважається найважливішим фактором, що впливає на поглинання коренем наночастинок. Дослідження показують, що наночастинки з розміром менше 10 нм можуть поглинатися корінням рослин,

наприклад наночастинки золота (3,5 нм) і наночастинки CeO_2 (8 ± 1 нм), відповідно, у коріння *Vicia faba* L. і кукурудзи. [42]

У той же час інші дослідження підтвердили, що поглинання наночастинок корінням пшениці пов'язане з розміром НЧ. Наприклад, наночастинки TiO_2 з розміром частинок 36–140 нм можуть поглинатися корінням пшениці. Зі збільшенням розміру частинок загальна кількість поглинання зменшується. У той час як TiO_2 НЧ з розміром частинок більше 140 нм не можуть бути поглинені. Через обмеження розміру зазвичай вважається, що якщо розмір частинок перевищує 100 нм, наночастинки на основі металу важко поглинати рослинами через коріння. [43]

Наночастинки на основі кремнію та природного полімеру з розміром частинок понад 100 нм можуть поглинатися. Наприклад, Si NPs з розміром частинок 200 нм були поглинені коренем *арабідопсису* після 6 тижнів лікування. Було доведено, що наночастинки зеїну із середнім розміром частинок 135 ± 3 нм поглинаються корінням цукрової тростини за допомогою конфокальної мікроскопії та трансмісійної електронної мікроскопії. [42, 43]

2.3.2. ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗАРЯДУ

Поглинання НЧ рослиною також залежить від його поверхневого заряду. Негативний заряд клітинних стінок коренів рослин визначає властивості поверхневого заряду наночастинок, які можуть поглинатися корінням рослин. Вплив електричного заряду на поглинання наночастинок у коренях рослин дещо відрізняється від ефекту в листі. Позитивно заряджені наночастинки мають тенденцію накопичуватися на поверхні кореня через електростатичне притягання між негативно зарядженою клітинною стінкою та позитивно зарядженою наночастинкою, але не можуть потрапити в тканину кореня. [44]

2.4. ТРАНСПОРТ НАНОЧАСТИНОК У КОРЕНІ

Розуміння транспортування наночастинок у рослини має вирішальне значення для використання їхнього потенціалу в сільському господарстві та біотехнологіях. Транспорт наночастинок із зовнішнього середовища до внутрішніх тканин рослин включає складні процеси, на які впливають як властивості наночастинок, так і характеристики структур рослин. Наночастинки можуть розроблюватись для транспортування певних матеріалів, сполук або генетичної інформації всередині рослин, як носії для доставки цих корисних навантажень до цільових місць. [17, 18]

Наночастинки можна використовувати для доставки добрив або поживних речовин, доставки генетичного матеріалу та доставки пестицидів або гербіцидів, також для транспортування у клітини рослин основних поживних речовин, у тому числі мікроелементів, наприклад, залізо, цинк та інші мікроелементи. [19]

Томбулоглу та інші дослідники успішно синтезували композити наночастинок мікроелементів і застосували їх до *Hordeum vulgare L.* У своїх роботах продемонстрували ефективне включення цих мікроелементів у рослинну тканину. Транспортування даних НЧ істотно збільшувало кількість елементів як у кореневих, так і в листкових тканинах. Зокрема, вміст Fe, Zn і Cu був підвищений приблизно в 5, 3 і 18 разів вище, ніж контроль, відповідно. Такий підхід відомий як доставка поживних речовин за допомогою наночастинок і спрямований на покращення поглинання та використання поживних речовин рослинами. Наночастинки завдяки своєму малому розміру, можуть поглинатися корінням або листям рослин. Наночастинки можуть проникати в рослинні клітини за допомогою різних механізмів, таких як дифузія, ендоцитоз або пряме поглинання через іонні канали та транспортери [7, 26]. Потрапляючи в клітини рослин, наночастинки вивільняють

інкапсульовані поживні речовини. Таке вивільнення гарантує, що поживні речовини доступні в рослині зі швидкістю, яка відповідає потребам рослини. Покращуючи поглинання та використання поживних речовин, доставка поживних речовин за допомогою наночастинок може зменшити кількість необхідних традиційних добрив, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище, пов'язаний із надлишковим стоком поживних речовин та вимиванням. [20]

Наночастинки також можуть служити транспортними засобами для доставки генетичного матеріалу, такого як ДНК, РНК або мала інтерферуюча РНК (міРНК), у клітини рослин. Таку технологію називають «доставкою генів за допомогою наночастинок». Вона застосовується у біотехнології рослин і сільському господарстві. Наночастинки створені для інкапсуляції, зв'язування або комплексу з генетичним матеріалом. Ці наночастинки призначені для захисту генетичного матеріалу від деградації та полегшення його доставки в клітини рослин [19, 20]. Наночастинки також можуть впливати на швидкість проростання насіння та ранній ріст рослин. Вони можуть підвищувати силу розсади та сприяти більш здоровому розвитку рослин. Деякі наночастинки були вивчені на предмет потенціалу для підвищення стійкості рослин до стресу, наприклад стійкості до посухи, засолення або токсичності важких металів. Ці наночастинки застосовуються як пом'якшувачі стресу та покращують загальний стан здоров'я рослин. [22, 23]

Наявність наночастинок у ґрунті також може впливати на мікробні спільноти та здоров'я ґрунту. Вплив залежить від типу використовуваних наночастинок та їх взаємодії з ґрунтовими мікроорганізмами. Деякі наночастинки можуть виявляти фітотоксичну дію. Це може призвести до затримки росту, зниження фотосинтезу або іншого негативного впливу на рослини. Доля наночастинок у навколишньому середовищі, включно з їх

стійкістю та можливістю вимивання у джерела води, є важливим фактором для сталого ведення сільського господарства. Збалансування потенційних переваг із міркуваннями щодо навколишнього середовища та здоров'я людини має вирішальне значення для стійкої інтеграції нанотехнологій у сільське господарство. [15, 24]

2.5.1. ТРАНСПОРТНИЙ ШЛЯХ

Порівняно із застосуванням різних наночастинок у листі рослин, існує більше досліджень щодо впливу наночастинок на коріння рослин. Коли наночастинок впливають на корінь рослини, вони поглинаються волосковими клітинами кореня рослини. Вони вибірково проходять через клітинну стінку, потрапляють в ендотеліальний шар з епідермісу через симпласт або екзопласт, потім транспортуються в надземну частину через судини ксилеми. Зсередини назовні корінь рослини послідовно складається з перициклу та судинної колонки, кори та епідермісу. Судинний стовп включає перицикл і судинну тканину, яка розташована в центрі кореня рослини. Кора складається з ендотелію та екзодерми, в яких ендотелій з'єднаний з перициклом [60]

Транспорт наночастинок в корені також здійснюється двома шляхами, а саме екзопластом і евтектикою. На шляху екзопласту, коли наночастинок спочатку транспортуються через епідерміс до ендотелію, потім вони блокуються смужкою Каспарія. Деякі наночастинок будуть осідати в ендотелії, а інша частина наночастинок буде транспортуватися радіально вздовж смуги Каспарія, але не перетинатиме смужку Каспарія. Проте в місці бічного з'єднання коренів Каспарова смужка розвинена не повністю. Наночастинок можуть досягати судинної системи та транспортуватися через цю область. У симпластному шляху НЧ потрапляють у цитоплазму через плазматичну мембрану та транспортуються між клітинами через плазмодесми. [53, 60]

2.4.2. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК, ЩО ПОГЛИНАЮТЬСЯ ЧЕРЕЗ КОРИННЯ

2.4.2.1. ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

Попередні дослідження показали, що наночастинки малого розміру, такі як наночастинки TiO_2 , наночастинки Cu , наночастинки CuO тощо, можуть поглинатися корінням огірка та кукурудзи та переноситися в надземну частину рослин. У той же час, наночастинки також можуть бути виявлені в листі, плодах та інших частинах.

Чен та інші дослідники обробляли проростки рису наночастинками ZnO 100 мг/л (40 нм) протягом 7 днів, збирали кінчики коренів рису та спостерігали за поглинанням і розподілом наночастинок ZnO в корені проростків рису через ультратонкий зріз і TEM. Було виявлено, що наночастинки оксиду цинку були знайдені в клітинній стінці зони подовження кореня рису та в цитоплазмі клітин кори головного мозку, що вказує на те, що наночастинки ZnO можуть проникати через клітинну стінку та агрегувати в цитоплазмі клітин кори. [60]

Тонг та інші підготували наночастинки шляхом покриття метолахлору монометиловим ефіром поліетиленгліколю-полімолочної кислоти-гліколевої кислоти (mPEG-PLGA) з розміром приблизно 100 нм і вивчили його транспортування та розподіл у рисі за допомогою флуоресцентного мічення $Su5$. Результати експерименту показали, що в коренях рису був очевидний сигнал флуоресценції. Мічені флуоресценцією mPEG-PLGA НЧ можуть проникати в рослину рису позаклітинним шляхом. В іншому дослідженні на корінь пшениці діяли НЧ ФС розміром 200 нм. Через дві години під флуоресцентним мікроскопом сигнали флуоресценції були виявлені на зовнішній стороні клітинної стінки епідермісу кореня. Оскільки Каспарієва смужка на кореневій меристемі пшениці не була зрілою, НЧ потрапили в судинну систему через апікальну меристему кореня. Після двох годин обробки

їх можна було знайти в судинній системі ксилеми, що довело, що наночастинки транспортувалися позаклітинним шляхом. [60]

2.4.2.2. ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗАРЯДУ

Коли наночастинки потрапляють у коріння рослин, вплив поверхневого заряду на транспортування наночастинок такий самий, як і транспортування наночастинок через листя. У коренях рослин коріння виділяє негативно заряджений слиз і виділення, які стають першим бар'єром для наночастинок, які проникають у коріння рослин, і перешкоджають поглинанню позитивно заряджених наночастинок на зовнішній стороні клітинної стінки. Клітинна стінка рослини має негативний заряд, тому позитивно заряджені наночастинки, швидше за все, накопичуються на клітинній стінці після поглинання. У той час як негативно заряджені наночастинки будуть транспортуватися в корені, ефективність транспортування електрично нейтральних наночастинок в корені більш очевидна. [62]

Sun та інші використовували наночастинки CeO_2 з різними зарядами для обробки кореня пшениці та виявили, що серед наночастинок, адсорбованих на поверхні кореня, НЧ CeO_2 з позитивним зарядом було значно більше, ніж наночастинки з негативним зарядом, тоді як НЧ CeO_2 з негативним зарядом можна було перенести до різних частин. Авеллан та ін. отримали подібні результати при вивченні поглинання та транспорту наночастинок золота з різними зарядами в корені *Arabidopsis*. [63]

РОЗДІЛ 3. ТРАНСПОРТ ТА РОЗПОДІЛ НАНОЧАСТИНОК У ЛИСТКАХ

3.1. ТРАНСПОРТНИЙ ШЛЯХ НАНОЧАСТИНОК У ЛИСТІ

Коли наночастинки потрапляють у клітини мезофілу через кутикулу та прорихи, вони можуть транспортуватися на великі відстані в рослині позаклітинним шляхом або шляхом пластид. Позаклітинний шлях в основному стосується транспорту через позаклітинний простір. Коли наночастинки проходять через клітинну стінку, вони можуть транспортуватися через позаклітинний простір (такий як клітинна стінка, поздовжній канал між клітинними стінками, проміжна пластинка та ксилема) відповідно до їх розміру частинок і заряду поверхні. Шлях протопластів в основному транспортується через міжклітинний канал, плазмодесми, діаметром приблизно 2-20 нм. Коли наночастинки проходять через плазмодесми, вони накопичуються в цитоплазмі та транспортуються до ендотеліального шару рослини та смужки Каспарія.

