

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Факультет хімічних та біофармацевтичних технологій  
Кафедра біотехнології, шкіри та хутра

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему

**«Вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на ріст пшениці»**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 162 Біотехнології та біоінженерія

Освітня програма Біотехнологія високомолекулярних сполук

Виконала: студентка групи МгБТ-23

Лупан К. О.

Науковий керівник: к.т.н., доц. Охмат О.А.

Рецензент: д.т.н., проф. Андреєва О.А.

Київ 2024

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Факультет хімічних та біофармацевтичних технологій  
Кафедра біотехнології, шкіри та хутра  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 162 Біотехнології та біоінженерія  
Освітня програма Біотехнологія високомолекулярних сполук

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри БШХ

\_\_\_\_\_ Олена МОКРОУСОВА  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ  
Лупан Катерині Олександрівні**

1. Тема кваліфікаційної роботи: Вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на ріст пшениці  
науковий керівник роботи Охмат Олена Анатоліївна, к.т.н., доц.  
затверджені наказом КНУТД від «03» вересня 2024 року № 188-уч.
2. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: завдання на кваліфікаційну роботу; наукова література щодо властивостей наночасток та лактонів мікробного походження; методики дослідження впливу чинників різної природи на ріст сільськогосподарських культур; матеріали науково-дослідної та переддипломної практик
3. Зміст кваліфікаційної роботи: вступ; огляд літератури; об'єкт, мета та методи дослідження; експериментальна частина; висновки; список використаних джерел; додатки.
4. Дата видачі завдання 03.09.2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу кваліфікаційної роботи	Орієнтовний терміни виконання	Примітка про виконання
1	Вступ	17.11.2024	
2	Розділ 1 Огляд літератури	30.09.2024	
3	Розділ 2 Об'єкт, мета та методи дослідження	11.10.2024	
4	Розділ 3 Експериментальна частина	04.11.2024	
5	Висновки	11.11.2024	
6	Оформлення кваліфікаційної роботи (чистовий варіант)	15.11.2024	
7	Подача кваліфікаційної роботи науковому керівнику для відгуку (за 14 днів до захисту)	19.11.2024	
8	Подача кваліфікаційної роботи для рецензування (за 12 днів до захисту)	21.11.2024	
9	Перевірка кваліфікаційної роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)		
10	Подання кваліфікаційної роботи на підпис завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)		

З завданням ознайомлений:

Студентка \_\_\_\_\_ Катерина ЛУПАН

Науковий керівник \_\_\_\_\_ Олена ОХМАТ

## АНОТАЦІЯ

**Катерина ЛУПАН. Вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на ріст пшениці.**

Кваліфікаційна робота за спеціальністю 162 «Біотехнології та інженерія». – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2024 рік. – Рукопис.

У роботі досліджено вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на ріст та розвиток озимої пшениці. Проаналізовано механізми дії цих агентів на фотосинтетичні процеси та метаболізм рослин. Встановлено, що обробка насіння наночастками срібла у поєднанні з бактеріальними лактонами демонструє зростання пагонів і кореневої системи, що підкреслює їх потенціал для стимуляції росту рослин. Виявлено також, що комбінації наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів позитивно впливають на вміст хлорофілів, каротиноїдів, білків та інших важливих метаболітів, що може стати основою для нових агрономічних практик у сільському господарстві України в умовах зміни клімату та екологічних викликів.

*Ключові слова: пшениця, наночастки срібла, N-ацилгомосеринлактони, біостимулятори, оцінка ефективності.*

## ABSTRACT

**Kateryna LUPAN. The effect of silver nanoparticles and N-acylhomoserine lactones on wheat growth.**

Qualification work in the field 162 "Biotechnology and engineering". – Kyiv National University of Technologies and Design, 2024. – Manuscript.

The qualification work is devoted to the study effects of silver nanoparticles and N-acylhomoserine lactones on the growth and development of winter wheat. The mechanisms by which these agents affect photosynthetic processes and plant metabolism were analyzed. The treatment of seeds with silver nanoparticles in combination with bacterial lactones was found to promote the greatest growth of both shoots and the root system, highlighting their potential for stimulating plant growth. The combinations silver nanoparticles and N-acylhomoserine lactones were also found to positively affect the levels of chlorophylls, carotenoids, proteins, and other important metabolites, which could serve as a basis for new agronomic practices in Ukrainian agriculture amid climate change and environmental challenges.

*Keywords: wheat, silver nanoparticles, N-acylhomoserine lactones, biostimulants, efficacy assessment.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	11
1.1 Загальні відомості про наночастки.....	11
1.2 Наночастки срібла.....	12
1.3 Методи синтезу наночасток срібла .....	14
1.4 «Зелений» синтез наночасток срібла з використанням бактерій .....	16
1.5 «Зелений» синтез наночасток срібла з використанням дріжджів.....	17
1.6 Властивості наночасток срібла та їх вплив на рослини .....	18
1.7 Лактони та N-ацилгомосеринлактони в агробіотехнологіях.....	19
1.8 Методи синтезу лактонів.....	20
1.9 Оцінка можливості використання наночасток срібла та лактонів в агробіотехнологіях .....	22
Висновки до розділу 1 .....	24
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТ, МЕТА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	25
2.1 Характеристика наночасток срібла .....	25
2.2 Характеристика N-ацилгомосеринлактонів .....	27
2.3 Формування дослідних груп, методика обробки насіння, вирощування проростків пшениці.....	29
2.4 Спектрофотометричне визначення концентрації пігментів у дослідних зразках .....	31
2.5 Розрахунок вмісту пігментів у дослідних зразках.....	32
2.6 Методики визначення вмісту білка, глюкози та мікроелементів у дослідних зразках.....	33
Висновки до розділу 2 .....	35
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....	36
3.1 Вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на розвиток пшениці .....	36

3.2 Вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на вміст пігментів у пшениці .....	41
3.3 Вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на вміст білка, глюкози, магнію та калію у пшениці .....	45
Висновки до розділу 3 .....	49
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52
ДОДАТОК А.....	60
ДОДАТОК Б .....	63
ДОДАТОК В .....	67

## ВСТУП

Агробіотехнології відіграють важливу роль у забезпеченні стійкості та продуктивності сільськогосподарських культур в умовах глобальних змін клімату та зростаючої потреби в продовольстві. Одним із напрямків розвитку агробіотехнологій є використання біостимуляторів і наноматеріалів, які здатні покращувати ріст рослин, їхню стійкість до стресових факторів та підвищувати врожайність [1]. Традиційні методи обробки культур часто мають обмежену ефективність при стресових умовах (наприклад, засоленість, посухи, патогенні ураження) через що виникає потреба у нових підходах.

Одним з інноваційних напрямів розвитку агробіотехнологій вважають застосування наноматеріалів [2, 3]. Наночастки (НЧ) різних металів знаходять застосування як нанодобрива, нанопестициди, наногербіциди [3], наносенсори та системи доставки агрохімікатів [4, 5]. Найбільш застосовуваними наноматеріалами є наночастки срібла (AgНЧ). AgНЧ відомі своїми антимікробними властивостями, що дозволяє використовувати їх для захисту рослин від патогенів.

Поряд з наночастками для впливу на різні фізіологічні процеси в рослинах (наприклад, покращення фотосинтезу, стимулювання росту кореневої системи, підвищення стресостійкості в умовах посухи тощо) використовують лактони, наприклад, N-ацилгомосеринлактони (N-АГЛ). Лактони мають широкий спектр біологічної активності, зокрема антибактеріальної, фунгіцидної, вони є інгібіторами амілаз і протеаз, мають регуляторну дію на проростання насіння та ріст рослин.

**Об'єктом дослідження** є процеси формування у пшениці комплексу показників стійкості до несприятливих умов.

**Предмет дослідження** полягає у встановленні впливу наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на ріст пшениці.

Виходячи з вищенаведеного, **мета роботи** полягала у дослідженні впливу наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на ріст сільськогосподарської культури – пшениці.



Для досягнення мети були поставлені наступні **завдання**:

- проаналізувати основні властивості та перспективи застосування наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів в агробіотехнологіях;
- здійснити обробку посівного матеріалу пшениці різними комбінаціями наночасток та N-ацилгомосеринлактонів; отримати паростки пшениці;
- оцінити ефективність обробки наночастками та N-ацилгомосеринлактонами насіння пшениці.

**Методи дослідження.** Для виконання дослідження було використано комплекс традиційних аналітичних та інструментальних методів аналізу, у тому числі спектрофотометричний; для обробки результатів експерименту – методи статистики.

**Наукова новизна роботи** полягає в удосконаленні методів біостимуляції пшениці шляхом комплексного використання наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів.

**Практичне значення роботи** полягає у можливості застосування отриманих результатів для розробки екологічно чистих біостимуляторів у агровиробництві, що сприятиме збільшенню врожайності та якості продукції.

Апробація результатів дослідження здійснювалась через участь у двох науково-практичних конференціях міжнародного рівня.

**Публікації.** За темою кваліфікаційної роботи опубліковано 2 тез та 1 статтю у збірнику наукових праць конференції:

**Лупан К. О., Охмат О. А.** Застосування наночасток в агробіотехнологіях. Наукові основи адаптивного землеробства: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції з нагоди 100-річчя від дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора, академіка Федора Трохимовича Моргуна, 90-річчя Агрономічного факультету Дніпровського державного аграрно-економічного університету та Міжнародного дня здоров'я рослин (16-17 травня 2024 року, м. Дніпро). Дніпро: ДДАЕУ, 2024. С. 328–330. (Додаток А).

Калініченко О. О., **Лупан К. О.**, Резнік Д. І., Юнгін О. С. Визначення ріст-стимулювального потенціалу бактерій, асоційованих з судинними рослинами. *Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні регіонів України* : Матер. II Міжнар. наук.-практ. конф. (ХНТУ, 24–26 квітня 2024 року) у 3-х т. ; Т. 3 / за ред. О. В. Чепелюк. Одеса : Олді+, 2024. С. 61–63. (Додаток Б).

**Лупан К. О.**, Калініченко О. О., Охмат О. А. Застосування інноваційних підходів у сучасних агробіотехнологіях. *Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості* : Зб. наук. праць V Всеукр. конф. Здоб.вищої освіти і молод. Учених (КНУТД, 15 листопада 2024 р.). Київ : КНУТД, 2024. Друк. (Додаток В).

**Структура та обсяг дипломної магістерської роботи.** Кваліфікаційна робота викладена на 52 сторінках основного тексту, містить вступ, три розділи, висновки та список використаної літератури з 67 джерел, 3 додатка.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1 Загальні відомості про наночастки

Наночастки (НЧ) – це частки розміром 1-100 нм, які мають специфічні властивості, що проявляються в залежності від їх розміру та функціональної поверхні [6]. Тобто, будь-яка комбінація атомів із структурним радіусом меншим за 100 нм, може розглядатись як наночастка. Наночастки, поперечні розміри яких менші за 100 нм, а довжина більша за 100 нм, належать до групи двовимірних об'єктів.

Одними з перших об'єктів з унікальними властивостями, які відомі з давніх часів, є наночастки металів й утворені ними нанокластери. Наночастки металів можуть мати біоцидні, електричні, каталітичні та магнітні властивості. Специфічні властивості нанометалів відкривають широкі можливості для їх практичного застосування в багатьох галузях науки та промисловості.

Існує декілька класифікацій наночасток [7–9].

За хімічним походженням розрізняють такі наночастки:

- неорганічні (мінеральні) – металів (Cu, Fe, Mg, Ag, Au), сплавів (Cu-Ta, Cu-V, Cu-W);
- органічні – полімери, біологічні наноструктури (наприклад, ліпосоми), вуглецеві наноматеріали (наприклад, фулерени або нанотрубки);
- мінерально-органічні – металоорганічні (PbS, CdS, ZnS), метал-полімерні структури.

Розрізняють також:

- металеві наночастки – включають наночастки срібла (Ag), золота (Au), платини (Pt), міді (Cu) тощо. Вказані НЧ застосовують в електроніці, медицині та біотехнологіях.
- оксидні наночастки – складаються з оксидів металів, таких як оксид титану (TiO<sub>2</sub>), оксид цинку (ZnO), оксид заліза (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Вказані НЧ застосовують у складі пігментів, сонцезахисних кремів і як каталізатори.

- наночастки на основі вуглецю – наприклад, графен і вуглецеві нанотрубки, що мають унікальні електропровідні та механічні властивості. Вказані НЧ знаходять застосування в електроніці та енергетичних системах.

- полімерні наночастки – синтезують з полімерів і використовують у галузі охорони здоров'я як носії для доставки ліків, у виробництві косметичних засобів та у харчовій промисловості.

- керамічні наночастки – синтезують з нітриду кремнію або оксиду алюмінію, і застосовують у сфері оптики та електроніки [8].

Незалежно від типу наночасток, їх унікальні властивості роблять їх важливими компонентами у різних галузях.

Найбільш складною є класифікація НЧ за геометричною розмірністю, оскільки геометрія значно впливає на властивості наночасток. Розрізняють сферичні, кубічні, стрижнеподібні наночастки, наночастки у формі пластин тощо. Вважають, що оптимальною формою є сферична форма наночасток.

## 1.2 Наночастки срібла

Найбільш застосовуваними наноматеріалами є наночастки срібла (AgНЧ). AgНЧ відомі своїми антимікробними властивостями.

AgНЧ отримують за допомогою хімічних, фізичних та біологічних методів:

### 1. Фізико-хімічні методи [4]:

- хімічне відновлення – найпоширеніший метод, де іони срібла відновлюються до металевого срібла за допомогою відновників, таких як натрій боргідрид або цитрат натрію;

- електрохімічні методи – використовують електричний струм для відновлення срібних іонів з розчину солі срібла;

- методи фізичного осадження – наночастки утворюються за допомогою фізичних процесів, таких як випаровування або напилення срібла.

## 2. Біологічні («зелені») методи:

- біосинтез – цей екологічно чистий метод полягає у використанні живих організмів (бактерій, грибів, дріжджів) або екстрактів з рослин для синтезу наночасток. Цей метод вважають більше перспективним через низку переваг: екологічність, ресурсощадність, відсутність у технології токсичних або агресивних хімічних матеріалів. Біосинтез також дозволяє отримати стабільні та біосумісні наночастки [10].

Наночастки срібла мають широке застосування в різних галузях:

- Медицина. AgНЧ використовують в антибактеріальних засобах, перев'язувальних матеріалах, дезінфікуючих спреях; при створенні антибактеріальних покриттів для медичних приладів та медичного оснащення. Проводяться також численні дослідження по застосуванню AgНЧ для боротьби з резистентними до антибіотиків мікроорганізмами [11,12].

- Сільське господарство. AgНЧ можуть бути використані для стимуляції росту рослин та боротьби з патогенами. Вони також застосовуються як компоненти нанодобрив та наноінсектицидів [10].