Дослідження показують, що НЧ з розміром частинок менше 50 нм зазвичай транспортуються в рослинах через пластидний шлях, тоді як більшість наночастинок з розміром частинок від 50 до 200 нм транспортуються через апопластний шлях. Подальший транспорт наночастинок від листя до кореня здійснюється за допомогою транспортних шляхів судинної системи та флоєми. Оскільки діаметр ситової трубки флоєми великий, частинки розміром приблизно 0,405 мкм також можуть легко транспортуватися через флоему. [45]

3.2. РОЗПОДІЛ НАНОЧАСТИНОК, ПОГЛИНЕНИХ ЛИСТЯМ

Велика кількість досліджень показала, що наночастинки, застосовані через листя, можуть транспортуватися до різних частин рослин, таких як стебла, коріння, квіти, плоди і навіть до ґрунту ризосфери. Коли наночастинки CuO розпилювали на листя кукурудзи, на епідермісі листя спостерігалися

відкладення наночастинок. Після входу в клітини НЧ CuO переносилися між клітинами через плазмодесми. [45, 46]

В іншому дослідженні, після 48 годин розпилення наночастинок золота на листя кавуна, поглинання та накопичення наночастинок золота в клітинах листя кавуна було підтверджено ICP-MS (Мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою - це різновид мас-спектрометрії, що відрізняється високою чутливістю і здатністю визначати ряд металів і кількох неметалів у концентраціях до 10^{-10} %, тобто одну частинку з 10^{12}). Золото також було виявлено в стеблах і коренях кавунів, що вказує на те, що наночастинокки транспортуються від листя до коренів через флоему.

Хонг та інші дослідники також повідомили, що після дії наночастинок CeO_2 на листя огірка протягом 72 год. НЧ CeO_2 були знайдені в скибочках кореня огірка за допомогою трансмісійної електронної мікроскопії, надаючи прямі докази транспорту НЧ CeO_2 від листя до стебел і коренів огірка. [46]

Буено та інші дослідники підготували пористі порожнисті наночастинокки кремнезему, завантажені азоліноксалатом і розпилили їх на помідори. Вміст Si в різних частинах рослини виявляли та кількісно визначали на другу та четверту добу після дії. Результати показали, що вміст кремнію в різних тканинах помідорів був таким: стебло > корінь > молодий лист > зрілий лист, що вказувало на різну ефективність транспортування PHSN до різних тканин помідора. Порівняно з транспортуванням між різними листками, транспортування наночастинок від стебла до кореня було легшим. [47]

3.3. КЛЮЧОВІ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК, ПОГЛИНЕНИХ ЛИСТЯМ

3.3.1. ВПЛИВ РОЗМІРУ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

Дослідження показують, що наночастинокки на основі металу, які можна транспортувати в інші частини рослини, мали менший розмір у порівнянні з

наночастинками з неметалевих матеріалів. Це пояснюється тим, що наночастинки на основі металу більшого розміру не можуть поглинатися. Наночастинки на основі металу, які можна знайти у флоемі або інших частинах листа рослин, мали розміри 30–50 нм. У той час як більші наночастинки, виготовлені з неметалевих матеріалів, часто переміщувалися в листі рослин.

Чжао та інші обробили листя огірка міченими FITC (Fluorescein isothiocyanate - Ізотіоціанат флуоресцеїну) мезопористими наночастинками кремнезему (MSN) (розмір частинок 200–300 нм) і виявили MSN, мічені FITC, у черешках, стеблах і необроблених листках і квітах лише через 4 години, доводячи, що MSN можуть бути перенесені з листа на інші тканини огірка. У дослідженні Буено середній розмір частинок наночастинок становив 253 ± 73 нм. Було виявлено, що, незважаючи на те, що пористі порожнисті наночастинки кремнезему (PHSNs) були набагато більші, ніж відомий ліміт виключення розміру в рослинних тканинах, PHSNs можуть не тільки поглинатися листям, але також транспортуватися до стебел, коренів і молодого листа. [48]

Абдель-Азіз та інші повідомили про існування НПК хітозану (10, 25, 100 нм) у тканині флоєми пшениці за допомогою трансмісійного електронного мікроскопа, що означає, що НЧ транспортуються від листа до стебла, а потім до коренів через флоємний шлях. [48, 49]

3.3.2. ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗАРЯДУ

Поверхневий заряд наночастинок впливатиме на їх транспорт у позаклітинному шляху. Пектин на клітинній стінці має карбоксильні групи, які роблять клітинну стінку негативно зарядженою, таким чином, позитивно заряджені наночастинки будуть притягуватися негативним зарядом на клітинній стінці, що полегшує транспортування позитивно заряджених наночастинок позаклітинним шляхом.

Sun та інші дослідники обприскували листя проростків кукурудзи наночастинками полістиролу, модифікованими карбоксильними групами та аміногрупами, і виявив, що два типи PS NP з різними зарядами можуть ефективно накопичуватися на листках кукурудзи та частинках, зібраних у продихах. Серед них накопичення аміно-модифікованих позитивно заряджених наночастинок PS-NH₂ у листі значно більше, ніж карбоксильно-модифікованих негативно заряджених наночастинок PS-COOH. Коли наночастинки потрапляють у листя, негативно заряджені НЧ PS-COOH можуть більш ефективно переноситися в судинну систему рослин і передаватися до коренів через судинні пучки. [50]

3.3.3. ІНШІ ФАКТОРИ ВПЛИВУ

Форма наночастинок: Сферичні НЧ транспортуються краще, ніж паличкоподібні або циліндричні.

Товщина кутикули: Рослини з товстою кутикулою листя менш проникні для НЧ.

Фізіологічний стан рослини: Рослини в стані стресу можуть мати більш високий транспорт НЧ.

Умови навколишнього середовища: рН, температура, вологість повітря.

РОЗДІЛ 4. ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЛИСТЯМ РОСЛИН

4.1. ШЛЯХИ ПОЗАКОРЕНЕВОГО ПОГЛИНАННЯ

Під час застосування в сільському господарстві наночастинки зазвичай розпилюються на поверхню листя, а потім поглинаються рослинами через кутикулу або продихи на поверхні листя. Воскова кутикула епідермісу листя в основному складається з воску, кутину та пектину. Вона захищає листя рослин від втрати води під час росту рослин і виступає в якості основного природного бар'єру для запобігання проникненню наночастинок у листя. Однак на поверхні воскоподібного рогового шару є два різні канали; один канал гідрофільний, інший - ліпофільний. Діаметри як гідрофільних, так і ліпофільних каналів коливаються від 0,6 нм до 4,8 нм. Гідрофільні канали дозволяють гідрофільним наночастинкам менше 4,8 нм в діаметрі дифундувати. Ліпофільні канали на поверхні кутикули дозволяють ліпофільним наночастинкам поглинатися листям шляхом дифузії та інфільтрації. [29, 51]

Нещодавно Ни з іншими дослідниками довели, що вуглецеві точки розміром менше 2 нм можуть проникати в листя бавовни через кутикулярний шлях за допомогою конфокальної флуоресцентної мікроскопії з високою просторовою та тимчасовою роздільною здатністю [30]. Однак через обмежений розмір порових каналів у кутикулі поглинання наночастинок рослинами через епідерміс обмежене. Деякі звіти про дослідження показали, що наночастинки можуть накопичуватися в епідермісі листя та судинній тканині після нанесення на поверхню листя. Дослідники припустили, що наночастинки також можуть поглинатися іншим шляхом, а саме продиховим шляхом. [52]

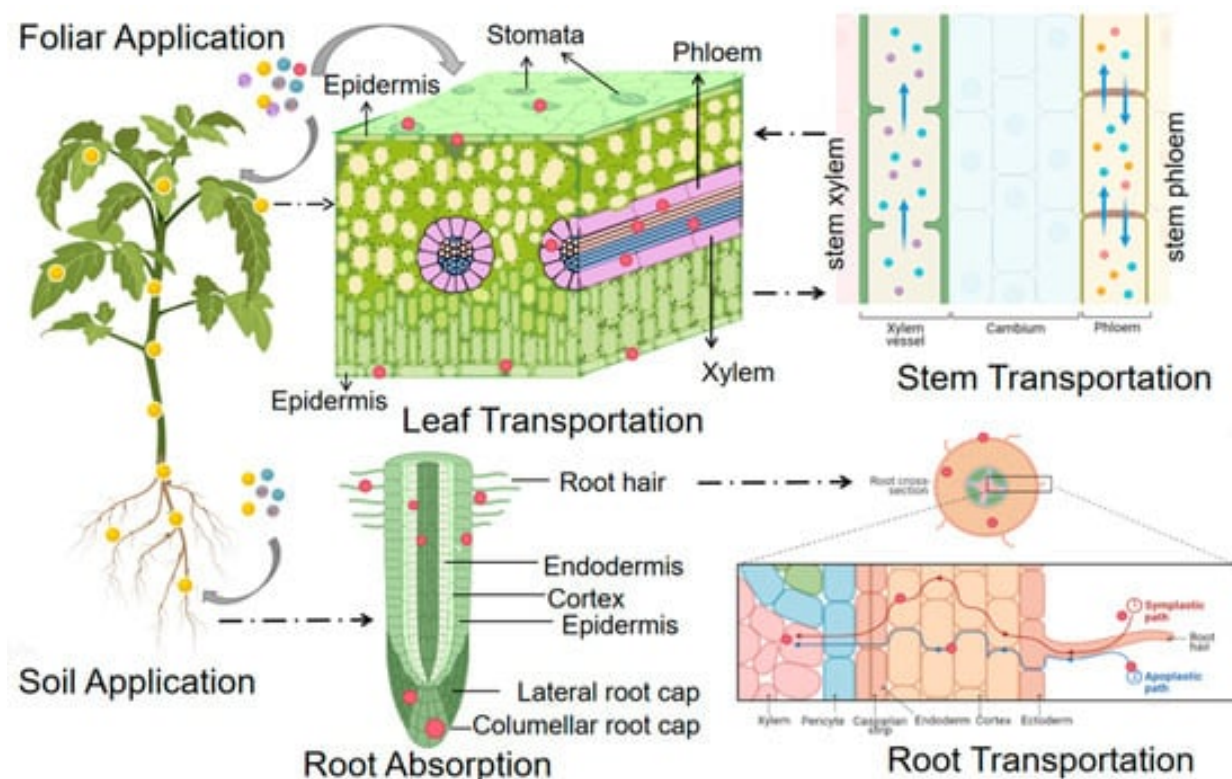


Рис 1. Схематична діаграма поглинання та транслокації НЧ у рослинах через позакореневе внесення або обробку під впливом коренів.