- Електроніка. AgНЧ знаходять своє застосування в датчиках, електропровідних чорнилах для друкованих плат та електронних пристроях завдяки їх електропровідним властивостям [13,14].

- Текстильна промисловість. AgНЧ використовують для створення тканин з антибактеріальними властивостями. Такий одяг активно бореться зі збудниками запаху та запобігає розвитку бактерій на поверхні тканин [15].

- Косметична промисловість. AgНЧ використовують у складі кремів і косметичних засобів [16, 17].

Застосування AgНЧ у різних галузях є перспективним. Однак, слід враховувати питання безпеки їх використання, адже надмірне накопичення наночасток у навколишньому середовищі може призвести до небажаних екологічних наслідків.

### 1.3 Методи синтезу наночасток срібла

Хоча деякі наночастки можуть мати природне походження (наприклад, магнетит), більшість із них отримують методом синтезу. Основні з них поділяються на хімічні, фізичні та біологічні методи, кожен з яких має свої переваги та недоліки.

Хімічний синтез є одним з найпоширеніших методів отримання наночасток срібла. Він зазвичай передбачає використання солей срібла (найчастіше нітрату срібла,  $\text{AgNO}_3$ ) як вихідної речовини, яку відновлюють до наночасток за допомогою відновників. Найпоширенішими відновниками при цьому є гідразин, боргідрид натрію та цитрат натрію.

Процес хімічного синтезу зазвичай вимагає суворого контролю температури, рН середовища та концентрації реагентів для отримання стабільних і однорідних за розміром наночасток. Високі концентрації срібла та відновників сприяють утворенню часток різного розміру з нерівномірним розподілом.

Ще одним широко застосовуваним методом є метод солі-гелю, в якому застосовують хімічні реагенти для утворення гелеподібної структури, з якої і виділяють наночастки срібла.

Хімічний синтез наночасток срібла також передбачає використання електрохімічних методів, де наносрібло синтезують в процесі електролізу розчинів, що містять іони срібла. Такий метод дозволяє регулювати розміри та морфологію наночасток завдяки точному контролю над параметрами електролізу, що робить метод зручним для промислового застосування. До хімічних методів слід віднести і синтез у мікроемульсіях, який забезпечує однорідність за розміром і високу стабільність наночасток [14, 18].

Фізичні методи синтезу включають випаровування, конденсацію, використання ультразвуку, плазми, лазера тощо. Наприклад, лазерна абляція з використанням потужного лазера для обробки металевої поверхні; або випаровуванні срібла у вакуумі з подальшим його конденсацією й утворенням наночасток.

Фізичні методи дозволяють отримати дуже чисті наночастки без домішок хімічних речовин, проте ці методи зазвичай дорожчі за хімічні і біологічні та вимагають застосування складного дорого вартісного обладнання [14,18].

До фізичних методів можна віднести також використання імпульсного електричного розряду, який використовують для синтезу наночасток срібла в рідкому середовищі. Такий підхід дозволяє отримати наночастки високої чистоти без необхідності використання хімічних речовин, що забезпечує екологічність процесу [19].

Ще один перспективний фізичний метод – використання плазми. Плазмовий синтез дозволяє отримувати наночастки унікальних форм і розмірів, які можуть мати специфічні властивості для використання в електроніці та каталізі [20].

На сьогодні все більшої популярності набуває біологічний метод синтезу, або так званий «зелений» синтез.

Метод передбачає використання природних біологічних агентів, таких як рослинні екстракти, мікроорганізми (бактерії, дріжджі, гриби), ферменти для відновлення срібних іонів до наночасток. «Зелений» підхід є екологічно безпечним і менш шкідливим для навколишнього середовища, оскільки не потребує використання токсичних відновників або стабілізаторів. «Зелений» синтез дозволяє отримувати наночастки срібла різних розмірів та форм, залежно від умов реакції [6]. Наночастки срібла, синтезовані за допомогою біологічних агентів, часто мають кращу стабільність і меншу схильність до агрегації завдяки природним органічним молекулам, які діють як стабілізатори [21]. Також біосинтез дозволяє отримати наночастки з малими розмірами та вузьким розподілом частинок за розміром, що є важливим для забезпечення їхньої стабільності та ефективності. «Зелений» синтез є більш економічно вигідним, оскільки передбачає використання дешевих відновлювальних ресурсів. Процес «зеленого» синтезу більш простий у реалізації, не вимагає контролю специфічних параметрів (наприклад, глибини вакууму або високої температури), що спрощує виробництво наночасток у промислових умовах [5].

Для реалізації біологічних методів синтезу наночасток срібла широке застосування отримали різноманітні бактеріальні штами, зокрема *Pseudomonas aeruginosa* та *Escherichia coli*, які використовують для екологічно чистого відновлення іонів срібла [22]. У свою чергу, рослинні екстракти, такі як екстракти алое, базиліку, кави та лаванди, також успішно застосовують для синтезу наночасток срібла. Вони не тільки забезпечують відновлення іонів, але й діють як природні стабілізатори, що збільшує стабільність отриманих часток у суспензії [23].

#### **1.4 «Зелений» синтез наночасток срібла з використанням бактерій**

Біосинтез наночасток за допомогою бактерій може відбуватись як внутрішньоклітинно, так і позаклітинно. Позаклітинний синтез є більш простим, оскільки не вимагає складних маніпуляцій з внутрішнім вмістом клітин. У цьому випадку бактерії виділяють ферменти, зокрема редуктазу, що сприяє перетворенню іонів металів у наночастки. Внутрішньоклітинний синтез розпочинається, коли іони металу проникають у клітину переважно через іонні канали. Після чого відбувається відновлення іонів та утворення наночасток металів [5, 24]. Компоненти клітинної стінки мікроорганізмів діють синергічно, допомагаючи ефективно відновлювати іони металів і сприяти утворенню наночасток у природних умовах. У процесі біосинтезу, бактерії використовують ферменти та супутні продукти метаболізму, які і перетворюють іони срібла в наночастки [24, 25]. При цьому клітинні компоненти, такі як протеїни і полісахариди, можуть стабілізувати утворені наночастки, запобігаючи їх агрегації.

Основною перевагою біосинтезу є мультифункціональність синтезованих наночасток. Найбільш поширеними і найбільш використовуваними для біосинтезу наночасток вважають бактерії роду *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Escherichia coli*, *Lactobacillus* та інші [26].

Наночастки срібла, отримані шляхом біосинтезу за допомогою бактерій, знаходять своє застосування у різних галузях, включаючи медицину, екологію



та сільське господарство (агробіотехнології). В агробиотехнологіях наночастки срібла можуть використовувати для стимуляції росту рослин [27], підвищення стійкості до патогенів, а також для контролю якості води і ґрунтів [28].

### **1.5 «Зелений» синтез наночасток срібла з використанням дріжджів**

Біологічно активні компоненти клітин дріжджів можуть не лише відновлювати іони срібла, але й надавати одержаним наночасткам функціональних властивостей, таких як антимікробна активність, адже поверхня дріжджів містить аспарагінову та глутамінову амінокислоти, які при дії світла відновлюють іони срібла до металевого срібла при достатній кількості світла (фотовідновлення) [29–32].

Найбільш дослідженими для синтезу наночасток срібла є дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*. Вони мають ряд унікальних переваг для проведення зеленого синтезу наночасток, а саме: можуть забезпечити стабільність та рівномірний розмір наночасток завдяки високому вмісту біомолекул у клітинних стінках [31]. *Saccharomyces cerevisiae* є безпечними та простими у використанні мікроорганізмами, які не потребують складних умов культивування та адаптації.

У процесі «зеленого» синтезу AgНЧ іони срібла взаємодіють із клітинами дріжджів, що призводить до відновлення іонів і утворення металевих наночасток срібла. Процес біосинтезу включає декілька етапів [33]:

1. Іони срібла сорбуються на поверхні клітинних стінок дріжджів, що мають високу концентрацію функціональних аміно- та карбоксильних груп.

2. Ферментативні системи дріжджів, включаючи різні відновлювальні ферменти та білки, каталізують процес перетворення іонів срібла у наночастки срібла.

3. Утворені наночастки стабілізуються завдяки присутності природних біомолекул (білків, ліпідів) на поверхні дріжджових клітин, що запобігає агрегації наночасток [34].

Основними перевагами використання дріжджів у синтезі AgНЧ є зниження токсичного впливу на навколишнє середовище, мінімізація вартості виробництва та спрощення процесу, оскільки синтез не вимагає високих температур чи застосування агресивних хімічних реагентів. Крім того, наночастки срібла, отримані з використанням *Saccharomyces cerevisiae*, можуть знайти застосування в сільському господарстві для захисту рослин від патогенів завдяки своїм антимікробним властивостям, а також у медицині та промисловості завдяки їхній високій стабільності та функціональності [35].

### **1.6 Властивості наночасток срібла та їх вплив на рослини**

Наночастки срібла мають значний вплив на рослини, завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям.

AgНЧ у низьких концентраціях можуть стимулювати ріст рослин, підвищуючи їх біометричні показники, такі як довжина пагонів і коренів, кількість пагонів, а також загальна біомаса. Це пояснюється активацією наночастками певних метаболічних процесів, що сприяють більш ефективному засвоєнню поживних речовин і стимуляції клітинного поділу [4, 36].

Дослідженнями встановлено, що AgНЧ можуть збільшувати вміст сухої маси пшениці та прискорювати ріст її кореневої системи, що є важливим фактором для підвищення урожайності рослин.

Однією з основних властивостей AgНЧ є їх здатність боротися з патогенними мікроорганізмами, що шкодять рослинам. AgНЧ можуть знищувати бактерії та гриби на поверхні рослин та в ґрунті, тим самим знижуючи ризик зараження пшениці патогенами та підвищуючи її стійкість до хвороб [10, 21]. Все вище перелічене впливає на підвищення врожайності пшениці в умовах несприятливих факторів навколишнього середовища.

Також AgНЧ здатні стимулювати фотосинтетичну активність рослин, підвищуючи вміст хлорофілу в клітинах, покращувати здатність пшениці до фотосинтезу, збільшуючи виробництво органічної речовини та енергії для росту. У дослідженнях виявлено, що AgНЧ підвищують вміст хлорофілу а та b

[27], що сприяє поліпшенню ефективності фотосинтезу і стійкості рослин до стресу.

Але слід зауважити, що у високих концентраціях AgНЧ можуть викликати окислювальний стрес у пшениці, що призводить до накопичення активних форм кисню (ROS) у клітинах рослин [37]. Це може призвести до пошкодження клітинних мембран, протеїнів і ДНК, що в результаті негативно впливає на ріст і розвиток пшениці. Високі концентрації AgНЧ можуть також знижувати вміст пігментів і порушувати метаболічні процеси, зокрема фотосинтез. AgНЧ можуть впливати на метаболізм пшениці, зокрема на концентрацію білків, глюкози, магнію та калію в тканинах.

### **1.7 Лактони та N-ацилгомосеринлактони в агробіотехнологіях**

Лактони за своєю природою є органічними сполуками, внутрішньо молекулярними циклічними складними ефірами оксикарбонових кислот. В агробіотехнологіях лактони застосовують як біостимулятори, які відіграють важливу роль у покращенні стійкості рослин до стресових умов, таких як засуха, солоність ґрунту та інші негативні фактори довкілля.

Лактони діють на первинний і вторинний метаболізм рослин, допомагаючи оптимізувати їх ріст і продуктивність за стресових умов. Зокрема, біостимулятори, що містять лактони, можуть модифікувати фізіологічні процеси, підвищуючи активність антиоксидантних систем, і таким чином поліпшувати витривалість рослин до несприятливих умов [38].

N-ацилгомосеринлактони (N-АГЛ) – сигнальні молекули, що беруть участь у регуляції процесу «*quorum sensing*» у багатьох грамнегативних бактерій [39]. Вони є основним компонентом механізму, за допомогою якого бактерії спілкуються між собою. N-АГЛ синтезуються бактеріями та виділяються у середовище, а коли їх концентрація досягає певного порогу, вони запускають регуляцію експресії генів, що впливає на біоломінесценцію, утворення біоплівки, вироблення вірулентних факторів та багато інших процесів.

Структура N-АГЛ складається з гомосерин-лактонного кільця, з'єднаного з ацильним ланцюгом [40]. Довжина та насиченість ацильного ланцюга може варіюватися, що визначає специфічність сполуки для певних бактеріальних видів або штамів. N-АГЛ відіграють важливу роль у взаємодії між мікроорганізмами та рослинами. В агробіотехнологіях вони використовуються для впливу на мікробні популяції, які колонізують кореневі системи рослин. N-АГЛ можуть стимулювати ріст у ризосфері рослин корисних бактерій *Azospirillum* та *Rhizobium*, які сприяють поглинанню поживних речовин та захисту рослини від патогенів [41]. Також можна говорити про здатність цих молекул впливати на ріст рослин напряму, наприклад, через стимуляцію кореневої системи [38].

Бактеріальні сигнальні молекули можуть впливати на активацію різних захисних механізмів у рослинах або стимулювати їх ріст. Наприклад, дослідження показали, що певні N-АГЛ можуть сприяти збільшенню довжини коренів, утворенню додаткових корневих волосків, покращувати стійкість рослин до стресів, таких як засуха чи сольова інтоксикація [42]. Бактерії, які продукують ці молекули, часто асоціюються з пшеницею та іншими зерновими культурами, вони можуть бути використані для поліпшення агрономічних характеристик культури.

N-АГЛ можуть підвищувати ефективність симбіотичних відносин між рослинами та корисними мікроорганізмами, сприяючи покращенню поглинання поживних речовин та захисту від патогенних організмів [41]. Застосування таких бактерій може підвищити врожайність пшениці та покращити її стійкість до стресових умов [42].

### **1.8 Методи синтезу лактонів**

Синтез лактонів передбачає застосування методів: біологічного, фізичного, хімічного.

Біологічний («зелений») синтез лактонів передбачає використання природних та відновлюваних матеріалів [43,44].

Лактони можуть бути синтезовані з біомаси рослин (фітосинтез). Для фітосинтезу лактонів часто використовують цитрусові, рослини з родини айстрових, бобових тощо. Наприклад, арніку (*Arnica montana*), полин звичайний (*Artemisia absinthium*), соняшник (*Helianthus annuus*), гарпагофітум (*Harpagophytum procumbens*) [44].

Біологічний синтез за участю мікроорганізмів здійснюється через ферментативні шляхи. Бактерії або гриби можуть виробляти різні лактони, використовуючи ферменти, такі як лактон-синтази [43]. Іншим дієвим підходом є ферментативне перетворення ліпідів – деякі ензими, такі як лактази та естерази, каталізують окиснення жирних кислот до лактонів. Ферменти мають високу специфічність та ефективність, що робить їх зручними для синтезу різних типів лактонів.