(Wang X, Xie H, Wang P, Yin H. *Nanoparticles in Plants: Uptake, Transport and Physiological Activity in Leaf and Root // Materials // 2023*)

4.2. КЛЮЧОВІ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОГЛИНАННЯ НАНОЧАСТИНОК ЧЕРЕЗ ЛИСТЯ

Сучасні дослідження показали, що поглинання наночастинок рослиною залежить від природи наночастинок, виду рослин і навколишнього середовища. Властивості наночастинок, такі як розмір частинок, хімічний склад, поверхневий заряд і модифікація поверхні, можуть впливати на їх поглинальну поведінку в листках рослин. Завдяки межі виключення розміру НЧ на шляху поглинання леза, розмір частинок наночастинок став одним із найважливіших факторів у вивченні поглинання НЧ у лезі. [32]

4.2.1. ВПЛИВ РОЗМІРУ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

Вплив розміру на поглинання наночастинок на основі металу широко вивчався. На основі досліджень було виявлено, що наночастинок на основі

металів діаметром менше 50 нм можуть проникати в листя рослин через провідні шляхи. Зі збільшенням розміру частинок знижувалася поглинальна здатність листя до наночастинок. Багато досліджень виявили поглинання наночастинок листям. [53, 54]

Наприклад, Zhu з колегами наносили мічені флуоресцеїн ізотіоціанатом (FITC) наночастинки ZnO (30 нм) на листя пшениці. За допомогою конфокальної мікроскопії вони виявили, що наночастинки ZnO в основному проходять через епідерміс листя пшениці через продихи, а потім накопичуються в хлоропластах[33]. Вони також досліджували вплив відкриття та закриття продихів на поглинання наночастинок ZnO. Доведено, що зі зменшенням діаметра продихів концентрація цинку в хлоропласті та цитоплазмі клітин листків пшениці зменшувалася на 33,2% та 8,3 % відповідно зі зменшенням діаметра продихів. [54]

Авелян та інші використовували наночастинки золота різного діаметру (3, 10, 50 нм), модифіковані покриттями для дії на листя пшениці. Вони виявили, що покриті наночастинки золота будь-якого розміру можуть поглинатися листям пшениці. У той же час їхні результати показали, що поглинання наночастинок золота відбувалося через руйнування та/або дифузію через шар кутикули та продихи.

В іншому дослідженні дослідники підтвердили, що наночастинки MgO розміром 27–35 нм поглинаються листям кавуна (*Citrullus lanatus*) за допомогою трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ). Окрім наночастинок на основі металу, дослідники також виявили, що наночастинки, виготовлені з кремнезему, полімеру та природних матеріалів, можуть поглинатися листям рослин. Результати їх досліджень показали, що тип наночастинок мав великий вплив на критичний розмір, який могли поглинути листя рослин. Використовуючи ТЕМ, дослідники підтвердили, що SiO₂ з розміром 54 нм

може потрапити в листя модельної рослини *Arabidopsis thaliana* через продиховий шлях. [55]

Чжао та інші обробили листя огірка мезопористими наночастинками кремнезему (MSN), міченими FITC (розмір частинок 200–300 нм), і виявили, що мічені FITC MSN можуть поглинатися листям. Дослідники виявили, що нанопластик полістиролу розміром 93,6 нм може подолати бар'єр на листі салату та потрапити у флоему рослин за допомогою ТЕМ. Нещодавно дослідники виявили, що наночастинки кремнію на основі хітозану із середнім розміром 166 нм поглиналися листям рису (Zhenghan 10) і розподілялися в клітинах листя. [56]

4.2.2. ВПЛИВ ФОРМИ ТА ЗАРЯДУ ПОВЕРХНІ

Окрім розміру наночастинок, потрапляння наночастинок у тканину мезофілу рослин також залежить від форми та заряду. Наночастинки з різною формою мають різні міжфазні властивості, які призводять до змін площі поверхні наночастинок і контактного кута з поверхнею рослини, що в кінцевому підсумку впливає на поглинання НЧ. [56]

Чжан та інші порівняли паличкоподібні наночастинки золота зі сферичними наночастинками та виявили, що паличкоподібні наночастинки легше поглинаються та засвоюються листям *арабідопсису* за умови однакового розміру частинок. Як позитивно, так і негативно заряджені наночастинки можуть поглинатися листям рослин. Попередні дослідження оцінювали вплив поверхневого заряду на поглинання поверхневого заряду графеновими квантовими точками (GQD) на листі кукурудзи і на адсорбцію наночастинок ZnO на листі пшениці. Результати показали, що як позитивно заряджені NH₂-GQD (13 нм), так і негативно заряджені OH-GQD (14 нм) можуть поглинатися листям кукурудзи через продихи. Мічені FITC НЧ FP-ZnO (40 нм) з позитивним зарядом і НЧ FN-ZnO (40 нм) з негативним зарядом було

підтверджено конфокальною мікроскопією, щоб зібратися в продихах на поверхні листя пшениці. У той же час було показано, що адсорбція позитивно заряджених наночастинок у листках була сильнішою, ніж негативно заряджених наночастинок, що в основному було пов'язано з електростатичним притяганням між позитивно зарядженими наночастинками та негативно зарядженими стінками рослинної клітини. [55, 57]

4.2.3. ВПЛИВ ВИДІВ РОСЛИН

Види рослин також є одним із важливих факторів, які впливають на поглинання наночастинок листям рослин. Поглинання наночастинок пов'язане з розподілом, щільністю та розміром пор у листках. Наприклад, порівняно з дводольними, у однодольних рослин продихи розташовані акуратно і мають правильну форму. Стадія росту та життєвий цикл рослин також впливає на поглинання наночастинок листям. Більшість видів рослин мають продихи лише на нижньому епідермісі, у той час як деякі мають продихи як на верхньому, так і на нижньому епідермісі. При наявності продихів з обох боків листя кількість продихів на нижньому епідермісі дводольних рослин була приблизно в 1,4 рази більшою, ніж на верхньому епідермісі. Для однодольних рослин кількість продихів була однаковою з обох сторін. Крім того, абіотичні фактори навколишнього середовища, такі як температура, вологість і світло, також впливають на відкриття і закриття продихів, таким чином впливаючи на поглинання НЧ. [36] Дослідження показали, що поглинання НЧ CeO_2 дводольним гарбузом було ефективнішим, ніж однодольною пшеницею [37]. В останні роки Ху та його колеги продемонстрували, що однодольні рослини, представлені кукурудзою, мають менший позаклітинний простір у листі, який не сприяє проникненню наночастинок. Тоді як дводольні рослини, представлені бавовником, мають більшу щільність продихів, що забезпечує більше можливостей для проникнення НЧ. [52, 59]

РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК НА ФІЗІОЛОГІЧНУ АКТИВНІСТЬ РОСЛИН

Наразі завдяки перевагам наночастинок як наноносіїв і нанопестицидів, таким як їхній малий розмір, простота використання, здатність до тривалого зберігання та підвищення ефективності сільськогосподарських хімікатів, застосування наночастинок у сільському господарстві є актуальним. значно більший. Взаємодія між наночастинками і рослинами має сприятливий і шкідливий вплив на фізіологічну морфологію рослини, розвиток рослин і врожайність сільськогосподарських культур. Вплив наночастинок на рослини залежить від виду рослин, методів використання, дозування та концентрації наночастинок. [64]

5.1. НАНОЧАСТИНКИ СПРИЯЮТЬ РОЗВИТКУ РОСЛИН І ВРОЖАЙНОСТІ

Використання сільськогосподарських наночастинок покращило якість рослинної продукції краще, ніж традиційні пестициди, що було доведено багатьма дослідниками. Наночастинки відіграють важливу роль у зростанні рослин та покращенні якості рослин шляхом збільшення вмісту поживних речовин, покращення фотосинтетичної активності та метаболізму (рис. 2). Було підтверджено, що наночастинки оксиду цинку беруть участь у синтезі та фотосинтезі рослинного хлорофілу та утворенні крохмалю, таким чином збільшуючи концентрацію розчинних вуглеводів. Використання наночастинок ZnO може покращити антиоксидантну активність і вміст хлорофілу в бавовні, збільшити кількість і вагу бавовняних коробочок на рослину, а також покращити параметри якості бавовняного волокна, такі як однорідність і міцність волокна. ZnO НЧ діють на рослини томатів і покращують врожайність томатів за рахунок збільшення поглинання поживних речовин (фосфору та цинку). НЧ Fe₃O₄ можуть покращувати біомасу та продуктивність рослин за рахунок збільшення вмісту білка, поживних речовин та вуглеводів у рослинах.

Шаріфі та інші використовували НЧ Fe_3O_4 для дії на рослини кукурудзи, а Armin використовував НЧ Fe_3O_4 для дії на рослини пшениці. Усі їхні результати підтвердили наведені вище висновки. Крім того, при застосуванні НЧ Fe_3O_4 для обробки пшениці у фазі кушіння кількість насіння пшениці значно зростає. Гао та ін. виявили, що TiO_2 НЧ збільшив накопичення біомаси шпинату на 60%. Крім того, НЧ CeO_2 сприяли подовженню стебла при концентрації 1–10 мг/л, а вага плоду значно збільшувалася при концентрації 10 мг/л. [65]

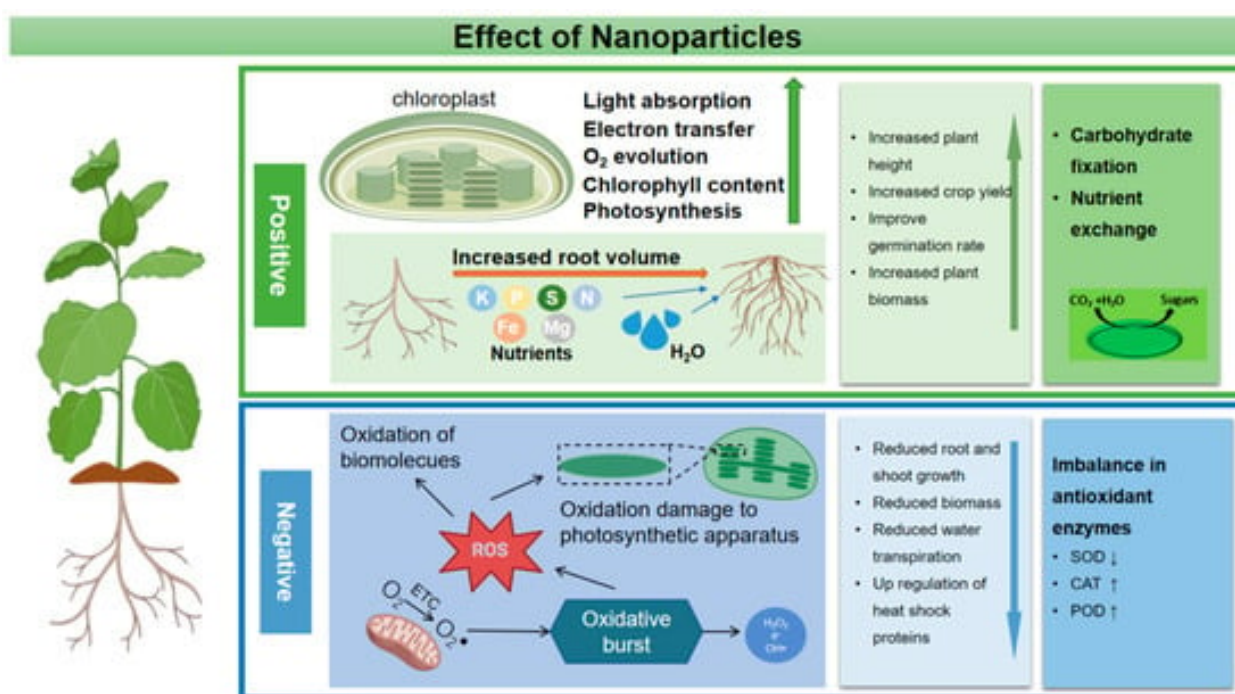


Рис 2. Схематична діаграма фізіологічної активності НЧ у рослинах.

(Wang X, Xie H, Wang P, Yin H. *Nanoparticles in Plants: Uptake, Transport and Physiological Activity in Leaf and Root // Materials // 2023*)

Доведено, що наночастинки TiO_2 як ефективний екологічно чистий фотокаталізатор здатні покращувати поглинання світла шляхом покращення перетворення енергії світлової системи та мають антибактеріальну активність після хімічної модифікації поверхні, що може зменшити період напіврозпаду пестицидів і сприяти проростанню насіння та росту розсади. У останніх

дослідженнях було показано, що наночастинки TiO_2 можуть сприяти росту пшениці та підвищувати врожайність пшениці. Водночас експерименти довели, що ці покращення пов'язані з тим фактом, що наночастинки діоксиду титану сприяють циклу та лінійному фосфорилуванню для покращення фотосинтетичної активності, таким чином збільшуючи запас фотосинтатів і, у свою чергу, збільшуючи врожайність рослин. Розпилення наночастинок TiO_2 на листі покращує вихід сухої речовини ячменю, оскільки наночастинки покращують фотовідновну активність. Крім того, за спільної дії НЧ ZnO та НЧ Si збільшувалися врожайність, маса та цукристість плодів манго. Стимулюючий вплив різних типів наночастинок на ріст рослин і проростання насіння наведено в таблиці нижче.

Таблиця 1. Короткий опис представників наночастинок, які сприяють розвитку рослин і врожаю.

(Wang X, Xie H, Wang P, Yin H. *Nanoparticles in Plants: Uptake, Transport and Physiological Activity in Leaf and Root // Materials // 2023*)

| Наночастинка | Розмір (нм) | Концентрація | Рослини | Позитивний ефект | довідка |
|----------------|-------------|---|---|--|---------|
| ZnO | 18 | Свіжий ґрунт з 6 мг/кг ґрунту | <i>Triticum aestivum</i> <i>Орієнтір</i> | Підвищився рівень хлорофілу в листі та висота пагонів | [90] |
| | 30 | 0 і 500 мг/кг ґрунту з або без органічного фосфору (0, 20 і 50 мг/кг) | <i>Кукурудза</i> | NM ZnO збільшили суху вагу кореня | [91] |
| | <100 | 50, 100 і 150 мг/л | <i>Mangifera indica</i> <i>Linn</i> | Покращено загальну врожайність (кількість і вага плодів на дерево). Комбіноване застосування НЧ призвело до збільшення врожайності плодів, середньої маси плодів, довжини, ширини, TSS, цукрів і показало найнижчий відсоток кислотності | [89] |
| | 12–24 | 1000 і 2000 мг/л | <i>Перець китайський</i> | НЧ сприяли росту рослин, збільшенню кількості та середньої маси плодів, якості плодів, вмісту капсаїцину та дигідрокапсаїцину в низьких дозах | [92] |
| TiO_2 | 20 | 25–750 мг/л | <i>Oryza sativa</i> | Покращене накопичення пальмітинової кислоти, амінокислот і гліцерину в зерні рису, покращений ріст пагонів і концентрація фосфору в цілій рослині і зерні | [93] |
| | 32 | 10, 100, 1000 мг/л | <i>Triticum aestivum</i> | Посилення росту бічних коренів і біомаси з одночасним поглинанням титану | [94] |
| | 27 | 250, 500, 750 мг/л | <i>Cannabis sativa</i> | Підвищений вміст калію і фосфору в плодах огірка | [73] |
| Cu | 50 | 50–500 мг/л | <i>Solanum lycopersicum</i> | Підвищений вміст лікопіну, вітаміну С у плодах помідорів, кількість плодів і твердість плодів | [95] |
| SiO_2 | 4–10 | 5 мМ | <i>Oryza sativa</i> | Підвищення врожайності та маси зерна | [96] |
| Si | | 25, 50 мг/л | <i>сочевиця</i> | Сприяє проростанню насіння, енергії розсади та біомасі | [97] |
| CeO_2 | 15–30 | 200, 500 мг/л | <i>Arabidopsis thaliana</i> | Збільшує розтягнення коренів, ріст коренів і пагонів | [98] |

5.2. НАНОЧАСТИНКИ ПОЛЕГШУЮТЬ АБІОТИЧНИЙ СТРЕС РОСЛИН

Абіотичний стрес рослин є основною проблемою, з якою стикаються рослини в процесі росту через посуху, солі та елементи важких металів, які призводять до зниження врожайності через затримку росту рослин. Щоб пом'якшити ці стреси, рослини виробили різні захисні механізми за допомогою фізіологічних шляхів. Застосування наночастинок може допомогти рослинам пом'якшити абіотичний стрес. Через екологічні, кліматичні та інші фактори врожайність і біомаса сільськогосподарських культур у посушливих районах значно знижуються порівняно зі звичайним середовищем. [66]

Sun застосував наночастинок оксиду цинку для обробки кукурудзи та виявив, що наночастинок можуть покращити швидкість фотосинтезу та вміст хлорофілу в рослинах під час посухового стресу, що довело, що наночастинок мають пом'якшувальну дію на рослинний стрес від посухи.

Невідповідна солоність у середовищі росту рослин призведе до дисбалансу живлення рослин і уповільнення росту рослин. Застосування наночастинок у сільському господарстві може допомогти покращити активність ферментів, які беруть участь у механізмі солостійкості рослин. Дослідження показало, що наночастинок ZnO зменшили сольовий стрес бавовни і пшениці. Застосування НЧ SiO₂ на листках підвищувало еластичність і розширення клітинної стінки огірка протягом вегетаційного періоду та збільшувало накопичення елементів азоту та фосфору в листках за рахунок зменшення втрат процесу вимивання, таким чином зменшуючи вміст Na, полегшив сольовий стрес на рослинах огірка. [62, 67]

Існування важких металів є більш шкідливим для росту рослин, що впливає на морфологію рослин, пригнічує ріст рослин і стимулює рослини до окислювального стресу. Щоб протистояти стресу важких металів,

наночастинки можуть покращувати здатність антиоксидантних систем, регулюючи концентрацію іонів важких металів у ґрунті, знижуючи експресію генів транспорту іонів важких металів у рослинах, стимулюючи виробництво захисних речовин (таких як органічні кислоти, кореневі екsudати та фітохелатин), щоб впоратися зі стресом іонів важких металів у рослинах.

Шаріфан та інші використовували наночастинки ZnO та важкі метали Pb²⁺ та Cd²⁺ як систему гідропонної культури для культивування салату (*Lactuca sativa* L. var. *Longifolia*) і виявили вміст Pb та Cd у рослинній тканині. Встановлено, що НЧ ZnO суттєво знижують накопичення Pb і Cd в корені салату, які становлять 81% і 49% відповідно. Pb і Cd у пагонах салату зменшилися на 44% і 30% відповідно. [43, 67]

Ян та інші обробили рис наночастинками ZnO, довівши, що наночастинки оксиду цинку можуть покращити ріст рису та зменшити накопичення миш'яку в рисі. Найкращий ефект було виявлено при концентрації наночастинок ZnO 100 мг/л. Порівняно з контрольною групою концентрація As у бруньці та корені проростків рису зменшилася на 40,7 % та 31,6 % відповідно. НЧ Se і Si знижують поглинання і накопичення Cd і Pb в рисі, таким чином зменшуючи летальний вплив важких металів на рослини. Водночас використання НЧ SiO₂ у листі сприяє збільшенню вмісту хлорофілу та зниженню накопичення Cd у рисі.

5.3. ТОКСИЧНІСТЬ НАНОЧАСТИНОК ДЛЯ РОСЛИН

Окрім багатьох корисних ефектів, не можна ігнорувати токсичність наночастинок у рослинах. Токсичність наночастинок може пошкодити рослини різними способами, наприклад, стимулюючи окислювальний стрес рослин, що призводить до фізичного пошкодження рослин, наприклад, закриття продихів через агрегацію наночастинок.

5.3.1. ІНГІБУЮЧА ДІЯ НАНОЧАСТИНОК НА РІСТ РОСЛИН

Коли наночастинки розпоршуються на рослини через листя у високій концентрації, велика кількість НЧ збирається на поверхні листя, що призводить до блокування продихів і перешкоджає газообміну та фотосинтезу рослин (рис.2). Деякі дослідження показали, що коли концентрація НЧ Zn і НЧ Cu перевищує критичне значення, швидкість росту рослин сповільнюється, а листя жовтіє. [68]

НЧ CuO є токсичними для *H.sativum* і знижують швидкість фотосинтезу рослин і пригнічують ріст коренів і стебел. У той же час трансформація наночастинок у рослинах призводить до пошкодження клітинної структури та зниження поглинання та транспортування поживних речовин.

Що стосується наночастинок на основі полімерів, поточні дослідження в основному обговорюють їх токсичний вплив на рослини в процесі застосування. Наприклад, після обробки насіння *Lepidium sativum* пластиковими частинками розміром 50 і 500 нм протягом 8 год схожість знизилася на 56% і 46% відповідно. Коли він був підданий впливу наночастинок PLA протягом 30 днів, швидкість проростання знизилася на 6%. Навпаки, швидкість проростання насіння пшениці та цибулі, оброблених PS НЧ протягом 72 годин, не мала жодного ефекту [61]. Отже, тривалий вплив полімерних наночастинок на рослини призведе до зниження швидкості проростання, що в основному пов'язано зі зменшенням поглинання рослинами поживних речовин через блокування пор наночастинок.