Фізичні методи синтезу лактонів використовують для прискорення реакцій або покращення умов синтезу. Хоча ці методи є менш поширеними, вони демонструють інноваційні можливості. Одним з методів є ультразвукова активація, де ультразвукові хвилі стимулюють циклізацію органічних молекул, зменшуючи час реакції та підвищуючи її ефективність. Ще один приклад фізичного методу – мікрохвильовий синтез, де струм високої частоти прискорює утворення лактонів, особливо у реакціях з органічними кислотами або їх похідними. Також до фізичних відносять плазмохімічний метод, який використовує холодну плазму для ініціювання хімічних реакцій. Він може застосовуватись для синтезу специфічних лактонових сполук, хоча через складність процесу та потребу в спеціалізованому обладнанні метод не використовується в промислових масштабах [45].

Електрохімічний синтез, ще один цікавий метод, який полягає у використанні електрохімічних сполук для ініціювання циклізації органічних сполук. Цей метод дозволяє ретельно контролювати умови реакції, що підвищує його точність і стабільність продуктів [46].

Найпоширенішим синтезом для отримання лактонів наразі є хімічний метод. Такий метод синтезу передбачає утворення циклічних ефірів шляхом взаємодії карбоксильних і гідроксильних груп.

Існує кілька видів хімічного синтезу.

Лактонізація – класичний метод утворення лактонів, де утворюється циклічний ефір, шляхом взаємодії гідроксильної та карбоксильної груп [47]. В окремих випадках для здійснення методу лактонізації використовують каталізатори для прискорення реакції, такі як кислоти Льюїса, сульфатну кислоту або протонні каталізатори. Для селективної лактонізації використовують захисні групи, які дозволяють керувати реакційною здатністю функціональних груп. Розрізняють ще метод окиснення Баєра-Віллігерова [48]. Метод полягає в окисненні кетонів за допомогою пероксидів з подальшим утворенням лактонів. Спочатку пероксид взаємодіє з карбонільною групою кетону, після чого атом кисню вбудовується в карбонільний зв'язок, утворюючи лактон.

Метод карбонілювання алкенів полягає в реакції алкенів з окислювальними агентами та моно оксидом вуглецю для утворення лактонів. Карбонілювання дозволяє отримувати лактони з різними довжинами ланцюга. Зазвичай для цієї реакції використовують металеві комплекси, як каталізатори.

Також є метод синтезу лактонів з альдегідних або кетонних сполук [49]. Сполуки піддаються окисненню або циклізації з наступним утворенням лактонів.

### **1.9 Оцінка можливості використання наночасток срібла та лактонів в агробіотехнологіях**

Наночастки та лактони стають важливими інструментами в агробіотехнології завдяки своїм унікальним хімічним і біологічним властивостям. Вони мають значний потенціал для підвищення врожайності сільськогосподарських культур, поліпшення стійкості рослин до стресових факторів або патогенів, зниження потреби у хімічних пестицидах [50–54].

Однією з найбільш вивчених властивостей наночастинок срібла є їхня здатність діяти як антимікробні агенти, знищуючи широкий спектр патогенів (бактерії, гриби, віруси) [53]. Застосування наночастинок срібла дозволяє зменшити потребу в хімічних пестицидах, що має екологічні переваги та знижує хімічне навантаження на ґрунт та навколишнє середовище. Вони можуть модулювати метаболічні процеси рослин, активуючи антиоксидантні системи, що сприяє зниженню стресового навантаження на рослини в умовах екологічних викликів. Крім того наночастки срібла сприяють поліпшенню фотосинтетичної активності за рахунок підвищення вмісту хлорофілу в клітинах. Це веде до збільшення продуктивності рослин та підвищення їхньої стійкості до факторів навколишнього середовища.

Лактони, є природними біорегуляторами, які можуть покращувати ріст і розвиток рослин. Вони здатні впливати на фізіологічні та біохімічні процеси в рослинах, включаючи регулювання гормональних шляхів, активацію антиоксидантних систем і стимуляцію росту [53].

Вочевидь, лактони можуть працювати у синергії з наночастиками срібла, підвищуючи їх ефективність. Останні дослідження показують, що комбінації наночастинок срібла з лактонами при обробці насіння сільськогосподарських культур, сприяє розвитку пагонів і кореневої системи, підвищенню вмісту хлорофілу та каротиноїдів.

## **Висновки до розділу 1**

Лактони та наночастки срібла знаходять широке застосування в агробіотехнологіях завдяки своїм унікальним властивостям, спрямованим на покращення врожайності сільськогосподарських культур, стійкість рослин до стресів, а також боротьбу з патогенами. Вказані матеріали застосовують в агробіотехнологіях як природні біостимулятори, які здатні підвищувати ефективність засвоєння поживних речовин, активувати фотосинтез, впливати на продуктивність, а також виступати в ролі антиоксидантів.

Зважаючи на вищесказане, цікавим буде вивчення поєднання наночасток срібла, відомих своїми антимікробними властивостями, та лактонів, які відрізняються широким спектром біологічної активності та мають регуляторну дію на проростання насіння та ріст рослин.



## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТ, МЕТА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є процеси формування у пшениці комплексу показників стійкості до несприятливих умов.

Мета роботи полягала у дослідженні впливу наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на ріст сільськогосподарської культури – пшениці.

Як модельний об'єкт в дослідженні використано озиму пшеницю сорту Подолянка (різновид лютесценс). Сорт отриманий в Інституті фізіології рослин і генетики НАН Миронівському інституті пшениці ім. В. М. Ремесла НААНУ. Сорт Подолянка є середньораннім сортом інтенсивного типу, універсальним, стійким до посухи та вилягання.

#### 2.1 Характеристика наночасток срібла

Для реалізації наукової роботи використано наночастки срібла, синтезовані методом «зеленого» синтезу за допомогою дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* Y-1995.

Для синтезу наночасток культура дріжджів була вирощена на середовищі Сабуро, для приготування якого було взято декстрозу 40 г/л, бактеріологічний агар 15 г/л, суміш пептичного перевару м'яса та підшлункової залози гідролізату казеїну (1:1) 10 г/л, картопляно-декстрозний агар. Культуру дріжджів вирощувались упродовж 48 годин за температури 28 °С та частоті обертання в орбітальному шейкері 130 об/хв. Накопичення біомаси контролювали спектрофотометричним методом. Після накопичення достатньої кількості дріжджових клітин, відділили біомасу від поживного середовища центрифугуванням на швидкості 3000 об/хв. упродовж 15 хвилин. До преципітату, отриманого після центрифугування, додавали 100 мМ розчину нітрату срібла.

«Зелений» синтез наночасток срібла здійснювали упродовж 4 діб в орбітальному шейкері за умов: 180 об/хв., 28 °С, рН 7. Щоб запобігти

потраплянню великих агрегатів і частин клітин у завис, знову здійснювали центрифугування на швидкості 3000 об/хв. упродовж 15 хвилин. Після чого проводили фільтрування через фільтр з розміром пор 0,22 мкм.

Для визначення розміру синтезованих наночасток срібла було застосовано метод динамічного розсіювання світла (Dynamic Light Scattering, DLS) [55], в якому броунівський рух частинок або молекул в середовищі викликає коливання інтенсивності розсіяного лазерного світла різного ступеня. На основі цього вимірюється гідродинамічний діаметр частинок, який є середнім розміром частинок у суспензії. Z-average є середнім гідродинамічним діаметром, що враховує вагу частинок, цей параметр розраховується методом комулянтів. Метод комулянтів використовується в динамічному розсіюванні світла (DLS) для аналізу розподілу розмірів частинок у зразку. Це статистичний підхід, який дозволяє обчислити середній розмір частинок (Z-average) та їх полідисперсність (Polydispersity Index, PdI), яка вираховується на основі статистичного розподілу розмірів частинок у зразку [56]. PdI є співвідношенням середнього квадрату відхилення розмірів частинок до квадрату середнього розміру частинок. Цей показник часто використовується в аналізі даних, отриманих методом динамічного розсіювання світла (DLS). Метод заснований на аналізі автокореляційної функції інтенсивності розсіяного світла. Інтерквартильний розкид показує різницю між верхнім і нижнім квартилями розподілу розмірів. Інтерквартильний розкид дає уявлення про варіативність і розкид розмірів частинок у зразку, що є корисним для оцінки однорідності або полідисперсності зразка. Метод комулянтів є популярним, оскільки він забезпечує простий і надійний спосіб отримання середнього розміру частинок і оцінки їхньої полідисперсності з даних DLS. Він не потребує припущень щодо форми розподілу розмірів частинок і тому є універсальним для аналізу різних зразків. Однак варто зазначити, що метод найбільш ефективний для монодисперсних або близько до монодисперсних зразків і може не відображати складні розподіли [57].

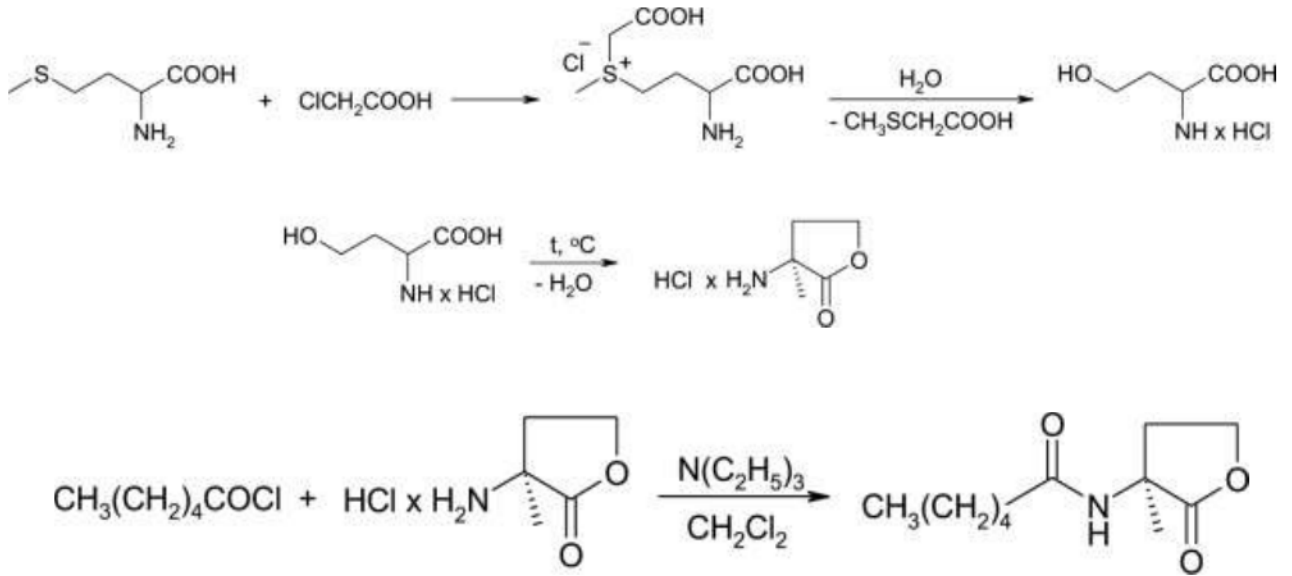
Двовимірний розмір синтезованих AgНЧ, який був визначений методом динамічного розсіювання світла (DLS), становить 168,6 нм з інтерквартильним розкидом [164,4; 171,6]. Це означає, що AgНЧ мають відносно вузький розподіл за розміром, що є важливим для їх стабільності та потенційного застосування. Z-average (середній гідродинамічний діаметр) становить 121,4 нм з інтерквартильним розкидом [120,7; 122,5]. Цей параметр вказує на середній розмір частинок у зваженій популяції, і його значення менше, ніж розмір основної популяції, що може свідчити про наявність декількох популяцій частинок. Полідисперсність (PdI) дорівнювала 0,38 [0,37; 0,38], що свідчить про помірний рівень гетерогенності в розмірах наночасток. Значення PdI менше 0,1 вказує на високу однорідність, більше 0,7 – на значну гетерогенність. Отже, ваші наночастки мають середню гетерогенність, що є прийнятним для більшості біологічних застосувань. Початкова концентрація солі срібла, а саме AgNO<sub>3</sub>, становила 100 мМ. Це досить висока концентрація, яка, ймовірно, сприяла утворенню наночасток. Значення піку плазмонного резонансу при 432,8 нм є типовим для наночасток срібла. Це свідчить про те, що наночастки сформовані правильно, і вони мають властивості, характерні для срібних наночасток [58]. Аналізуючи результати, синтезовані наночастки срібла мають середній розмір приблизно 168,6 нм, з помірною гетерогенністю та характерним плазмонним резонансом.

## **2.2 Характеристика N-ацилгомосеринлактонів**

В дослідженні також використано N-ацилгомосеринлактони (N-АГЛ), які відносять до класу молекул медіаторів бактеріального походження.

Молекули N-гексаноїл- (C6) та N-октаноїл- (C8) гомосеринлактони (L та DL ізомери) отримані методом органічного синтезу в Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України [60].

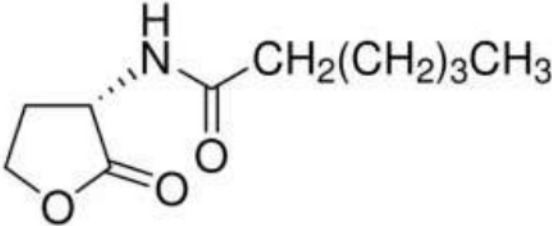
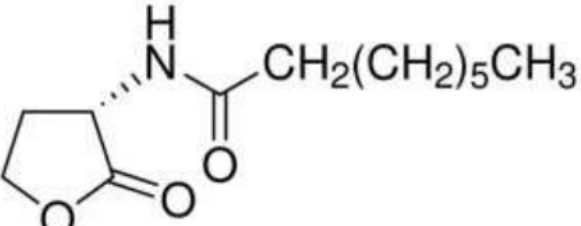
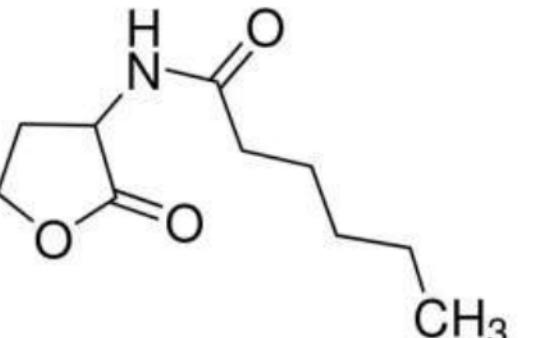
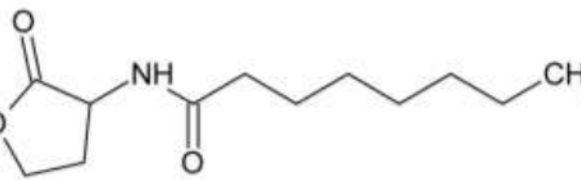
Технологія хімічного синтезу передбачала отримання на першій стадії L-гомосеринлактону гідрохлориду, а на другій стадії застосовуваного лактону (наприклад, N-гексаноїл-L-гомосерин лактону) [60]:



В дослідженні використано два види ізомерів N-АГЛ, а саме –L та –DL форми (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

### Структура застосованих у дослідженні N-ацилгомосеринлактонів

N-гексаноїлгомосеринлактон	N-октаноїлгомосеринлактон
<b>N-Hexanoyl-L-homoserine lactone</b>	<b>N-Octanoyl-L-homoserine lactone</b>
	
<b>N-Hexanoyl-DL-homoserine lactone</b>	<b>N-Octanoyl-DL-homoserine lactone</b>
	

### 2.3 Формування дослідних груп, методика обробки насіння, вирощування проростків пшениці

Для експерименту сформовано 15 дослідних груп, включаючи контрольну дослідну групу.

Експериментальні дослідження передбачали обробку модельного об'єкта різними комбінаціями дослідних матеріалів. Дослідні групи обробляли:

- індивідуально N-ацилгомосеринлактонами (L6, DL6, L8, DL8);
- індивідуально наночастками срібла (AgНЧ) або нітратом срібла ( $\text{AgNO}_3$ );
- комбінацією нітрату срібла з N-ацилгомосеринлактонами ( $\text{AgNO}_3$ +L6,  $\text{AgNO}_3$ +DL6,  $\text{AgNO}_3$ +L8,  $\text{AgNO}_3$ +DL8);
- комбінацією AgНЧ з N-АГЛ (AgНЧ+L6, AgНЧ+DL6, AgНЧ+L8, AgНЧ+DL8).

На початку експерименту насіння пшениці очищували у кілька етапів [61]. На першому етапі здійснювали промиванням насіння в мильному розчині для видалення будь-яких зовнішніх забруднень. Промите насіння розклали по марлевим мішечкам, які помістили в 70 % розчин етанолу на 1-2 хвилини. Після стерилізації у етанолі мішечки стерильним пінцетом було перенесено у 5 % розчин гіпохлориду натрію на 10–15 хвилин. Після обробки мішечки з насінням промивали в дистильованій воді при перемішування упродовж 10 хв. з трьома змінами води.

Після очищення насіння з мішечків було стерильно перенесене на чашки Петрі (рис. 2.1), які містили розчини відповідно до плану дослідження. Насіння у чашках Петрі витримували у термостаті за температури  $25 \pm 1$  °С.

Після витримування у термостаті, насіння висаджували у гумус (рис. 2.2). Вирощування упродовж 14 днів здійснювали у контрольованому середовищі термостату за температури 22 °С, при вологості 60 % та циклом освітлення – 16 годин світла / 8 годин темряви.

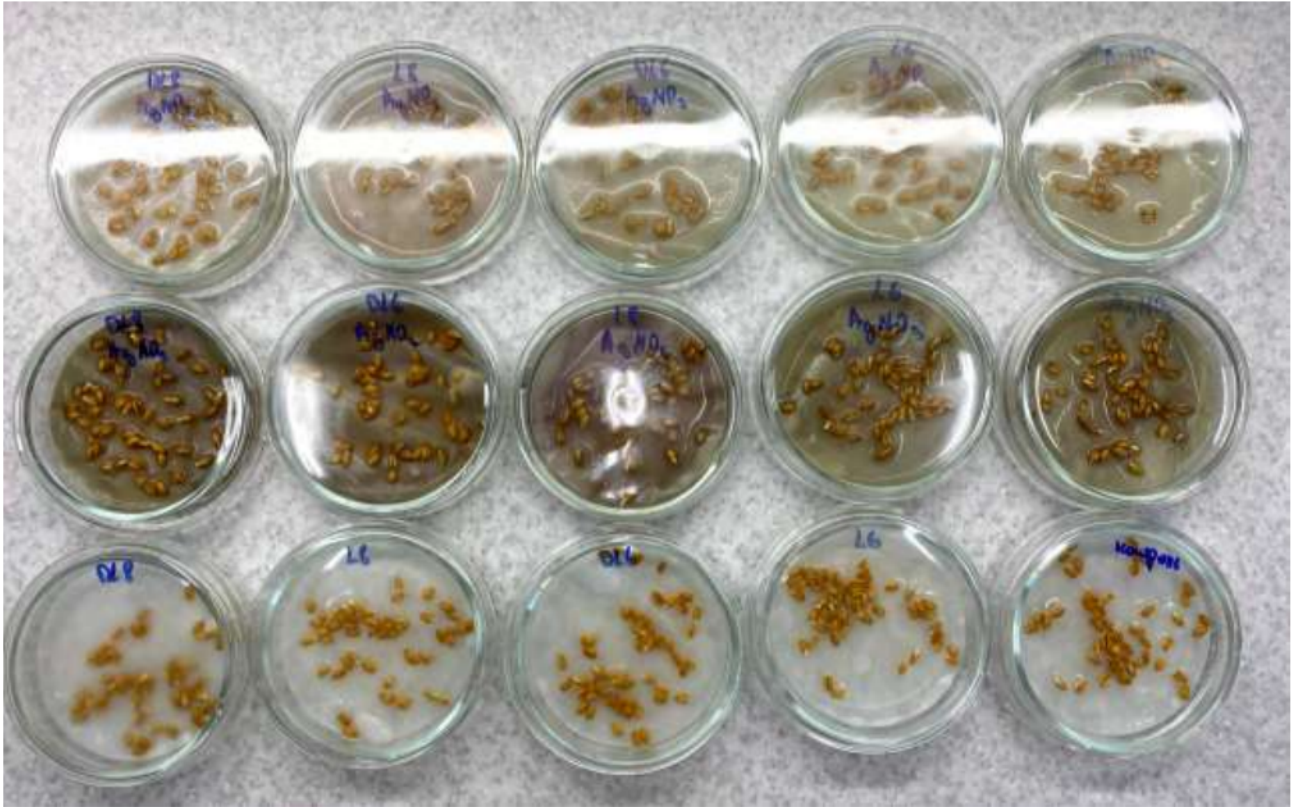


Рисунок 2.1 – Оброблене насіння пшениці 15 дослідних варіантів



Рисунок 2.2 – Посадка обробленого насіння пшениці

Отримані через 14 днів вирощування паростки пшениці (рис. 2.3) обережно викопували, промивали від залишків гумусу та проводили вимірювання довжини пагонів та кореневої системи. При цьому, пагони вимірювали від основи стебла до верхівки, коріння – від основи кореневої шийки до найдовшого кореня.



Рисунок 2.3 – Паростки пшениці через 14 днів вирощування

#### **2.4 Спектрофотометричне визначення концентрації пігментів у дослідних зразках**

Для здійснення спектрофотометричних досліджень отримували витяжку з дослідних зразків. Для цього до наважки рослинного матеріалу, який попередньо розтирали у порцеляновій ступці, додавали 96 % спирт.

Після гомогенізації матеріал фільтрували через фільтрувальний папір та проводили подвійну екстракцію з додаванням спирту до утворення безбарвної краплі.

Для визначення вмісту у дослідних зразках каротиноїдів, хлорофілу а та хлорофілу b в дослідженні використали спектрофотометричне вимірювання за довжини хвиль, нм: 441, 649, 654 та 665 [61].

## 2.5 Розрахунок вмісту пігментів у дослідних зразках

На першому етапі розраховано загальну кількість концентрації хлорофілу за формулою [61]:

$$C_a + C_b = 25,10 \times E_{654} \quad (2.1)$$

де:  $C_a + C_b$  – концентрація хлорофілів а та b, мг/л;

$E_{654}$  – оптична густина екстракту за довжини хвилі 654 нм, одиниці оптичної густини.

На другому етапі визначаємо кількість хлорофілів а і b:

$$C_a = 13,10 \times E_{665} - 5,76 \times E_{649} \quad (2.2)$$

$$C_b = 25,80 \times E_{649} - 7,60 \times E_{665} \quad (2.3)$$

де:  $C_a$  – концентрація хлорофілу а, мг/л;

$C_b$  – концентрація хлорофілу b, мг/л;

$E_{665}$  – оптична густина екстракту за довжини хвилі 665 нм, одиниці оптичної густини;

$E_{649}$  – оптична густина екстракту за довжини хвилі 649 нм, одиниці оптичної густини.

На третьому етапі визначаємо вміст каротиноїдів:

$$C_{\text{кар}} = 4,695 \times E_{441} - 0,268 \times (C_a + C_b) \quad (2.4)$$

де:  $C_a + C_b$  – концентрація хлорофілів а та b, мг/л;

$E_{441}$  – оптична густина екстракту за довжини хвилі 441 нм, одиниці оптичної густини;



Після встановлення концентрації пігментів, розраховуємо їх кількісний вміст (мг/г) за формулою:

$$\bar{X} = (V_{\text{ек.}} \times C_{\text{пігм.}}) / (1000 \times m_{\text{нав.}}) \quad (2.5)$$

де:  $V_{\text{ек.}}$  – об'єм спиртової витяжки, мл;

$C_{\text{пігм.}}$  – концентрація пігменту у спиртовій витяжці, мг/л;

$m_{\text{нав.}}$  – маса наважки сировини, г.

## 2.6 Методики визначення вмісту білка, глюкози та мікроелементів у дослідних зразках

Для визначення **вмісту білка** у дослідних зразках використано метод Бредфорда [62]. Для цього було приготовано робочий барвник, який складався з суміші Кумасі: етанол з фосфорною кислотою та синій G-250. Потім суміш була розбавлена водою. Підготовлено серію стандартних розчинів білка шляхом використання сироваткового альбуміну як стандарту. Відповідно, була створена градуйована шкала концентрацій. У приготівані для дослідження розчини додали рівні об'єми білкових стандартів, зразків і розчину барвника. Після змішування, суміші витримували упродовж 5-10 хвилин за кімнатної температури для повного зв'язування барвника з білком. Зразки досліджували на спектрофотометрі за довжини хвилі 595 нм. Інтенсивність забарвлення при цьому була прямо пропорційна концентрації білка в зразку [63].

Для визначення **вмісту глюкози** у дослідних зразках використовували глюкозо-оксидазний метод, що базується на ферментативній реакції з перетворенням глюкози на глюконову кислоту і утворенням пероксиду водню. Перекис водню у свою чергу реагує з хромогеном під дією пероксидази, що призводить до утворення забарвленого продукту, інтенсивність якого можна досліджувати спектрофотометрично. Для проведення аналізу паростки були підсушені, подрібнені та екстраговані буферним розчином. Екстракт піддавали центрифугуванню для відділення твердих частинок. До екстракту додавався

реагент з пероксидазою та глюкозо-оксидазою. Отримані зразки досліджували на спектрофотометрі за довжини хвилі 540 нм.

Для визначення **вмісту мікроелементів** паростки та кореневу систему дослідних зразків висушували за температури 105 °С до постійної ваги. Висушені зразки поміщали у порцелянових тиглях у холодну муфельну піч, температуру в якій поступово доводили до 580–600 °С. Головна мета процесу спалювання – видалення органічних компонентів з дослідних зразків та отримання маси мінеральних речовин. Мінеральний залишок при цьому містить макро- та мікроелементи, наприклад такі як калій (K) та магній (Mg). Після спалювання здійснювали підготовку золи до подальшого хімічного аналізу. Для цього золу розчиняли у концентрованій азотній кислоті, після чого проводили вимірювання, використовуючи метод атомно-абсорбційної спектроскопії (ААС) [65]. Цей метод ґрунтується на можливості поглинання елементів світла певної довжини хвилі атомами. Після вимірювання проводили розрахунок кількісного вмісту магнію та калію у дослідних зразках за формулою [61], мг/г:

$$\text{Кількісний вміст елемента} = \frac{\text{Концентрація ел.} \left(\frac{\text{мг}}{\text{л}}\right) \times \text{Об'єм розчину (л)}}{\text{Маса зразку (г)}} \quad (2.6).$$

## **Висновки до розділу 2**

Для проведення експерименту запропоновано використання методик, які є стандартними в сфері фізіології рослин, і відрізняються високою ефективністю для вивчення впливу різних біологічно активних речовин на ріст та розвиток рослин.

Вимірювання довжини пагонів і коренів проростків дозволяє оцінити морфологічні зміни, які виникають у результаті впливу досліджуваних сполук. Оцінка вмісту пігментів, таких як хлорофіл, є важливим показником фотосинтетичної активності рослин. Дослідження біохімічних показників дослідних зразків також невід'ємною частиною оцінки метаболічних змін, спричинених впливом лактонів та наночасток срібла. Ефективність використаних методик підтверджується численними дослідженнями в агробіотехнологічній сфері, що робить їх актуальними для подальших експериментів та вдосконалення агротехнологій.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

#### **3.1 Вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на розвиток пшениці**

Після вирощування упродовж 14 діб здійснено візуальний аналіз та визначено розміри пагонів (табл. 3.1) та коренів (табл. 3.2) пшениці всіх дослідних груп.

Отримані результати свідчать, що кожна дослідна група показала різну середню довжину пагонів. Контрольна група має середню довжину пагонів 22,06 мм зі стандартним відхиленням 3,15 мм. Це означає, що більшість значень знаходяться в межах  $\pm 3.15$  мм від середньої, це свідчить про відносно низьку варіативність. Групи з обробкою  $\text{AgNO}_3$  показують середню довжину пагонів 18,61 мм і стандартне відхилення 5,59 мм. Ця група має більшу варіативність, що можна пояснити індивідуальними реакціями рослин на обробку сріблом.

Група з обробкою  $\text{AgHЧ}$  має середню довжину пагонів 19,88 мм, стандартне відхилення 7,13 мм. Варіативність у цій групі вказує на те, що наночастки срібла мають як позитивний, так і негативний вплив на пшеницю, що вказує на важливість уточнення дозування наночасток срібла.

Інші групи, наприклад,  $\text{AgHЧ}$  з L8 мають найвищі показники, їх середня довжина 26,44 мм та менше стандартне відхилення 3,07 мм, що свідчить про стабільніший і позитивний ефект цієї обробки на ріст пагонів.

За однофакторним дисперсійним аналізом (ANOVA), статистика  $F = 4,66$  показує, що різниця між групами є значущою [65]. Це значення порівнює варіацію між середніми значеннями груп з внутрішньогруповою варіацією.  $P\text{-value} = 1,93\text{e-}07$ , що менше 0,05, вказує на те, що різниця в середніх значеннях довжини пагонів між групами не випадкова. Це дуже низьке значення означає, що різниця між групами є статистично значущою з великою впевненістю. Отже, різні обробки з  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{AgHЧ}$ , лактони та їхні комбінації, мають суттєвий вплив на ріст пагонів пшениці. Найбільший позитивний ефект на ріст пагонів спостерігається у групах, де рослини були оброблені наночастками срібла разом із лактонами (наприклад,  $\text{AgHЧ}$  з L8).