5.3.2. ГЕНОТОКСИЧНІСТЬ ТА ПОШКОДЖЕННЯ НАНОЧАСТИНОК У РОСЛИНАХ, ВИКЛИКАНЕ ОКИСЛЮВАЛЬНИМ СТРЕСОМ

Транспортування та накопичення наночастинок у рослинах провокує фітотоксичність, а взаємодія між наночастинками та рослинами призводить до збільшення виробництва рослинних АФК, що призводить до окисного

пошкодження та генетичної токсичності. Подібно до всіх аеробних організмів, клітини рослин активують АФК у відповідь на зміни середовища. Коли рівні АФК перевищують захисні механізми, клітини потрапляють у стан «окислювального стресу», що спричиняє необмежену шкоду білкам, нуклеїновим кислотам і ліпідам у клітинних мембранах і індукує окислювальний стрес. Рослини можуть захищати клітини та субклітинні системи від токсичності активних радикалів кисню антиоксидантними ферментами та низькомолекулярними антиоксидантами. Тому дослідження окисного пошкодження, викликаного наночастинками, головним чином зосереджені на визначенні активності антиоксидантного ферменту та вмісту АФК. Деякі дослідження та аналізи, особливо коли наночастинки діють на рослини у високих концентраціях, призводять до надмірного накопичення наночастинок у рослинах і великої кількості АФК, які активують антиоксидантну систему. У міру збільшення концентрації пластикових НЧ активність кількох репрезентативних антиоксидантних ферментів у коренях рису зросла, що свідчить про те, що рослина може стимулювати захисну реакцію та усунути надмірне накопичення АФК. Водночас більша концентрація наночастинок впливає на рівень ендогенних гормонів рослин.

Крім того, що наночастинки індукують виробництво АФК у рослинах і викликають гормональні зміни в рослинах, вони також генотоксичні. Наночастинки взаємодіють з біологічними макромолекулами, такими як ядра та ліпіди, і проявляють генотоксичність, яка може вплинути на поділ рослинної клітини. Наприклад, було показано, що Ag НЧ, інтерналізовані в кінчиках коренів пшениці, перешкоджають нормальному поділу клітин, пригнічують синтез ДНК і призводять до хромосомних аберацій. Крім того, мітотичний індекс клітин цибулі, які зазнали впливу НЧ, був значно знижений, і

спостерігалися хромосомні аберації та ядерні аномалії, що призводило до руйнування геномної стабільності, демонструючи генотоксичність PS НЧ. [69]

Для боротьби з токсичністю, спричиненою НЧ, дослідники також розробили відповідні рішення, у яких токсичні речовини, що виділяються НЧ, можна ефективно зменшити шляхом додавання поверхневого покриття. Наприклад, додавання залізного покриття до поверхні НЧ оксиду цинку може ефективно зменшити вивільнення іонів цинку. Покриті Fe наночастинки оксиду цинку не пригнічують проростання рослин і вміст пігменту в рослинах. Метод зниження токсичності шляхом інкапсуляції або модифікації поверхні наночастинок також застосовний до полімерних наночастинок. [60, 68]

Аналіз токсичності різних наночастинок як сільськогосподарських хімікатів допомагає визначити оптимальну концентрацію наночастинок у рості рослин. Будучи нетоксичними, розкладаними та біосумісними складними наночастинками, природні полімерні наночастинки можуть значною мірою уникнути негативного впливу наночастинок на основі металу, кремнію та органіки на рослини та навколишнє середовище. Хітозан є єдиним у природі позитивно зарядженим полісахаридом, який є наночастинковим матеріалом завдяки його антибактеріальним і противірусним властивостям. Завдяки своєму позитивному заряду наночастинки хітозану підвищують спорідненість з мембранами клітин рослин і підвищують реактивність систем рослин. Було доведено, НЧ на основі хітозану використовуються як стимулятори росту. Вони покращують засвоєння рослинами поживних речовин, вміст хлорофілу та швидкість фотосинтезу. На рослини наносили наночастинки хітозану трьох різних розмірів (420 нм, 750 нм, 970 нм). Результати показали, що хлорофіл рослин збільшився на 61%, 81% і 61%, а швидкість фотосинтезу зросла на 29%, 59% і 72% відповідно. Також було доведено, що застосування наночастинок хітозану на пшениці та ячмені сприяє росту рослин. [70]

РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ РОБОТИ

Автори роботи: І.М. Хоменко, О.І. Косик, Н.Ю. Таран [71]

В результаті застосування фосфорних мінеральних добрив ґрунти забруднюються мікродомішками кадмію.

Колеги з навчально-наукового центру «Інститут біології та медицини» КНУ ім. Т. Шевченка дослідили вплив кадмію та НЧ есенціальних металів на метаболізм рослин салату. Через антропогенний вплив забруднюється навколишнє середовище, відповідно знижується продуктивність біоценозів. ґрунти забруднюються мікродомішками кадмію внаслідок застосування фосфорних мінеральних добрив, збагачених солями важких металів і хелатних комплексів. Дослідження та розробка використання НЧ металів-мікроелементів як альтернативи підживлення сільськогосподарських культур може стати важливим кроком до більш стійкого, екологічно чистого та продуктивного сільського господарства, що доводить актуальність проблеми.

У даному дослідженні вивчався вплив 0,1 мМ розчину Cd^{2+} та передпосівної обробки сумішшю НЧ Cu, Zn, Mn, Fe (може частково нівелювати токсичну дію кадмію та стимулювати стійкість рослин до стресу) на два сорти салату *Lactuca sativa* L. з різним рівнем накопичення фенольних метаболітів (впливає на стійкість рослин до дії кадмію): Лоло (зелений колір надземної частини) та Лоло Росса (червоний колір надземної частини).

Було проведено аналіз адаптивної відповіді рослин шляхом вмісту первинних продуктів пероксидного окиснення ліпідів (ПОЛ). Також було проаналізовано активацію антиоксидантних систем двох типів; ензиматичного характеру – активність гваяколпероксидази, фенілаланінаміакліази, неензиматичного – вміст фенольних сполук. Було виявлено, що вплив наночастинок есенціальних металів та кадмію на рослини салату має певні особливості. [71]

Під впливом кадмію накопичення фенольних метаболітів у зеленого сорту Лоло зросло на 36%, а активність фенілаланінаміакліази збільшилась вдвічі, на відміну від червоного сорту Лоло Росса, який піддавався такому ж впливу кадмію. У обох представників спостерігалось зменшення рівня продукту пероксидного окиснення ліпідів (ПОЛ) наприкінці 14-добової експозиції.

Не дивлячись на те, що нанотехнології мають великий потенціал для розвитку сільського господарства, зокрема рослинництва, проблема впливу НЧ есенціальних металів на рослини та проблема фітотоксичності все ще залишається предметом дискусій.

Висока активність та здатність наночастинок швидко поглинатись та засвоюватись рослинними клітинами роблять їх потенційно корисними, але й водночас токсичними для агрофітоценозів. Вплив кадмію на рослини залежить від їх генотипу або генетичних особливостей, фази розвитку та рівня концентрації кадмію. Резистентність формується внаслідок активації механізмів індукованої стійкості. Здатність рослин пристосовуватися до несприятливих умов середовища залежить від порушення окиснювального балансу та адаптивних змін на клітинному рівні.

Захист рослин від окисного стресу забезпечується каскадними системами двох типів: неферментні антиоксиданти - низькомолекулярні хелатори (фенілпропаноїдної природи), ферменти - супероксиддисмутаза, аскорбатпероксидаза, каталаза, глутатіонредуктаза, гваяколпероксидаза).

Мета роботи полягала у вивченні впливу наночастинок есенціальних металів та кадмію на оксидантний статус двох сортів салату (*Lactuca sativa* L.), які відрізняються рівнем накопичення фенольних метаболітів. Для цього були проаналізовані ензиматичні та неензиматичні параметри. [71]

МЕТОДИКА

У даному дослідженні аналізували вплив іонів кадмію Cd^{2+} у концентрації 0.1 мМ та суміші нанометалів (Cu, Zn, Mn, Fe) на 30-денні рослини салату *Lactuca sativa* обох сортів: Лоло (зелена надземна частина), Лоло Росса (червона надземна частина), а саме на їхній ріст і пігментацію.

Розчин суміші наночастинок, який використовувався в даному досліді, отриманий на базі НУБіП, на кафедрі технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства. Розчин отримали шляхом водного диспергування гранул металів імпульсом електричного струму, межа амплітуди якого сягала від 100 до 2000 А.

Насіння було піддано передпосівній обробці сумішшю НЧ протягом 24 годин методом барботування (пропускання газу через шар рідини). Контрольна група насіння оброблялась дистильованою водою. Після обробки насіння вирощували за методом водної культури на 50%-му середовищі Хогленда. Надалі у середовище додавали розчин сульфату кадмію для дослідження впливу Cd^{2+} на одномісячні рослини дослідних груп. Зразки листків двох сортів взяли на 1, 7 та 14 доби експозиції. Очікується, що обробка сумішшю наночастинок металів стимулюватиме ріст і розвиток рослин *Lactuca sativa*.

Рівень ліпопероксидації є важливим показником стресу рослин. Цей процес, що призводить до утворення вільних радикалів та пошкодження біологічних мембран, може бути спричинений різними факторами, включаючи забруднення навколишнього середовища, дефіцит води або засолення ґрунту. В рамках даного дослідження рівень ліпопероксидації визначали шляхом аналізу накопичення гідропероксидів ліпідів. Цей метод базується на утворенні

забарвленого продукту при взаємодії гідропероксидів з 1%-м розчином солі Мора в H_2SO_4 . [71]

Для визначення вмісту гідропероксидів використовували спектрофотометр UV-1800 Shimadzu (Японія). Вимірювання проводили при довжині хвилі 530 нм. Очікується, що рівень ліпопероксидації буде вище у рослин, які зазнають стресу.

Гваяколпероксидаза (ГПО, КФ 1.11.1.7) - це фермент, який відіграє важливу роль у різних фізіологічних процесах рослин, включаючи захист від стресу, лігніфікацію та ріст. Активність ГПО може бути використана як біомаркер для оцінки стресостійкості рослин. [71]

В рамках даного дослідження активність ГПО визначали спектрофотометричним методом. Листки, охолоджені рідким азотом, гомогенізували у 0,05 М калій-фосфатного буферу (рН 7,8). Гомогенат далі центрифугували 10 хвилин при 15 000 об/хв при 4 °С. [Активність ГПО визначали за зміною оптичної щільності розчину при довжині хвилі 470 нм протягом 3 хвилин.] Очікується, що активність ГПО буде вище у рослин, які зазнають стресу. Отриману надосадову рідину використовували для визначення активності ензиму (фермента) ФАЛ. В ролі субстрату - 0.01 мл 30% розчину H_2O_2 , в ролі відновника - 1%-й розчин гваяколу. Результати виражали у мМ тетрагваяколу на одиницю білка.

Для визначення активності фенілаланінамінази (ФАЛ, КФ 4.3.1.24), що є ключовим фермента вторинного метаболізму, використовували модифікований за Цукером спектрофотометричний метод. Вимірювання проводили при довжині хвилі 270 нм. Для дослідження активності фенілаланінамінази (ФАЛ) в листках салату використовували

спектрофотометричний метод. Листя попередньо охолоджують рідким азотом. Далі їх гомогенізують у 25 мМ боратному буфері (рН 8,8), куди додають 23 мкМ меркаптоетанолу. Отриманий гомогенат центрифугували протягом 20 хвилин при 8000 g. Активність ФАЛ досліджували в отриманій надосадовій рідині. В ролі субстрату - 0,05 М розчину L-фенілаланіну. Активність ФАЛ виражали у мМ транс-коричної кислоти, яка утворилась протягом 1 хв, на одиницю білка. Вміст розчинного білка в зразку визначався за методом Бредфорда. Цей метод ґрунтується на реакції зв'язування білка з барвником Coomassie Blue G-250. Завдяки цій реакції утворюється комплекс, який має характерне поглинання при довжині хвилі 595 нм. Вимірюючи оптичну щільність розчину при цій довжині хвилі, можна кількісно визначити вміст білка в зразку. [71]

Для визначення концентрації фенольних сполук у сухій речовині використовували спектрофотометричний метод. Для цього використовували реактив Фоліна-Чокальтеу, який дає характерну реакцію з фенольними сполуками, а результати перераховували в міліграми галової кислоти на 1 г сухої речовини.

Статистичну обробку результатів проведено з використанням трьох біологічних та аналітичних повторень за допомогою стандартного пакету програм Microsoft Excel 2010. Розрізнення між вибірками вважали значущими при рівні значимості $P \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Активація пероксидного окиснення ліпідів (ПОЛ) вважається ключовим показником інтенсивності стресового впливу різних факторів на організми рослин, наприклад, абіотичних, біотичних та антропогенних. Надмірне накопичення агресивних метаболітів та АФК, яке може посилюватися впливом важких металів (наприклад, кадмію), призводить до утворення продуктів ліпопероксидації та руйнування цілісності клітинних мембран.

Ймовірно, певні продукти розпаду мембран відіграють роль у сигнальній системі адаптивного захисту рослин від токсичного впливу високих концентрацій важких металів у довкіллі.

Гідропероксиди ліпідів, що утворюються на ранніх етапах ПОЛ, слугують біомаркером стресового стану рослин, адже їх рівень у тканинах зростає при дії стресових факторів.

Дослідження не виявили жодних змін у вмісті первинних продуктів ПОЛ у листках салату сорту Лоло, обробленого наночастинками перед посівом, порівняно з контрольною групою (рис. 1, а). Лише протягом першої доби після спільного впливу кадмію та наночастинок спостерігалось значне (на 17%) зниження рівня гідропероксидів, що може свідчити про раннє активування систем антиоксидантного захисту у сорту Лоло.

При подвійній обробці досліджуваних зразків салату сорту Лоло Росса (рис. 1, б) спостерігається максимальне накопичення первинних продуктів ПОЛ на 7 добу. Цей рівень становив приблизно 70% від рівня контрольної групи. Після 7-го дня спостерігалось зниження накопичення продуктів ПОЛ, яке порівняли з контрольною групою на 14 добу експозиції.

За результатами виявлено, що НЧ стимулювали у рослинах ферменти, які виробляють активні форми кисню (АФК). Продукти окиснення утворюються при обробці рослин, але відбувається цей процес нерівномірно, з періодами більшої та меншої інтенсивності (хвилеподібно), через ранню активацію ферментних систем. Кадмій посилює окиснення ліпідів, що призводить до збільшення вмісту гідропероксидів. Сорт Лоло Росса здатен знижувати рівень гідропероксидів до контрольного рівня. Це свідчить про високу стійкість Лоло Росса до окиснювального стресу, викликаного кадмієм, що може бути пов'язано з його значним адаптивним потенціалом.

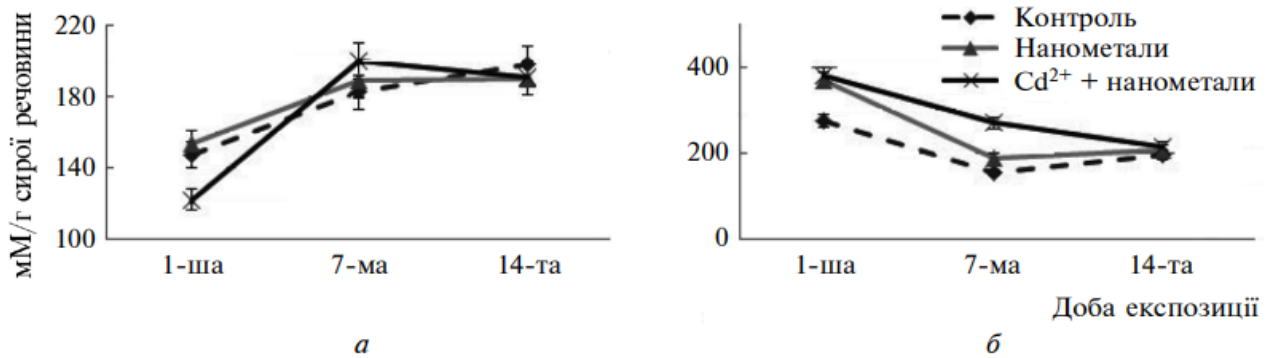


Рис. 1. Вміст гідропероксидів ліпідів у листках салату сортів Лоло (а) та Лоло Росса (б) за дії Cd²⁺ і суміші наночастинок металів

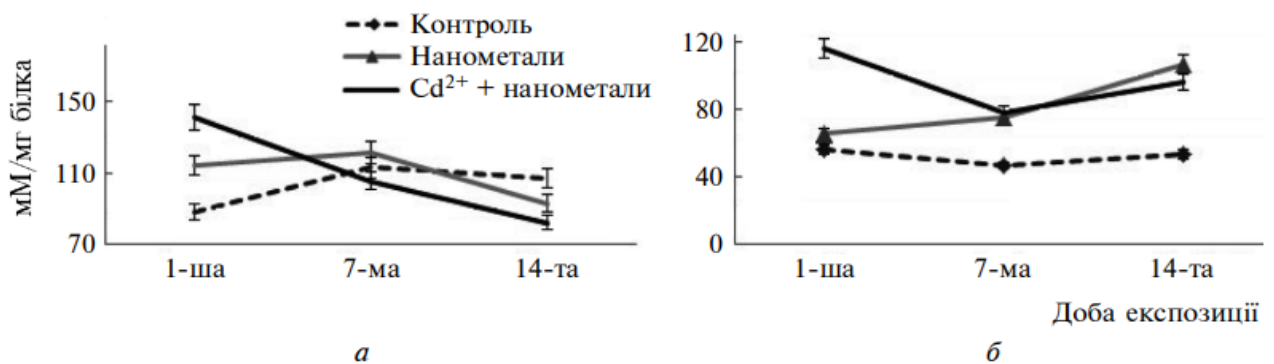


Рис. 2. Активність гваяколпероксидази (mM тетрагваяколу/мг білка) в листках салату сортів Лоло (а) та Лоло Росса (б) за дії Cd²⁺ і суміші наночастинок металів

Пероксидази - це ензими, які відіграють ключову роль в захисті рослин від окисного стресу. Вони ефективні в розщепленні перекису водню (H₂O₂),

який є токсичним продуктом окислення. Також вони мають різні форми, які можуть розщеплювати різні субстрати, що робить їх універсальними.

Активність ГПО (гваяколпероксидази) – представника пероксидаз – зростає в надземній та підземній частинах рослини *Phragmites australis* за умови підвищеного рівня арсену в середовищі. Це свідчить про те, що ГПО може бути використана як біомаркер для виявлення стресу, викликаного важкими металами. ГПО належить до класу III пероксидаз, які часто реагують на накопичення важких металів в рослинах.

Для сорту Лоло (зелена надземна частина) (рис. 2, а) підвищення активності фіксується в усіх варіантах обробки – на 1 добу експозиції (до 60% рівня контролю), а зниження – на 14 добу експозиції (на 24% рівня контролю).

Для сорту Лоло Росса (червона надземна частина) (рис. 2, б) фіксується стабільна висока активність за умови подвійної обробки – пік на 1 добу експозиції (x2 рівня контролю).

Виявлено, що активність значно зросла на 7 та 14 доби експозиції. Це свідчить про те, що передпосівна обробка наночастинками есенціальних металів активує систему антиоксидантного захисту в рослинах. Підвищена активність ГПО може допомагати рослинам витримувати стрес, спричинений Cd^{2+} .

Фенольні метаболіти – ключові елементи антиоксидантного неензиматичного захисту. Вміст пероксидаз збільшується, коли рослини отруюються важкими металами. Це пов'язано з тим, що пероксидази нейтралізують шкідливі речовини, такі як активні форми кисню (АФК) та самі важкі метали (хелатування). Пероксидази зв'язують важкі метали, роблячи їх нетоксичними для рослин.

За результатами виявлено: сорт Лоло (зелений) – підвищення синтезу вторинних фенольних метаболітів, сорт Лоло Росса (червоний) – вміст фенольних метаболітів нижчий протягом експозиції, порівняно з контролем (рис. 3, б)

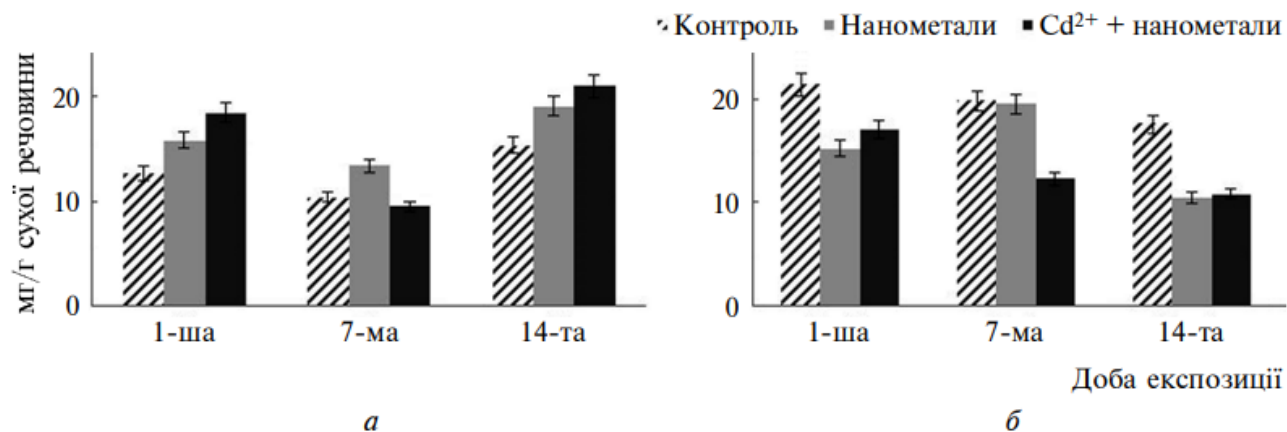


Рис. 3. Вміст фенольних сполук у листках салату сорту Лоло (а) та Лоло Росса (б) за дії Cd²⁺ і суміші наночастинок металів