Таблиця 3.1

## Результати вимірювання довжини пагонів пшениці

Розмір пагонів пшениці, мм																
Контроль	25,00	22,00	24,50	26,00	18,50	21,50	16,50	22,50	25,00	22,00	24,50	26,00	18,50	21,50	16,50	22,50
AgNO <sub>3</sub>	26,00	16,50	17,50	25,40	21,50	19,00	8,50	14,50	26,00	16,50	17,50	25,40	21,50	19,00	8,50	14,50
AgNPs	8,50	24,50	25,00	11,00	19,50	24,50	16,50	29,50	8,50	24,50	25,00	11,00	19,50	24,50	16,50	29,50
L6	14,50	23,50	15,50	18,50	19,00	25,50	17,50	23,00	14,50	23,50	15,50	18,50	19,00	25,50	17,50	23,00
L8	22,00	22,50	26,50	29,00	9,50	21,00	26,50	25,50	22,00	22,50	26,50	29,00	9,50	21,00	26,50	25,50
DL6	17,50	13,50	7,00	28,00	24,50	5,50	23,00	12,50	17,50	13,50	7,00	28,00	24,50	5,50	23,00	12,50
DL8	4,50	8,00	22,00	21,00	27,50	11,00	15,00	26,00	4,50	8,00	22,00	21,00	27,50	11,00	15,00	26,00
AgNO <sub>3</sub> +L6	24,50	27,50	16,50	18,50	23,50	24,50	19,50	14,00	24,50	27,50	16,50	18,50	23,50	24,50	19,50	14,00
AgNO <sub>3</sub> +L8	22,00	25,00	6,00	26,00	20,00	6,00	25,00	23,50	22,00	25,00	6,00	26,00	20,00	6,00	25,00	23,50
AgNO <sub>3</sub> +DL6	16,00	29,00	25,50	23,00	11,50	24,00	23,00	32,50	16,00	29,00	25,50	23,00	11,50	24,00	23,00	32,50
AgNO <sub>3</sub> +DL8	23,00	24,50	26,00	21,00	18,50	7,50	15,50	25,50	23,00	24,50	26,00	21,00	18,50	7,50	15,50	25,50
AgHЧ +L6	28,50	23,50	29,50	25,50	18,50	22,50	23,50	29,00	28,50	23,50	29,50	25,50	18,50	22,50	23,50	29,00
AgHЧ +L8	25,00	29,00	22,50	24,50	27,50	23,00	31,50	28,50	25,00	29,00	22,50	24,50	27,50	23,00	31,50	28,50
AgHЧ +DL6	27,50	23,50	29,00	25,00	21,00	27,50	26,00	27,50	27,50	23,50	29,00	25,00	21,00	27,50	26,00	27,50
AgHЧ +DL8	20,50	20,50	21,50	24,50	19,50	24,00	14,50	19,00	20,50	20,50	21,50	24,50	19,50	24,00	14,50	19,00

Результати вимірювання довжини коренів пшениці після 14 діб (табл. 3.2) свідчать, що середнє значення вимірюваного показника у контрольній групі становить 12,69 мм, а відхилення – 5,33 мм, що вказує варіативність у цій групі є помірною.

Групи з обробкою  $\text{AgNO}_3$  мають трохи нижчу довжину корінців порівняно з контролем 12,25 мм, їхнє стандартне відхилення дорівнює 3,31 мм, що вказує на більшу стабільність результатів.

Результати груп з обробкою наночастками срібла, показують зниження середнього показника довжини корінців 11,94 мм порівняно з контролем та стандартне відхилення 4,08 мм. Групи з обробкою лактонами L6 та L8 дають вищі середні результати 15,94 мм та 16,94 мм відповідно, що свідчить про стимуляцію росту кореневої системи, та стандартне відхилення 5,04 мм та 4,32 мм, що свідчить про більш різноманітні реакції рослин на ці обробки. Групи комбінацій з лактонами DL6 і DL8 демонструють більш неоднорідні результати. Лактони DL6 трохи знижують середнє значення до 12,44 мм та 6,84 мм стандартного відхилення, що свідчить про значну варіативність у відповідях рослин. Тоді як лактони DL8 мають схожу середню довжину корінців з контролем 11,56 мм.

За однофакторним дисперсійним аналізом (ANOVA), статистика  $F = 3,09$  показує, що різниця між групами є більшою за випадкову варіативність, але не є очевидною. Це значення порівнює варіацію між середніми значеннями груп з внутрішньогруповою варіацією.  $P\text{-value} = 0,0002$ , що значно менше 0,05, вказує на те, що різниця в середніх значеннях довжини пагонів між групами не випадкова. Отже, лактони L6 та L8 продемонстрували позитивний вплив на ріст коренів, що видно зі збільшення середньої довжини, обробка  $\text{AgNO}_3$  та  $\text{AgHCl}$  дещо пригнічує ріст кореневої системи у порівнянні з контрольними зразками, а комбінації з DL6 та DL8 дали неоднорідні результати з вищим рівнем варіативності, що вказує на індивідуальні реакції рослин.

Таблиця 3.2

**Результати вимірювання довжини коренів пшениці**

Розмір корінців пшениці, мм

Контроль	17,00	22,50	6,50	8,50	6,00	12,00	12,00	11,50	17,00	22,50	6,50	8,50	6,00	12,00	12,00	11,50
AgNO <sub>3</sub>	12,00	12,00	17,00	13,50	14,00	16,50	7,00	12,00	12,00	12,00	17,00	13,50	14,00	16,50	7,00	12,00
AgNPs	4,00	13,50	13,50	10,00	12,00	16,00	8,00	14,00	4,00	13,50	13,50	10,00	12,00	16,00	8,00	14,00
L6	13,00	22,00	10,00	15,50	11,00	18,00	9,50	23,50	13,00	22,00	10,00	15,50	11,00	18,00	9,50	23,50
L8	13,50	14,00	17,50	18,00	9,50	17,00	20,50	18,50	13,50	14,00	17,50	18,00	9,50	17,00	20,50	18,50
DL6	17,00	17,50	6,50	2,00	23,00	19,50	4,00	10,50	17,00	17,50	6,50	2,00	23,00	19,50	4,00	10,50
DL8	2,00	6,00	16,50	15,00	18,00	6,00	11,50	14,50	2,00	6,00	16,50	15,00	18,00	6,00	11,50	14,50
AgNO <sub>3</sub> +L6	14,00	7,50	14,50	11,50	9,00	9,50	16,00	11,00	14,00	7,50	14,50	11,50	9,00	9,50	16,00	11,00
AgNO <sub>3</sub> +L8	17,00	8,00	8,50	22,00	20,00	24,00	23,00	23,00	17,00	8,00	8,50	22,00	20,00	24,00	23,00	23,00
AgNO <sub>3</sub> +DL6	18,50	17,50	22,50	17,00	5,50	6,50	17,50	20,50	18,50	17,50	22,50	17,00	5,50	6,50	17,50	20,50
AgNO <sub>3</sub> +DL8	16,50	6,00	17,50	7,00	6,50	14,00	10,00	17,50	16,50	6,00	17,50	7,00	6,50	14,00	10,00	17,50
AgHЧ +L6	17,00	20,50	17,50	16,50	14,50	8,00	15,55	5,00	17,00	20,50	17,50	16,50	14,50	8,00	15,55	5,00
AgHЧ +L8	12,50	17,50	16,50	12,50	6,50	14,50	20,50	18,00	12,50	17,50	16,50	12,50	6,50	14,50	20,50	18,00
AgHЧ +DL6	8,00	13,00	22,50	16,50	8,50	11,00	19,50	21,50	8,00	13,00	22,50	16,50	8,50	11,00	19,50	21,50
AgHЧ +DL8	20,00	11,50	9,50	17,00	18,50	15,50	21,50	21,00	20,00	11,50	9,50	17,00	18,50	15,50	21,50	21,00

Після математичної обробки масиву даних визначено середню довжину паростків та коренів дослідних груп (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

**Розмір пагонів та коренів пшениці (середнє значення по групі)**

№	Дослід	Довжина, мм:	
		пагонів	кореневої системи
1	Контроль	21,5	11,8
2	AgNO <sub>3</sub>	18,0	12,8
3	AgNPs	20,6	12,6
4	L6	20,2	15,7
5	L8	20,9	15,3
6	DL6	16,7	12,4
7	DL8	18,0	10,8
8	AgNO <sub>3</sub> +L6	21,9	11,4
9	AgNO <sub>3</sub> +L8	20,8	16,8
10	AgNO <sub>3</sub> +DL6	24,1	15,6
11	AgNO <sub>3</sub> +DL8	20,3	11,0
12	AgНЧ +L6	24,5	13,9
13	AgНЧ +L8	<b>26,6</b>	<b>18,4</b>
14	AgНЧ +DL6	25,9	14,4
15	AgНЧ +DL8	20,7	16,6

Слід зауважити, що у дослідних варіантах, в яких використано N-АГЛ, коренева система більш розвинена та розгалужена. У порівнянні з показниками контрольної групи також спостерігали зменшення довжини пагонів у досліді, та збільшення кореневої системи за індивідуального використання AgNO<sub>3</sub> або AgНЧ. Більш значний вплив AgНЧ порівняно з AgNO<sub>3</sub> на ріст пагонів і кореневої системи може бути пов'язаний з більшою ефективністю наночасток аргентуму у порівнянні з нітратом аргентуму через їх розмірність.



### 3.2 Вплив наночастинок срібла та N-ацилгомосеринлактонів на вміст пігментів у пшениці

Для ефективного росту рослинам необхідне забезпечення фотосинтезу – процесу перетворення енергії світла на енергію хімічних зв'язків. В клітинах рослин завжди наявні хлоропласти, які і забезпечують вказане перетворення. Хлоропласти містять два види хлорофілу – хлорофіл а та хлорофіл б. Ці пігменти поглинають світло в червоній і фіолетовій частинах спектру. Хлоропласт також містить каротиноїди, які поглинають світло найсильніше в синій частині спектра.

Для визначення вмісту каротиноїдів, хлорофілу а та хлорофілу б у дослідних зразках в дослідженні використали спектрофотометричний метод при довжині хвиль, нм: 441, 649, 654 та 665 [64]. Розглянемо вимірювання оптичної густини представлені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

#### Результати вимірів спектрофотометрії

№	Дослід	Оптична густина при довжина хвиль			
		441 нм	649 нм	654 нм	665 нм
1	Контроль	1,10	0,59	0,64	0,70
2	AgNO <sub>3</sub>	3,00	0,73	0,86	1,10
3	AgNPs	3,00	0,64	0,76	0,92
4	L6	3,00	0,58	0,68	0,81
5	L8	3,00	0,78	0,88	1,08
6	DL6	2,48	0,95	1,09	1,27
7	DL8	3,00	0,58	0,69	0,82
8	AgNO <sub>3</sub> +L6	3,00	0,93	1,07	1,36
9	AgNO <sub>3</sub> +L8	3,00	0,69	0,79	0,87
10	AgNO <sub>3</sub> +DL6	3,00	0,95	1,09	1,30
11	AgNO <sub>3</sub> +DL8	3,00	0,59	0,68	0,71
12	AgHЧ +L6	3,00	0,66	0,75	0,83
13	AgHЧ +L8	3,00	0,89	0,96	0,92
14	AgHЧ +DL6	3,00	0,68	0,77	0,84
15	AgHЧ +DL8	1,24	0,68	0,75	0,79

Аналіз отриманих результатів показує, що:

- При довжині хвилі у 441 нм найвища абсорбція спостерігається у всіх зразках, оброблених нітратом срібла, наночастками срібла або N-АГЛ (L6, L8, DL6, DL8), що вказує на підвищення вмісту каротиноїдів майже в 2,7 рази порівняно з контролем.
- При довжині хвилі у 649 нм висока абсорбція спостерігається у зразків, оброблених L8 з AgНЧ (0,89), DL6 (0,95) та DL6 з AgNO<sub>3</sub> (0,95), що вказує на високий вміст хлорофілу b. Найнижча абсорбція спостерігається у контролю (0,59), що свідчить про дієвість лактонів та наночасток срібла на рівень хлорофілу b в зразках.
- При довжині хвилі у 654 нм найвищі значення спостерігаються у зразків, оброблених DL6 (1,09), DL6 з AgNO<sub>3</sub> (1,09), та L6 з AgNO<sub>3</sub> (1,07), що вказує на високий вміст загального хлорофілу. А ось найнижчий вміст хлорофілу спостерігається у зразків, оброблених L6 та DL8 з AgNO<sub>3</sub> (0,68).
- При довжині хвилі у 665 нм зразки з високою абсорбцією включають варіанти DL6 (1,27), L6 з AgNO<sub>3</sub> (1,36), та DL6 з AgNO<sub>3</sub> (1,30), що вказує на високий вміст хлорофілу a. Найнижчі значення спостерігаються у зразках, оброблених DL8 з AgНЧ (0,79).

Обробка пшениці нітратом срібла, наночастками срібла та лактонами значно підвищує рівні каротиноїдів і загального хлорофілу, що свідчить про стимуляцію фотосинтетичної активності в цих зразках. AgNO<sub>3</sub> та AgНЧ також значно підвищують рівні пігментів у порівнянні з контролем, але комбінації з DL6 є найбільш ефективними.

Найвищий рівень хлорофілів спостерігається у зразків, оброблених DL6, особливо у комбінації з AgNO<sub>3</sub>, що вказує на синергічний ефект цих речовин. Контрольні ж зразки без обробки мають найнижчі рівні пігментів, що підтверджує вплив обробки на фотосинтетичну активність. Результати свідчать про потенційне використання DL6 та його комбінацій з наночастками срібла

для покращення фотосинтетичної активності та підвищення вмісту каротиноїдів і хлорофілів у пшениці.

За отриманими даними розраховано концентрацію пігментів (табл. 3.5), на основі якої визначено вміст пігментів у паростках пшениці. Результати розрахунку представлені в табл. 3.6.

Таблиця 3.5

### Результати розрахунку концентрації пігментів для дослідних груп

№	Дослід	Концентрація пігментів, мг/л:			
		хлорофіл а	хлорофіл b	каротиноїди	загал. хлорофілу
1	Контроль	5,772	9,902	0,859	16,064
2	AgNO <sub>3</sub>	10,205	10,474	8,300	21,586
3	AgNPs	8,366	9,520	8,973	19,076
4	L6	7,270	8,808	9,511	17,068
5	L8	9,655	11,916	8,165	22,088
6	DL6	<b>11,165</b>	<b>14,858</b>	4,311	<b>27,359</b>
7	DL8	7,401	8,732	9,444	17,319
8	AgNO <sub>3</sub> +L6	12,459	13,658	6,887	26,857
9	AgNO <sub>3</sub> +L8	7,423	11,190	8,771	19,829
10	AgNO <sub>3</sub> +DL6	<b>11,558</b>	<b>14,630</b>	6,753	<b>27,359</b>
11	AgNO <sub>3</sub> +DL8	5,903	9,826	9,511	17,068
12	AgHЧ+L6	7,071	10,720	9,040	18,825
13	AgHЧ +L8	6,926	15,970	7,627	24,096
14	AgHЧ +DL6	7,087	11,160	8,905	19,327
15	AgHЧ +DL8	6,432	11,540	0,777	18,825

Результати показують, що ізомер N-ацилгомосеринлактонів DL6 є найпотужнішим стимулятором синтезу хлорофілів у зразках пшениці. А у поєднанні нітрату срібла з ізомером N-АГЛ DL6 спостерігається навіть збільшення концентрації хлорофілу а у зразках. Найбільшої концентрації хлорофілу а досягнуто у варіанті, який передбачає застосування нітрату срібла та ізомеру N-АГЛ L6.

Таблиця 3.6

## Кількісний вміст пігментів у пшениці

№	Дослід	Кількісний вміст пігментів, мг/г:			
		хлорофіл а	хлорофіл b	каротиноїди	відношення хлорофілу а / b
1	Контроль	0,008	0,013	0,001	0,581
2	AgNO <sub>3</sub>	0,023	0,024	0,019	0,971
3	AgNPs	0,014	0,016	0,015	0,877
4	L6	0,014	0,017	0,018	0,825
5	L8	0,023	0,028	0,019	0,810
6	DL6	<b>0,028</b>	<b>0,037</b>	0,011	0,753
7	DL8	0,023	0,027	<b>0,030</b>	0,850
8	AgNO <sub>3</sub> +L6	0,020	0,022	0,011	0,914
9	AgNO <sub>3</sub> +L8	0,010	0,014	0,011	0,664
10	AgNO <sub>3</sub> +DL6	0,015	0,019	0,009	0,791
11	AgNO <sub>3</sub> +DL8	0,010	0,017	0,016	0,601
12	AgHЧ+L6	0,010	0,015	0,013	0,656
13	AgHЧ +L8	0,010	0,023	0,011	0,436
14	AgHЧ +DL6	0,010	0,016	0,013	0,631
15	AgHЧ +DL8	0,012	0,022	0,002	0,557

Отже, обробка AgNO<sub>3</sub> призводить до трикратного збільшення концентрації хлорофілу а та b у порівнянні з контролем, і майже 17-кратного збільшення каротиноїдів. Це вказує на значний стимулюючий ефект AgNO<sub>3</sub> на фотосинтетичний механізм.

Наночастки срібла також стимулюють підвищення пігментів, але менш ефективно, ніж AgNO<sub>3</sub>. Це може бути пов'язано з різницею у механізмі дії, оскільки наночастки можуть спричиняти інші стресові відповіді, які не так ефективно стимулюють синтез хлорофілів.

N-АГЛ DL6 та DL8 мають виразний вплив на збільшення вмісту пігментів, що вказує на їх значний біостимулюючий ефект.

Найвищий вміст хлорофілу а та хлорофілу b спостерігається в зразку, обробленому лактонами DL6 (варіант 6), а каротиноїдів – у зразку,

обробленому лактонами DL8 (варіант 7). Скоріше за все, це пов'язано з впливом N-АГЛ на активацію антиоксидантної системи та їх фітостимулюючими властивостями.

Слід зауважити, що співвідношення показників «вмісту хлорофілу а / в» (табл. 3.6) коливається для дослідних варіантів у межах 0,557 (для обробки AgНЧ +DL8) до 0,971 (для обробки AgNO<sub>3</sub>). Зазначені межі не відповідають стандартному значенню, який має становити 2:1. Тобто вміст хлорофілу а у зразках має бути удвічі більшим за вміст хлорофілу в. Вочевидь це пов'язано з тим, що ми маємо справу з 14 добовими проростками пшениці, а не зрілими рослинами. Але, у будь-якому випадку, це питання варто дослідити у подальших дослідженнях.

### 3.3 Вплив наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів на вміст білка, глюкози, магнію та калію у пшениці

За методами, описаними в розділі 2 кваліфікаційної роботи, було визначено та розраховано вміст білка, глюкози, магнію та калію в трьох повторах проти холостої проби [66], після чого було вираховано середнє значення їх вмісту.

В табл. 3.7 представлені результати визначення вмісту білка та глюкози, а в табл. 3.8 – результати визначення вмісту калію та магнію у дослідних групах пшениці.

Таблиця 3.7

#### Вмісту білка і глюкози у пшениці

№	Варіант	Вміст у пшениці, мг/г:	
		білка	глюкози
1	Контроль	0,121	0,301
2	AgNO <sub>3</sub>	0,122	0,377
3	AgNPs	0,108	0,341
4	L6	0,119	0,418
5	L8	0,117	0,354

№	Варіант	Вміст у пшениці, мг/г:	
		білка	глюкози
6	DL6	0,104	0,432
7	DL8	0,098	0,363
8	AgNO <sub>3</sub> +L6	<b>0,137</b>	<b>0,609</b>
9	AgNO <sub>3</sub> +L8	<b>0,143</b>	0,589
10	AgNO <sub>3</sub> +DL6	0,125	0,517
11	AgNO <sub>3</sub> +DL8	0,105	0,401
12	AgHЧ +L6	0,119	0,420
13	AgHЧ +L8	0,116	0,426
14	AgHЧ +DL6	0,117	0,559
15	AgHЧ +DL8	0,098	0,410
	Калібрування	0,102	0,678
	Холоста проба	0,114	0,060

Аналіз даних показує, що найвищий вміст білка спостерігаються у варіантах з комбінацією для обробки AgNO<sub>3</sub> з L8 (0,143 мг/г) і AgNO<sub>3</sub> з L6 (0,137 мг/г). Це свідчить про позитивний вплив нітрату срібла на синтез білків у пшениці [67]. Зниження ж вмісту білка помітно в зразках, оброблених наночастками срібла, особливо у групі AgHЧ з DL8 (0,098 мг/г), що є найнижчим показником серед усіх зразків. Це вказує на те, що наночастки срібла у комбінації з N-ацилгомосеринлактонами можуть пригнічувати синтез білка або впливати на білковий метаболізм у пшениці [7].

Найвищий вміст глюкози спостерігається у зразка пшениці, обробленої AgNO<sub>3</sub> з L6 (0,609 мг/г), що свідчить про значний вплив AgNO<sub>3</sub> на метаболізм вуглеводів у пшениці. Це пов'язано зі стимуляцією фотосинтетичних процесів або з підвищеним рівнем активності ферментів, що відповідають за метаболізм глюкози [67].

Наночастки срібла ж виявляють помірний вплив на рівень глюкози, наприклад, AgHЧ з DL6 (0,559 мг/г) або AgHЧ з L8 (0,426 мг/г), що є вищим, ніж у контрольного зразка, але нижчим, ніж у зразків, оброблених AgNO<sub>3</sub>.

Найнижчий рівень глюкози спостерігається для зразків, оброблених індивідуально N-ацилгомосеринлактонами DL8 (0,363 мг/г).

Результати визначення вмісту мікроелементів у дослідних зразках пшениці представлено у табл.3.8.

Таблиця 3.8

### Вмісту калію й магнію у пшениці

№	Варіант	Вміст у пшениці, мг/г:	
		калію	магнію
1	Контроль	<b>0,533</b>	0,280
2	AgNO <sub>3</sub>	0,347	0,260
3	AgNPs	0,220	0,265
4	L6	0,186	0,266
5	L8	0,197	0,259
6	DL6	0,272	0,211
7	DL8	0,134	0,210
8	AgNO <sub>3</sub> +L6	0,318	0,335
9	AgNO <sub>3</sub> +L8	0,263	0,267
10	AgNO <sub>3</sub> +DL6	0,204	0,240
11	AgNO <sub>3</sub> +DL8	0,142	0,257
12	AgHЧ +L6	0,145	0,228
13	AgHЧ +L8	0,169	0,256
14	AgHЧ +DL6	0,174	<b>0,335</b>
15	AgHЧ +DL8	0,174	0,197
	Калібрування	0,156	0,185
	Холоста проба	0,060	0,213

Найвищий вміст калію відзначений у контрольному зразку (0,533 мг/г). Цей показник свідчить про те, що обробка наночастками срібла та N-ацилгомосеринлактонами негативно впливає на вміст калію у рослинах. Найнижчий вміст калію зафіксовано у зразку контролю лактонів DL8 (0,134 мг/г). Зразки, оброблені AgNO<sub>3</sub>, загалом мають вищий вміст калію порівняно з групами, обробленими наночастками срібла, але все ж менший, ніж у контрольного зразка. Найвищий же результат вмісту калію окрім контролю спостерігається у зразку контролю лактонів DL6 (0,272 мг/г).

Вміст магнію є найвищим у зразках AgНЧ з DL6 (0,335 мг/г), що вказує на позитивний вплив цього конкретного поєднання на метаболізм магнію. Контрольний зразок показує вміст магнію на рівні 0,280 мг/г, що є відносно високим показником у порівнянні з іншими зразками. Найнижчий вміст магнію помічено у комбінації AgНЧ з DL8 (0,197 мг/г), що свідчить про специфічну взаємодію наночастинок срібла з лактонами DL8, яка пригнічує поглинання або утримання магнію.

Підсумуємо отримані дані щодо вмісту білка, глюкози, калію та магнію в пшениці у вигляді загальної гістограми (рис. 3.1).

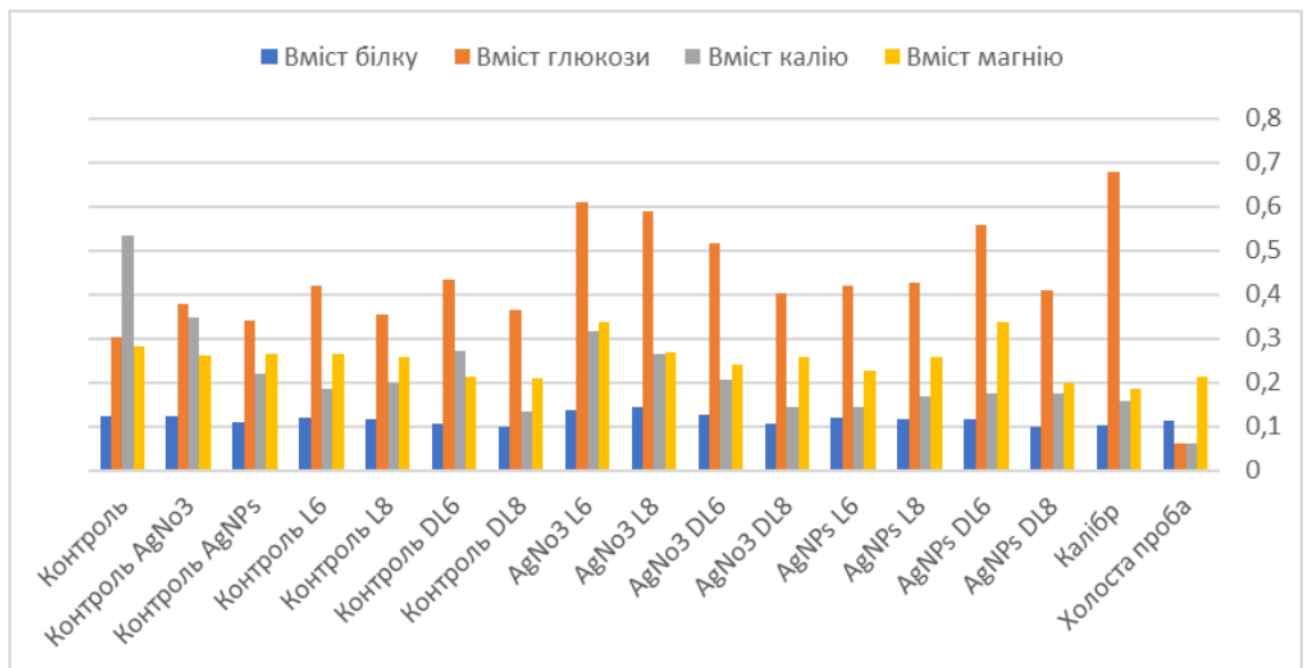


Рисунок 3.1 – Вміст білка, глюкози, калію й магнію у пагонах пшениці, мг/г

З рис. 3.1 видно, що комбінація AgNO<sub>3</sub> з лактонами L6 є найефективнішою комбінацією для підвищення вмісту білка, глюкози та магнію у пшениці; комбінація AgNO<sub>3</sub> з лактонами L8 ефективна для підвищення вмісту глюкози та білка; комбінація AgНЧ з лактонами DL6 ефективна для підвищення вмісту у пшениці білка. Вочевидь, нітрат срібла впливає на підвищення активності ферментів, відповідальних за синтез білка, а наночастки срібла та АГЛ впливають на фотосинтез, метаболізм та активацію шляхів накопичення у пагонах пшениці цукрів.



### Висновки до розділу 3

У дослідних варіантах, в яких використано N-АГЛ, коренева система більш розвинена та розгалужена.

У порівнянні з показниками контрольної групи спостерігали зменшення довжини пагонів у досліді, та збільшення кореневої системи за індивідуального використання  $\text{AgNO}_3$  або  $\text{AgHЧ}$ . Більш значний вплив  $\text{AgHЧ}$  порівняно з  $\text{AgNO}_3$  на ріст пагонів і кореневої системи може бути пов'язаний з більшою ефективністю наночасток аргентуму у порівнянні з нітратом аргентуму через їх розмірність.

Використання комбінації  $\text{AgHЧ}+\text{C8-АГЛ}$  (варіант 13) мав найбільший вплив на ріст пагонів і кореневої системи пшениці, що вказує на потенціал цієї комбінації для стимуляції росту рослин. У порівнянні з контрольним варіантом, спостерігали збільшення довжини пагонів на 23,7 %, кореневої системи – 55,9 %; водночас комбінація з  $\text{AgNO}_3$ , забезпечувала приріст на 27,9 % та 9,5 % відповідно.

Обробка насіння індивідуально нітратом срібла спричинила трикратне збільшення концентрації хлорофілу а у порівнянні з контрольними зразками і майже 17 кратне збільшення у зразках пшениці каротиноїдів. Це свідчить про сильний стимулюючий вплив  $\text{AgNO}_3$  на фотосинтетичну механізм. Найвищий вміст хлорофілу а та хлорофілу б спостерігається в зразку, обробленому лактонами DL6 (варіант 6), а каротиноїдів – у зразку, обробленому лактонами DL8 (варіант 7). Скоріше за все, це пов'язано з впливом N-АГЛ на активацію антиоксидантної системи та їх фітостимулюючими властивостями.

## ВИСНОВКИ

1. В науково-дослідній роботі вивчено основні характеристики наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів; оцінено перспективність їх застосування в агробіотехнології з метою біостимуляції сільськогосподарської культури – пшениці. Для модельного об'єкту проведена передпосівна обробка різними комбінаціями наночасток срібла та нітрату срібла, L та DL ізомерами N-ацилгомосеринлактонів. Отримано 15 дослідних варіантів 14 добових проростків пшениці, які досліджено для оцінки ефективності застосовуваних біостимуляторів.