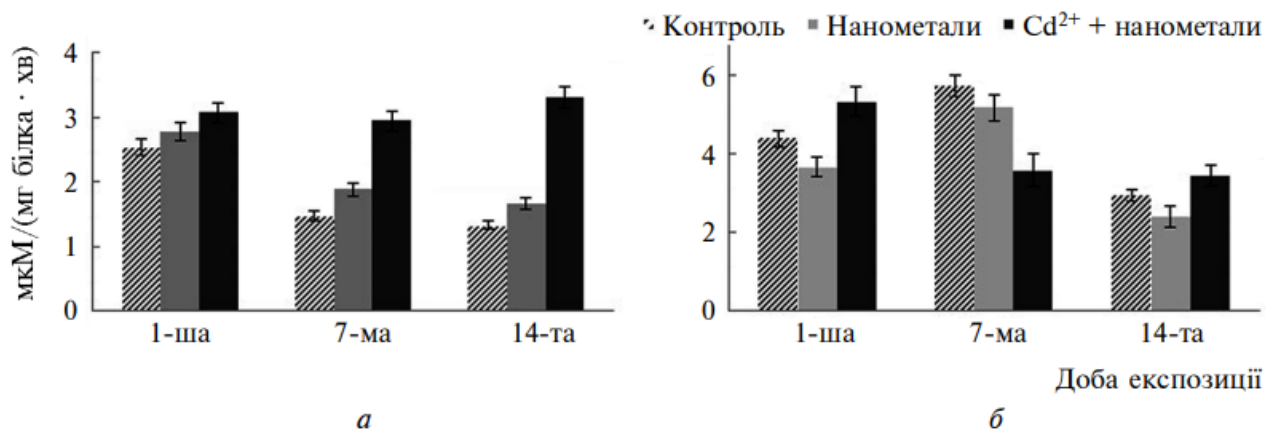


Рис. 4. Активність фенілаланінаміації (μМ *транс*-коричної кислоти/(мг білка · хв)) в листках салату сорту Лоло (а) та Лоло Росса (б) за дії Cd²⁺ і суміші наночастинок металів

Сорт Лоло – підвищення активності ФАЛ протягом експозиції за умови подвійного навантаження НЧ і Cd²⁺ (рис. 4, а), сорт Лоло Росса – активність ФАЛ на 7 добу дії Cd²⁺ знижується до контролю (рис. 4, б).

Для двох сортів не було виявлено відмінностей між обробленими наночастинками зразками в порівнянні з необробленими контрольними зразками. Результати дослідження протирічні. Хоча відомо, що гени в пігментованих салатах активно синтезують фенольні сполуки, дане дослідження не показало, що кадмій значно впливає на активність цих генів або накопичення фенольних сполук в салаті Лоло Росса. Фенольні сполуки можуть виявляти антиоксидантні та прооксидантні властивості за високого вмісту металів. Фенольні сполуки в салаті можуть зв'язувати метали, що змінює баланс окиснення-відновлення в клітинах. Ця зміна може призвести до одночасного збільшення кількості шкідливих окисних сполук та активації антиоксидантних систем. Це частково пояснює, чому салат Лоло Росса має більш активну систему гваяколпероксидази (ГПО), ніж салат Лоло. Отже, різні сорти салату по-різному захищаються від кадмію, що пов'язано з різним вмістом фенольних сполук. У салату сорту Лоло генетично більший вміст фенольних сполук, що допомагає адаптуватися та виживати в несприятливих умовах. [71]. Проте, незважаючи на різноспрямований вплив досліджуваних чинників на активність ГПО, в обох сортів салату був знижений вміст первинних продуктів ліпопероксидації, який порівнювався з контрольним на 14-ту добу дії кадмію, що свідчить про збалансування про-антиоксидантного статусу рослин унаслідок увімкнення додаткових систем антиоксидантного захисту.

Це дослідження продемонструвало, що салати сортів Лоло та Лоло Росса здатні адаптуватися до стресу, викликаного кадмієм, за рахунок активації додаткових систем антиоксидантного захисту. Кадмій, в свою чергу, має різний вплив на активність ферменту гваяколпероксидази (ГПО). В обох сортів салату спостерігалось зниження рівня первинних продуктів ліпопероксидації на 14-й день дії кадмію.

ВИСНОВКИ

1. За аналізом оглядових та експериментальних наукових статей встановлено, що нанофітобіотехнологія є сучасною, активно досліджуваною галуззю нанобіотехнології, яка має великий практичний потенціал застосування у рослинництві задля вирішення глобальних проблем людства.

2. Основні напрями сучасних досліджень в галузі нанобіотехнологій рослин спрямовані на вивчення: механізмів поглинання НЧ надземною та кореневою системою рослинного організму, транслокації НЧ по транспортним шляхам в рослини, фізіологічної дії та фітотоксичності НЧ різної природи, активізації адаптивних реакцій на дію стресових факторів абіотичної та біотичної природи за впливу НЧ.

3. Поглинання НЧ здійснюється через кореневу систему або листя різноманітними способами, які залежать від розміру, форми, заряду та хімічної природи НЧ. Транспортування відбувається апопластними та сімпластними шляхами, що також обумовлено природою НЧ. Фізіологічна дія обумовлена молекулярними реакціями, які регулюють генетичну експресію, сигнальні шляхи, фітогормональний статус та проявляються на рівні зміни фізіологічних процесів та екологічної взаємодії з мікробіомом.

4. Перспективи практичних сфер застосування НЧ у сучасному рослинництві пов'язані з адресною доставкою та контрольованим івільненням агрохімікатів різної природи – мінеральних добрив, пестицидів, фунгіцидів та ін., також зі стимуляцією захисних реакцій та використанням у генетичній інженерії рослин.

5. На прикладі експериментальної роботи проведений аналіз впливу композиції наночастинок металів на параметри антиоксидантного метаболізму рослин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Sanzari I, Leone A, Ambrosone A. Nanotechnology in Plant Science: To Make a Long Story Short. *Front Bioeng Biotechnol*, 2019. 7; 120 p.
2. M. Usman, M. Farooq, A. Wakeel, A. Nawaz, S. A. Cheema, Hafeez ur Rehman, I. Ashraf. Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of The Total Environment*, 2020. 72, 137 p.
3. Das R.K., Pachapur V.L., Lonappan L., Naghdi M., Pulicharla R., Maiti S., Brar S.K. Biological synthesis of metallic nanoparticles: plants, animals and microbial aspects. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 2017
4. Singh J., Dutta T., Kim K.H., Rawat M., Samddar P., Kumar P. Green synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. *Journal of nanobiotechnology*, 2018. 16(1), 84.
5. Rambidi N.G., Berezkin A.V. Physical and chemical foundations of nanotechnology, 2008.
6. Kharissova O.V., Dias H.R., Kharisov B.I., Perez B.O.& Perez V.M. J. The greener synthesis of nanoparticles. *Trends in biotechnology*, 2013. 10, 101 p.
7. Ali S.; Mehmud A.; Khan N. Uptake, translocation and consequences of nanomaterials for plant growth and adaptation to stress, 2021. (2): 1-17 p.
8. Juarez-Maldonado, A., González-Morales, S. & Cabrera-De la Fuente, M. // Nanometals as promoters of nutraceutical quality in crop plants. *Impact of Nanoscience in the Food Industry*, 2018. 10, 277-310 p.
9. Xueran Wang, Hongguo Xie, Pei Wang, Heng Yin. Nanoparticles in Plants: Uptake, Transport and Physiological Activity in Leaf and Root, 2023. 16 (8), 3097
10. Cunningham FJ, Goh NS, Demirer GS, Matos JL, Landry MP. Nanoparticle-Mediated Delivery towards Advancing Plant Genetic Engineering. *Trends Biotechnol*, 2018. 10, 1016.

11. Sanzari I, Leone A, Ambrosone A. Nanotechnology in Plant Science: To Make a Long Story Short. *Front Bioeng Biotechnol*, 2019. 7:120
12. Boots.B. Russell.C.W. Green.D.S. Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environ. Science technology*, 2019. 53, 19.
13. Gao, G.; Tester, M.A.; Julkowska, M.M. The Use of High-Throughput Phenotyping for Assessment of Heat Stress-Induced Changes in Arabidopsis Plant Phenomics, 2020. 20 (37)
14. Ha, N.; Seo, E.; Kim, S.; Lee, S.J. Adsorption of nanoparticles suspended in a drop on a leaf surface of *Perilla frutescens* and their infiltration through stomatal pathway. *Scientific Reports*, 2021. 11(1):11556
15. Alimi, O.S.; Farner Budarz, J.; Hernandez, L.M.; Tufenkji, N. Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. *Environmental science technology*, 2018. 2(4):1704-1724.
16. Wang X, Xie H, Wang P, Yin H. Nanoparticles in Plants: Uptake, Transport and Physiological Activity in Leaf and Root. *Materials*, 2023. 16(8):3097
17. Wang P, Lombi E, Zhao FJ, Kopittke PM. Nanotechnology: A New Opportunity in Plant Sciences. *Trends Plant Sci*, 2016. (8):699-712
18. Grillo, R.; Mattos, B.D.; Antunes, D.R.; Forini, M.M.L.; Monikh, F.A.; Rojas, O.J. Foliage adhesion and interactions with particulate delivery systems for plant nanobionics and intelligent agriculture. *Nano Today*, 2021. 16(8): 3097.
19. Xiong, T.; Zhang, T.; Xian, Y.; Kang, Z.; Zhang, S.; Dumat, C.; Shahid, M.; Li, S. Foliar uptake, biotransformation, and impact of CuO nanoparticles in *Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort. *Environ. Geochem. Health*, 2021. 43(1)
20. Vega-Vásquez, P.; Mosier, N.S.; Irudayaraj, J. Nanoscale Drug Delivery Systems: From Medicine to Agriculture. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020. 8:79.
21. Gao, M.; Chang, J.; Wang, Z.; Zhang, H.; Wang, T. Advances in transport and toxicity of nanoparticles in plants. *Nanobiotechnol.* 2023. 21(1)