2. В результаті проведеного дослідження виявлено, що наночастки срібла і N-ацилгомосеринлактони (L6, L8, DL6, DL8) чинять значний вплив на ріст, біометричні показники та метаболізм пшениці. Встановлено, що обробка насіння пшениці наночастками срібла в поєднанні з лактонами L8 сприяє максимальному росту пагонів і корінців, що свідчить про потенціал цієї комбінації для стимуляції розвитку рослин.

3. Визначено, що використання наночасток срібла загалом позитивно впливає на ріст пшениці, порівняно з використанням нітрату срібла, що пов'язано з більш контрольованим та цілеспрямованим ефектом наночасток. Зокрема, наночастки срібла у поєднанні з лактонами DL6 і DL8 показали значний вплив на підвищення вмісту хлорофілу a, b і каротиноїдів, що може свідчити про формування захисних механізмів у рослини.

4. Дослідження показало, що використання наночасток срібла та N-ацилгомосеринлактонів має значний вплив на ріст пагонів, формування кореневої системи, фотосинтетичну активність, вміст білків, глюкози, мінеральних речовин у пшениці. При цьому, найбільш ефективними комбінаціями для стимуляції росту та метаболічних процесів у пшениці були визначені  $\text{AgNO}_3$  з лактонами L6 та L8, а також  $\text{AgH}_2\text{C}$  з лактонами DL6. Різний вплив окремих комбінацій метаболічні процеси пшениці, може бути використаний для цілеспрямованого регулювання росту та розвитку рослин, а

також для підвищення їх продуктивності в умовах несприятливих факторів навколишнього середовища.

5. Таким чином, отримані результати свідчать про перспективність використання сполук срібла та N-ацилгомосеринлактонів у сільському господарстві для підвищення урожайності пшениці, що може сприяти подоланню проблем, пов'язаних зі змінами клімату, деградацією ґрунтів і зменшенням площі засіву в умовах війни.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liu C., Zhou H., Zhou J. The Applications of Nanotechnology in Crop Production. *Molecules*. 2021. Vol. 26, №. 23. P. 7070. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26237070>.
2. He X., Deng H., Hwang H.-m. The current application of nanotechnology in food and agriculture. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2019. Vol. 27, №. 1. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002>.
3. Calvo P., Nelson L., Kloepper J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*. 2014. Vol. 383, no. 1-2. P. 3–41. URL: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>.
4. Nanoparticles and Nanomaterials as Plant Biostimulants / A. Juárez-Maldonado et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, no. 1. P. 162. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>.
5. Green nanotechnology: illuminating the effects of bio-based nanoparticles on plant physiology / S. K. Verma et al. *Biotechnology for Sustainable Materials*. 2024. Vol. 1, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00001-2>.
6. Green synthesis, characterization of silver nanoparticles for biomedical application and environmental remediation / V. Vorobyova et al. *Journal of Microbiological Methods*. 2022. Vol. 193. P. 106384. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2021.106384>.
7. Бандас І. А. Криницька І. Я. Куліцька М. І. Корда М. М. Наночастки: важливість сьогодні, класифікація, використання в медицині, токсичність, Медична та клінічна хімія. 3-тє вид. Київ, 2015. Т. 17.
8. Wu H., Li Z. Nano-enabled agriculture: how nanoparticles cross barriers in plants?. *Plant Communications*. 2022. P. 100346. URL: <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100346>.
9. The effect of nanoparticle size on in vivo pharmacokinetics and cellular interaction / N. Hoshyar et al. *Nanomedicine*. 2016. Vol. 11, no. 6. P. 673–692. URL: <https://doi.org/10.2217/nnm.16.5>.

10. Biological Synthesis of Silver Nanoparticles and Prospects in Plant Disease Management / M. Tariq et al. *Molecules*. 2022. Vol. 27, no. 15. P. 4754. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules27154754>.
11. Silver nanoparticles in dentistry / V. T. Noronha et al. *Dental Materials*. 2017. Vol. 33, no. 10. P. 1110–1126. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.07.002>.
12. Application of Silver Nanoparticles to Improve the Antibacterial Activity of Orthodontic Adhesives: An In Vitro Study / J.-D. Tristán-López et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, no. 2. P. 1401. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms24021401>.
13. High-Quality Microprintable and Stretchable Conductors for High-Performance 5G Wireless Communication / J. Kim et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.2c18424>.
14. Skobeeva V. M., Smyntyna V. A., Lepikh Y. I. SYNTHESIS OF NOBLE METAL NANOPARTICLES AND THEIR USE IN SENSOR DEVICES, PART 1: SYNTHESIS OF Ag, Au NANOPARTICLES. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2023. Vol. 19, no. 4. P. 30–50. URL: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2022.4.271204>.
15. Controllable in situ synthesis of silver nanoparticles on multilayered film-coated silk fibers for antibacterial application / M. Meng et al. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 461. P. 369–375. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.09.038>.
16. Литвин В. А., Бараненко А. С. Хімічні проблеми сьогодення, Синтез наночастинок срібла та їх використання в косметології. Київ, 2024. 135 с.
17. Ong W. T. J., Nyam K. L. Evaluation of silver nanoparticles in cosmeceutical and potential biosafety complications. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2022. Vol. 29, no. 4. P. 2085–2094. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.01.035>.
18. Xu C. et al. Silver Nanoparticle Synthesis in Glycerol by Low-Pressure Plasma-Driven Electrolysis: The Roles of Free Electrons and Photons. *The Journal of*

- Physical Chemistry Letters*. 2023. P. 9960–9968.  
URL: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcelett.3c02342>.
19. Traba C. et al. Rapid Synthesis of Metal Nanoparticles Using Low-Temperature, Low-Pressure Argon Plasma Chemistry and Self-Assembly. *Green Chemistry*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1039/d2gc02592b>.
20. Shepida M. et al. Microplasma Synthesis of Antibacterial Active Silver Nanoparticles in Sodium Polyacrylate Solutions. *Bioinorganic Chemistry and Applications*. 2021. Vol. 2021. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/4465363>.
21. Jain A. S. et al. Bionanofactories for Green Synthesis of Silver Nanoparticles: Toward Antimicrobial Applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22, no. 21. P. 11993. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms222111993>.
22. Pernas-Pleite C. et al. Green Extracellular Synthesis of Silver Nanoparticles by *Pseudomonas alloputida*, Their Growth and Biofilm-Formation Inhibitory Activities and Synergic Behavior with Three Classical Antibiotics. *Molecules*. 2022. Vol. 27, no. 21. P. 7589. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules27217589>.
23. Arsène M. M. J. et al. Antifungal activity of silver nanoparticles prepared using Aloe vera extract against *Candida albicans*. *Veterinary World*. 2023. P. 18–26. URL: <https://doi.org/10.14202/vetworld.2023.18-26>.
24. Singh P. et al. Biological Synthesis of Nanoparticles from Plants and Microorganisms. *Trends in Biotechnology*. 2016. Vol. 34, no. 7. P. 588–599. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.02.006>.
25. Kharchenko Y., Skrotska O. The use of microorganisms for biogenic synthesis of nanoparticles. *Scientific Works of National University of Food Technologies*. 2020. Vol. 26, no. 2. P. 57–70. URL: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2020-26-2-6>.
26. Gurunathan S. et al. Biosynthesis, purification and characterization of silver nanoparticles using *Escherichia coli*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*.

2009. Vol. 74, no. 1. P. 328–335.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.07.048>.
27. Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination / V. Santás-Miguel et al. *Environmental Pollution*. 2023. P. 122222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122222>.
28. Bacterial synthesis of nanoparticles: A green approach / S. I. Tsekhmistrenko et al. *Biosystems Diversity*. 2020. Vol. 28, no. 1. P. 9–17. URL: <https://doi.org/10.15421/012002>.
29. Obtaining biogenic silver nanoparticles using yeast and prospects for their application in antimicrobial therapy / Y. Kharchenko et al. *Scientific Works of National University of Food Technologies*. 2021. Vol. 27, no. 3. P. 32–42. URL: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2021-27-3-6>.
30. Kowshik M., Ashtaputre S., Kharrazi S., Vogel W., Urban J., Kulkarni S. K., Paknikar K. M. Extracellular synthesis of silver nanoparticles by a silver-tolerant yeast strain MKY3. *Nanotechnology*. 2002. Vol. 14(1). P. 95–100. URL: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/14/1/321>.
31. Green synthesis of silver nanoparticles: Another honor for the yeast model *Saccharomyces cerevisiae* / F. Niknejad et al. *Current Medical Mycology*. 2015. Vol. 1, no. 3. P. 17–24. URL: <https://doi.org/10.18869/acadpub.cmm.1.3.17>.
32. Nam K. T., Lee Y. J., Krauland E. M., Kottmann S. T., Belcher A. M. Peptide-Mediated Reduction of Silver Ions on Engineered Biological Scaffolds. *ACS Nano*. 2008. Vol. 2(7). P. 1480–1486. URL: <https://doi.org/10.1021/nn800018n>.
33. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Saccharomyces cerevisiae* / H. Korbekandi et al. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*. 2014. Vol. 44, no. 1. P. 235–239. URL: <https://doi.org/10.3109/21691401.2014.937870>.
34. Ma G., Zhao Z., Liu H. Yeast Cells Encapsulating Polymer Nanoparticles as Trojan Particles via in Situ Polymerization inside Cells. *Macromolecules*. 2016. Vol. 49(5). P. 1545–1551. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.6b00016>.

35. Roychoudhury A. Yeast-mediated Green Synthesis of Nanoparticles for Biological Applications. *Indian J. Pharm. Biol. Res.* 2020. Vol. 8(3). P. 26-31. URL: <https://doi.org/10.30750/ijpbr.8.3.4>.
36. Yan A., Chen Z. Impacts of Silver Nanoparticles on Plants: A Focus on the Phytotoxicity and Underlying Mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, no. 5. P. 1003. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms20051003>.
37. Higher Plant-Derived Biostimulants: Mechanisms of Action and Their Role in Mitigating Plant Abiotic Stress / S. E. Martínez-Lorente et al. *Antioxidants*. 2024. Vol. 13, no. 3. P. 318. URL: <https://doi.org/10.3390/antiox13030318>.
38. Sesquiterpenoids Lactones: Benefits to Plants and People / M. Chadwick et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013. Vol. 14, no. 6. P. 12780–12805. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms140612780>.
39. Waters C. M., Bassler B. L. QUORUM SENSING: Cell-to-Cell Communication in Bacteria. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*. 2005. Vol. 21, no. 1. P. 319–346. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.cellbio.21.012704.131001>.
40. Quorum-sensing in Gram-negative bacteria / N. A. Whitehead et al. *FEMS Microbiology Reviews*. 2001. Vol. 25, no. 4. P. 365–404. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2001.tb00583.x>.
41. N-Acyl-Homoserine Lactone Primes Plants for Cell Wall Reinforcement and Induces Resistance to Bacterial Pathogens via the Salicylic Acid/Oxylipin Pathway / S. T. Schenk et al. *The Plant Cell*. 2014. Vol. 26, no. 6. P. 2708–2723. URL: <https://doi.org/10.1105/tpc.114.126763>.
42. N-acyl homoserine lactone-mediated modulation of plant growth and defense against *Pseudoperonospora cubensis* in cucumber / S. Pazarlar et al. *Journal of Experimental Botany*. 2020. Vol. 71, no. 20. P. 6638–6654. URL: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa384>.
43. Microbial Biosynthesis of Lactones: Gaps and Opportunities towards Sustainable Production / R. Silva et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 18. P. 8500. URL: <https://doi.org/10.3390/app11188500>.



44. *Artemisia brevifolia* Wall. Ex DC Enhances Cefixime Susceptibility by Reforming Antimicrobial Resistance / A. Zafar et al. *Antibiotics*. 2023. Vol. 12, no. 10. P. 1553. URL: <https://doi.org/10.3390/antibiotics12101553>.
45. Dinda B. *Pharmacology and Applications of Naturally Occurring Iridoids*. Cham : Springer International Publishing, 2019. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05575-2>.
46. King G. S., Waight E. S. Synthesis and mass spectra of some  $\alpha\beta$ -unsaturated  $\gamma$ -lactones and  $\gamma$ -lactams. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1*. 1974. C. 1499–1504. URL: <https://doi.org/10.1039/p19740001499>.
47. Li C., Jones A. X., Lei X. Synthesis and mode of action of oligomeric sesquiterpene lactones. *Natural Product Reports*. 2016. Vol. 33, no. 5. P. 602–611. URL: <https://doi.org/10.1039/c5np00089k>.
48. Kruizinga W. H., Kellogg R. M. Simple and high yield synthesis of macrocyclic lactones by ring-closure of caesium salts of  $\omega$ -halogenoaliphatic acids. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* 1979. № 6. C. 286–288. URL: <https://doi.org/10.1039/c39790000286>.
49. Mild and Chemoselective Synthesis of Lactones from Diols Using a Novel Metal–Ligand Bifunctional Catalyst / T. Suzuki et al. *Organic Letters*. 2002. Vol. 4, no. 14. P. 2361–2363. URL: <https://doi.org/10.1021/ol026091h>.
50. The role of plants and plant secondary metabolites as selective nitric oxide synthase (NOS) inhibitors / A. Onder et al. *Nitric Oxide in Plant Biology*, Academic Press, 2022. P. 53–94. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818797-5.00007-8>.
51. Applications of Sesquiterpene Lactones: A Review of Some Potential Success Cases / L. Moujir et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 9. P. 3001. URL: <https://doi.org/10.3390/app10093001>.
52. Specialized Plant Metabolism Characteristics and Impact on Target Molecule Biotechnological Production / H. N. Matsuura et al. *Molecular Biotechnology*. 2017. Vol. 60, no. 2. P. 169–183. URL: <https://doi.org/10.1007/s12033-017-0056-1>.

53. Marchenko M. M. PROPERTIES OF THE SESQUITERPENE LACTONES OF *in vitro* CULTIVATED *Saussurea discolor* (WILLD.) DC. AND *S. porcii* DEGEN. *Biotechnologia Acta*. 2014. Vol. 7, no. 2. P. 86–91. URL: <https://doi.org/10.15407/biotech7.02.086>.
54. Rai M., Yadav A., Gade A. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*. 2009. Vol. 27, no. 1. P. 76–83. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>.
55. Dynamic light scattering: With applications to chemistry, biology, and physics / ed. by P. R. 1938-. Mineola, N.Y : Dover Publications, 2000. 376 p.
56. ICP-MS: a powerful technique for quantitative determination of silver nanoparticles without previous dissolving / R. Allabashi et al. *Journal of Nanoparticle Research*. 2008. Vol. 11, no. 8. P. 2003–2011. URL: <https://doi.org/10.1007/s11051-008-9561-2>.
57. Лазюка Ю. В., Скроцька О. І., Харченко Є. В. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції. *Спектрофотометричний аналіз наночасток срібла синтезованих з використанням безклітинного дріжджового екстракту* : тези доп. учасників X міжнародної науково-технічної конф., м. Київ, 09–10 листопада 2021 р. / НУХТ. Київ, 2021. С. 63–64.
58. Ruf H., Grell E., Stelzer E. H. K. Size distribution of submicron particles by dynamic light scattering measurements: analyses considering normalization errors. *European Biophysics Journal*. 1992. Vol. 21, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/bf00195440>.
59. Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective / O. I. Yakhin et al. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>.
60. Moshynets O. V., Babenko L. M., Rogalsky S. P., Iungin O. S., Foster J., Kosakivska I. V., ... & Spiers A. J. Priming winter wheat seeds with the bacterial quorum sensing signal N-hexanoyl-L-homoserine lactone (C6-HSL) shows potential to improve plant growth and seed yield. 2019. *PLoS One*. № 14(2), e0209460.