22. Khan, I.; Awan, S.A.; Rizwan, M.; Hassan, Z.U.; Akram, M.A.; Tariq, R.; Brestic, M.; Xie, W. Nanoparticle's uptake and translocation mechanisms in plants via seed priming, foliar treatment, and root exposure: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. 29(60):89
23. Oliveri Conti, G.; Ferrante, M.; Banni, M.; Favara, C.; Nicolosi, I.; Cristaldi, A.; Fiore, M.; Zuccarello, P. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environ. Res.* 2020
24. Yang, C.; Powell, C.A.; Duan, Y.; Shatters, R.; Zhang, M. Antimicrobial Nanoemulsion Formulation with Improved Penetration of Foliar Spray through Citrus Leaf Cuticles to Control Citrus Huanglongbing. *PLoS ONE*, 2015. 10(7):138.
25. Perez-de-Luque, A. Interaction of Nanomaterials with Plants: What Do We Need for Real Applications in Agriculture Front. *Environ. Sci.* 2017. 5:12
26. Bussi eres, P. Estimating the number and size of phloem sieve plate pores using longitudinal views and geometric reconstruction. *Sci. Rep.* 2014, 4:4929.
27. Hu, P.; An, J.; Faulkner, M.M.; Wu, H.; Li, Z.; Tian, X.; Giraldo, J.P. Nanoparticle Charge and Size Control Foliar Delivery Efficiency to Plant Cells and Organelles. *ACS Nano*, 2020. 14(7):7970-7986.
28. Ha, N.; Seo, E.; Kim, S.; Lee, S.J. Adsorption of nanoparticles suspended in a drop on a leaf surface of *Perilla frutescens* and their infiltration through stomatal pathway. *Sci. Rep.* 2021, 1(1):11556.
29. Li, L.; Luo, Y.; Li, R.; Zhou, Q.; Peijnenburg, W.J.G.M.; Yin, N.; Yang, J.; Tu, C.; Zhang, Y. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nat. Sustain.* 2020. 3(11)
30. Zhu, J.; Li, J.; Shen, Y.; Liu, S.; Zeng, N.; Zhan, X.; White, J.C.; Gardea-Torresdey, J.; Xing, B. Mechanism of zinc oxide nanoparticle entry into wheat seedling leaves. *Environ. Sci.-Nano*, 2020. 7(12):3901-3913
31. Sun, H.; Lei, C.; Xu, J.; Li, R. Foliar uptake and leaf-to-root translocation of nanoplastics with different coating charge in maize plants. *J. Hazard. Mater.* 2021

32. Zhu, J.; Wang, J.; Zhan, X.; Li, A.; White, J.C.; Gardea-Torresdey, J.L.; Xing, B. Role of Charge and Size in the Translocation and Distribution of Zinc Oxide Particles in Wheat Cells. *Acs Sustain. Chem. Eng* 2021. 9(34)
33. Fan, X.; Cao, X.; Zhou, H.; Hao, L.; Dong, W.; He, C.; Xu, M.; Wu, H.; Wang, L.; Chang, Z. Carbon dioxide fertilization effect on plant growth under soil water stress associates with changes in stomatal traits, leaf photosynthesis, and foliar nitrogen of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) *Environ. Exp. Bot.* 2020. 179(3):104203.
34. Schwabe, F.; Schulin, R.; Limbach, L.K.; Stark, W.; Bürge, D.; Nowack, B. Influence of two types of organic matter on interaction of CeO₂ nanoparticles with plants in hydroponic culture. *Chemosphere*, 2013.
35. Zhao, L.; Peralta-Videa, J.R.; Ren, M.; Varela-Ramirez, A.; Li, C.; Hernandez-Viezcas, J.A. Transport of Zn in a sandy loam soil treated with ZnO NPs and uptake by corn plants: Electron microprobe and confocal microscopy studies *Chem. Eng. J.* 2012
36. Peng, C.; Duan, D.; Xu, C.; Chen, Y.; Sun, L.; Zhang, H.; Yuan, X.; Zheng, L.; Yang, Y. Translocation and biotransformation of CuO nanoparticles in rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Environ. Pollut.* 2015. 197C:99-107.
37. Liu, Q.; Chen, B.; Wang, Q.; Shi, X.; Xiao, Z.; Lin, J.; Fang, X. Carbon Nanotubes as Molecular Transporters for Walled Plant Cells // *Nano Lett*, 2009
38. Rani, S.; Kumari, N.; Sharma, V. Uptake, translocation, transformation and physiological effects of nanoparticles in plants. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2022. 69(1):21.
39. Slomberg, D.L.; Schoenfisch, M.H. Silica. Nanoparticle Phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. *Environ. Sci. Technol*, 2012
40. Prasad, A.; Astete, C.E.; Bodoki, A.E.; Windham, M.; Bodoki, E.; Sabliov, C.M. Zein. Nanoparticles Uptake and Translocation in Hydroponically Grown Sugar Cane Plants. *J. Agric. Food Chem*, 2018. 66 (26).

41. Parkinson, S.J.; Tungsirirurp, S.; Joshi, C.; Richmond, B.L.; Gifford, M.L.; Sikder, A.; Lynch, I.; O'Reilly, R.K.; Napier, R.M. Polymer nanoparticles pass the plant interface. *Nat. Commun.* 2022

42. Raliya, R.; Saharan, V.; Dimkpa, C.; Biswas, P. Nanofertilizer for Precision and Sustainable Agriculture: Current State and Future Perspectives. *J. Agric. Food Chem.* 2018. 66(26):6487-6503

43. Raliya, R.; Franke, C.; Chavalmane, S.; Nair, R.; Reed, N.; Biswas, P. Quantitative Understanding of Nanoparticle Uptake in Watermelon Plants. *Front. Plant Sci.* 2016

44. Bueno, V.; Gao, X.; Rahim, A.A.; Wang, P.; Bayen, S.; Ghoshal, S. Uptake and Translocation of a Silica Nanocarrier and an Encapsulated Organic Pesticide Following Foliar Application in Tomato Plants. *Environ. Sci. Technol.* 2022

45. de la Rosa, G.; Vázquez-Núñez, E.; Molina-Guerrero, C.; Serafín-Muñoz, A.H.; Vera-Reyes, I. Interactions of nanomaterials and plants at the cellular level: Current knowledge and relevant gaps. *Nanotechnol. Environ. Eng.* 2021, 1(1):1.

46. Zhao, P.; Yuan, W.; Xu, C.; Li, F.; Cao, L.; Huang, Q. Enhancement of Spirotetramat Transfer in Cucumber Plant Using Mesoporous Silica Nanoparticles as Carriers. *J. Agric. Food Chem.* 2018. 66(44):11592-11600

47. Zhu, J.; Wang, J.; Chen, R.; Feng, Q.; Zhan, X. Cellular Process of Polystyrene Nanoparticles Entry into Wheat Roots. *Environ. Sci. Technol.* 2022

48. Su, Y.; Ashworth, V.; Kim, C.; Adeleye, A.S.; Rolshausen, P.; Roper, C.; White, J.; Jassby, D. Delivery, uptake, fate, and transport of engineered nanoparticles in plants: A critical review and data analysis. *Environ. Sci.-Nano*, 2019

49. Schwab, F.; Zhai, G.; Kern, M.; Turner, A.; Schnoor, J.L.; Wiesner, M.R. Barriers, pathways and processes for uptake, translocation and accumulation of nanomaterials in plants—Critical review. *Nanotoxicology*, 2016. 10(3):257-78

50. Chen, J.; Dou, R.; Yang, Z.; You, T.; Gao, X.; Wang, L. Phytotoxicity and bioaccumulation of zinc oxide nanoparticles in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiol. Biochem.* 2018, 130:604-612
51. Tong, Y.; Wu, Y.; Zhao, C.; Xu, Y.; Lu, J.; Xiang, S.; Zong, F.; Wu, X. Polymeric Nanoparticles as a Metolachlor Carrier: Water-Based Formulation for Hydrophobic Pesticides and Absorption by Plants. *J. Agric. Food Chem.* 2017
52. Shebl, A.; Hassan, A.A.; Salama, D.M.; Abd El-Aziz, M.E.; Abd Elwahed, M.S.A. Green Synthesis of Nanofertilizers and Their Application as a Foliar for *Cucurbita pepo* L. *J. Nanomater.* 2019
53. Bala, R.; Kalia, A.; Dhaliwal, S.S. Evaluation of Efficacy of ZnO Nanoparticles as Remedial Zinc Nanofertilizer for Rice. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2019. 19: 379-389.
54. Faizan, M.; Bhat, J.A.; Chen, C.; Alyemini, M.N.; Wijaya, L.; Ahmad, P.; Yu, F. Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) induce salt tolerance by improving the antioxidant system and photosynthetic machinery in tomato. *Plant Physiol. Biochem.* 2021. 161:122-130
55. Tondey, M.; Kalia, A.; Singh, A.; Dheri, G.S.; Taggar, M.S Seed Priming and Coating by Nano-Scale Zinc Oxide Particles Improved Vegetative Growth, Yield and Quality of Fodder Maize (*Zea mays*). *Agronomy* 2021
56. Elsheery, N.I.; Helaly, M.N.; El-Hoseiny, H.M.; Alam-Eldein, S.M. Zinc Oxide and Silicone Nanoparticles to Improve the Resistance Mechanism and Annual Productivity of Salt-Stressed Mango Trees. *Agronomy* 2020
57. Miao, Y.; Luo, X.; Gao, X.; Wang, W.; Li, B.; Hou, L. Exogenous salicylic acid alleviates salt stress by improving leaf photosynthesis and root system architecture in cucumber seedlings. *Sci. Hortic.* 2020, 272:109-577
58. Hussein, M.M.; Abou-Baker, N.H. The contribution of nano-zinc to alleviate salinity stress on cotton plants. *R. Soc. Open Sci.* 2018

59. Wang, X.; Jiang, J.; Dou, F.; Sun, W.; Ma, X. Simultaneous mitigation of arsenic and cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by silicon oxide nanoparticles under different water management schemes. *Paddy Water Environ.* 2020, 19 (24)
60. Tian, L.; Shen, J.; Sun, G.; Wang, B.; Ji, R.; Zhao, L. Foliar Application of SiO₂ Nanoparticles Alters Soil Metabolite Profiles and Microbial Community Composition in the Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) Rhizosphere Grown in Contaminated Mine Soil. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54(20):13137-13146
61. Boots, B.; Russell, C.W.; Green, D.S. Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environ. Sci. Technol.* 2019
62. Hossain, Z.; Mustafa, G.; Sakata, K.; Komatsu, S. Insights into the proteomic response of soybean towards Al₂O₃, ZnO, and Ag nanoparticles stress. *J. Hazard. Mater.* 2016, 304:291-305.
63. Kalcikova, G.; Gotvajn, A.Z.; Kladnik, A.; Jemec, A. Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor*. *Environ. Pollut.* 2017, 230:1108-1115
64. Jurkow, R.; Pokluda, R.; Sekara, A.; Kalisz, A. Impact of foliar application of some metal nanoparticles on antioxidant system in oakleaf lettuce seedlings. *BMC Plant Biol.* 2020, 20(1):290
65. Vankova, R.; Landa, P.; Podlipna, R.; Dobrev, P.I.; Prerostova, S.; Langhansova. ZnO nanoparticle effects on hormonal pools in *Arabidopsis thaliana*. *Sci. Total Environ.* 2017, 593-594:535-542
66. Sturikova, H.; Krystofova, O.; Huska, D.; Adam, V. Zinc, zinc nanoparticles and plants. *J. Hazard. Mater.* 2018, 349:101-110.