61. Шидловська О. А. Методи і засоби діагностики в біотехнологіях: методичні вказівки до лабораторних занять студентів денної форми навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 162 Біотехнології та біоінженерія освітньої програми Біотехнологія. Київ : КНУТД, 2023. 23 с.
62. Bradford M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 1976. Vol. 72, no. 1-2. P. 248–254. URL: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).
63. Friedenauer S., Berlet H. H. Sensitivity and variability of the Bradford protein assay in the presence of detergents. *Analytical Biochemistry*. 1989. Vol. 178, no. 2. P. 263–268. URL: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(89\)90636-2](https://doi.org/10.1016/0003-2697(89)90636-2).
64. Hans Ulrich Bergmeyer Karlfried Gawehn. *Methods of Enzymatic Analysis*. 2nd ed. Verlag Chemie, 1974. 497 p.
65. Welz B., Sperling M. *Atomic Absorption Spectrometry*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2008. 965 p.
66. Flook P., Griffin A. M. and Griffin, H. G. 1994. Computer Analysis of Sequence Data, Parts I and II. Humana Press, New Jersey. (392 pp and 456 pp). ISBN: 0-89603-246-9 (pt. 1), 0-89603-276-0 (pt. 2). *Journal of Evolutionary Biology*. 1994. Vol. 7, no. 5. P. 628–629. URL: <https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.1994.7050628.x>.
67. Insights into the Functional Components in Wheat Grain: Spatial Pattern, Underlying Mechanism and Cultivation Regulation / Y. Zhong et al. *Plants*. 2023. Vol. 12, no. 11. P. 2192. URL: <https://doi.org/10.3390/plants12112192>.

## ДОДАТОК А

# ***НАУКОВІ ОСНОВИ АДАПТИВНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА***

## **МАТЕРІАЛИ**

**МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ**

**з нагоди 100-річчя від дня народження**

**доктора сільськогосподарських наук, професора, академіка**

**ФЕДОРА ТРОХИМОВИЧА МОРГУНА,**

**90-річчя Агронічного факультету Дніпровського державного**

**аграрно-економічного університету**

**та Міжнародного дня здоров'я рослин**

**(16-17 травня 2024 року, м. Дніпро)**

## ЗАСТОСУВАННЯ НАНОЧАСТОК В АГРОБІОТЕХНОЛОГІЯХ

*К.О. Лупан, студентка кафедри біотехнології, шкіри та хутра*

*О.А. Охмат, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра*

*Київський національний університет технологій та дизайну*

*E-mail: lupankate@gmail.com*

Агробіотехнологія зосереджена на дослідженні біотехнології культурних рослин, свійських тварин, грибів та пов'язаних з ними мікроорганізмів і вірусів [1], дослідницькою базою якої є сукупність методів клітинної біології, молекулярної генетики, ДНК-технологій, біоінформатики тощо. Застосування

328

принципів агробіотехнології сприяє переходу агросфери до принципів сталого розвитку [2].

Одним з перспективних напрямів розвитку агробіотехнологій є застосування функціональних наноматеріалів як поживних речовин, стимуляторів росту, гербіцидів, протимікробних засобів тощо. Цей метод протиставляється традиційним методам, які часто ґрунтуються на використанні хімічних реагентів, що акумулюються в природних екосистемах та можуть чинити негативний вплив.

Функціональні нанобіоматеріали є комплексними сполуками, в яких наночастки металів виконують роль комплексоутворювача. Активно розглядають можливість застосування у сільському господарстві наночасток срібла, міді, церію, заліза, цинку, титану, селену тощо. Особливу увагу при цьому приділяють біологічному, «зеленому» синтезу наночасток. Вказаний метод синтезу передбачає отримання наночасток за умови використання природних ресурсів: мікроорганізмів і продуктів їх життєдіяльності, рослинних екстрактів, ферментів тощо.

Достатньо широкий спектр хімічних елементів, що використовують для синтезу наночасток, дозволяє уповільнити процес адаптації шкідників до нанобіоматеріалів, а також цілеспрямовано впливати на популяції, які виявляють стійкість до традиційних методів захисту рослин.

Наночастки сприяють переносу електронів, перетворюють нітрати в амонійний азот, активують ферменти, стимулюють клітинне дихання, фотосинтез, синтез ферментів і амінокислот, а також вуглеводний і азотний обмін, що безпосередньо впливає на мінеральне живлення рослин. Завдяки високій рухливості, наночастки здатні до взаємодії між собою та утворення конгломератів на поверхні рослин, що, у свою чергу, дозволяє регулювати функціональні особливості матеріалів. Наночастки здатні до взаємодії з клітинами, підвищення ефективності біологічних процесів у рослинах, формування мікроелементного балансу тощо. Безумовна перевага застосування наноматеріалів у порівнянні з традиційними хімічними матеріалами проявляється у їх використанні в мікродозах для досягнення необхідного результату при низькому навантаженні на навколишнє середовище [3].

Серед наночасток металів особлива увага приділяється сьогодні наночасткам срібла та їх впливу на ріст і розвиток сільськогосподарських культур. Доведено, що наночастки срібла мають бактерицидні властивості й можуть посилювати ефективність традиційних засобів захисту рослин. Механізм їх дії передбачає поступове окиснення наночасток у ґрунті із створенням на

329

поверхні насіння умов, несприятливих для розвитку патогенної мікрофлори або для її знешкодження [4]. Треба відмітити, що використовувани наночастки срібла доповнюють наявні матеріали в агробіотехнологіях, а не замінюють їх повністю. Доведено [5], що застосування наночасток срібла в агробіотехнологіях сприяє підвищенню адаптації рослин до стресових умов, поліпшенню якості сільськогосподарської продукції та екологічного аспекту галузі в цілому.

Отже, наночастки можуть ефективно використовувати для розвитку агробіотехнологій пов'язаних як з адаптацією рослин, зниженням водного стресу, так і з розробкою біодобрив, біогербіцидів тощо. Перспективи використання наночасток включають і можливість генної модифікації рослин, що, у свою чергу, сприяє створенню нових сортів з прогнозованими характеристиками: стійкістю до посухи, шкідників, хвороб, підвищеною врожайністю.

#### Бібліографія

1. Енциклопедія Сучасної України ЕСУ : Агробіотехнологія. URL: <https://esu.com.ua/article-42580> (дата звернення: 25.04.2024).
2. Agricultural biotechnology for crop improvement in a variable climate: hope or hype? / R. K. Varshney et al. *Trends in Plant Science*. 2011. Vol. 16, № 7. P. 363–371.
3. Siddiqi K. S., Husen A. Plant response to silver nanoparticles : a critical review. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2021. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1975091> (date of access: 30.04.2024).
4. Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination / V. Santás-Miguel et al. *Environmental Pollution*. 2023. P. 122222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122222> (date of access: 28.04.2024).
5. The Size-Dependent Effects of Silver Nanoparticles on Germination, Early Seedling Development and Polar Metabolite Profile of Wheat (*Triticum aestivum* L.) / L. B. Lahuta et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, №. 21. P. 13255. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms232113255> (date of access: 30.04.2024).

## ДОДАТОК Б



## СИНЕРГІЯ НАУКИ І БІЗНЕСУ У ПОВОЄННОМУ ВІДНОВЛЕННІ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

### МАТЕРІАЛИ ІІ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

24-26  
КВІТНЯ

2024

ТОМ

3

- ХЕРСОНСЬКА ОБЛАСНА ВІЙСЬКОВА АДМІНІСТРАЦІЯ
- ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
- ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
- ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ
- КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
- ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
- НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"
- АСОЦІАЦІЯ АЗОВО-ЧОРНОМОРСЬКИХ УНІВЕРСИТЕТІВ УКРАЇНИ
- UNIWERSYTET MARIJ CURIE-SKŁODOWSKIEJ LUBLIN, POLAND
- BIALYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, BIALYSTOK, POLAND
- JAGELLONIAN UNIVERSITY, KRAKOW, POLAND
- HAMBURG UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, HAMBURG, GERMANY
- ХЕРСОНСЬКА ТОРГОВО-ПРОМИСЛОВА ПАЛАТА
- ГО "ПРОГРЕСИВНІ"



**УДК 579.26+57.022**

*Калініченко Олександр Олександрович*  
асистент кафедри біотехнології, шкіри та хутра

*Луцан Катерина Олександрівна*  
студентка кафедри біотехнології, шкіри та хутра

*Резнік Дмитро Ігоревич*  
студент кафедри біотехнології, шкіри та хутра

*Юнгін Ольга Сергіївна*  
кандидат біологічних наук, доцент,  
доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра,  
Київський національний університет технологій та дизайну

### **ВИЗНАЧЕННЯ РІСТ-СТИМУЛЮВАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ БАКТЕРІЙ, АСОЦІЙОВАНИХ З СУДИННИМИ РОСЛИНАМИ**

Зернові культури, такі як пшениця, є ключовими джерелами харчових продуктів для людства. Україна є одним з найбільших експортерів зерна до країн Європи, Азії та Африки. Проте повномасштабне вторгнення РФ в Україну негативно вплинуло на стабільність та розвиток агросектору. Обстріли сільськогосподарських об'єктів та інфраструктури по всій Україні, мінування та спалювання сільськогосподарських угідь поблизу зон активних бойових дій, окупація значної території Сходу та Півдня України надзвичайно ускладнили функціонування українського аграрного сектору та зменшили кількість посівних площ. Таким чином, є нагальна потреба у розробці нових технологій, підходів та засобів для стимуляції росту та захисту сільськогосподарських культур для підтримки їх виживання та підвищення врожайності в умовах війни, а також рекреації земельних угідь, що постраждали від активних бойових дій.

Значною мірою підтримка врожайності культур забезпечується застосуванням надмірної кількості мінеральних добрив. За останні роки показник застосування азотних добрив для вирощування сільськогосподарської продукції зріс на 56%, а пестицидів – на 30%. Це з одного боку дозволяє отримувати високі врожаї, а з іншого – створює проблеми через засолення, виснаження ґрунтів, накопичення токсичних речовин, а також забруднення ґрунтових вод [1]. Використання хімічних пестицидів є стратегією швидкого знищення шкідників, однак їх надмірне використання та накопичення в ґрунтах знижує родючість ґрунту та порушує його природну мікро- та макробіоту. Зміна клімату посилює частоту абіотичного та біотичного стресу рослин, що створює ще одну проблему для





сільськогосподарського виробництва. Стресові умови призводять до економічних втрат у сільськогосподарському виробництві. Все вище перелічене зумовлює необхідність розробки альтернативних стратегій боротьби з хворобами рослин.

Створення та застосування біопрепаратів на основі мікроорганізмів, що стимулюють ріст рослин – один з найбільш ефективних прийомів підвищення продуктивності рослин та якості їх урожаю, що дозволяє зберігати природну родючість ґрунтів та екологічну рівновагу навколишнього середовища [2]. Основна біотехнологічна схема отримання таких препаратів передбачає пошук та виділення з довкілля мікробних популяцій з певними функціональними характеристиками, включаючи азотфіксацію, постачання рослин фосфором та іншими елементами, синтез фітогормонів, вплив на шкідників і т.д. Найбільш ефективними вважаються мікроорганізми, які були відселекціоновані з ризоплани або ризосфери того ж виду рослин, насіння яких піддають інокуляції [3].

Бактерії, які відносяться до PGPR або PGPB (plant growth promoting (rhizo) bacteria), в асоціації з рослинами забезпечують продукцію рістстимулюючих речовин, змінюють проникність клітин кореня, покращують мінеральне живлення рослин, пригнічують розвиток фітопатогенних мікроорганізмів і, в цілому, позитивно впливають на зростання і розвиток рослин. До даної групи бактерій ризосфери відносять і асоціативні азотфіксатори.

У цьому відношенні цікавим здається застосування молекулярних метаболомних технологій використання бактеріальних сигнальних молекул [4] або метаболітів ріст-стимулювальних бактеріальних культур, що асоційовані з рослинами.

**Метою** нашої роботи було визначення ріст-стимулювального потенціалу бактерій, асоційованих з судинними рослинами.

**Матеріали та методи.** Для досягнення мети використовували 18 хемоорганотрофних бактеріальних культур, виділених з ендо- та ризосфери судинних рослин. Ріст-стимулювальний потенціал визначали загальноприйнятими методами: визначення здатності бактерій використовувати атмосферний азот як єдине джерело Нітрогену, здатність мобілізувати нерозчинні сполуки фосфатів, синтез сидерофорів,  $-HCN$ , циклічних ліпопептидів, індоліл-3-оцтової кислоти за стандартними протоколами.

**Результати.** Всі досліджувані культури виявили ознаки ріст-стимулювальних мікроорганізмів. Найбільш поширеною ознакою було використання атмосферного азоту як єдиного джерела Нітрогену. Водночас, 6 культур проявляли здатність синтезувати індоліл-3-



оцтової кислоти. Один штам характеризували як суперпродуцента індоліл-3-оцтової кислоти.

**Висновки.** Досліджувані культури мають високий ріст-стимульовальний потенціал та можуть бути використані для розробки біопрепаратів для сільського господарства.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Bijay-Singh H. M. B., & Aziz T. Nitrogen use efficiency in crop production: issues and challenges in South Asia. *Nitrogen Assessment: Pakistan as a Case-Study*. 2021. Chapter 7. P. 127–148.
2. Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A. N., Yadav, N., Kumar, M., Kumar, V., ... & Saxena, A. K. (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101487.
3. Malik, A., Mor, V. S., Tokas, J., Punia, H., Malik, S., Malik, K., ... & Karwasra, A. (2020). Biostimulant-treated seedlings under sustainable agriculture: A global perspective facing climate change. *Agronomy*, 11(1), 14.
4. Бабенко Л.М., Щербатюк, М.М., Мошинець О.В. Косаківська І.В. Ацилгомосеринлактони бактеріального походження у біотехнології праймування рослин: досягнення і перспективи використання в аграрному виробництві. *Фізіологія рослин і генетика*. 2016. Т. 48, № 6. С. 463-474.

## ДОДАТОК В

*Лупан К. О., магістр, Калініченко О. О., аспірант, Охмат О. А., доц.  
Київський національний університет технологій та дизайну  
Застосування інноваційних підходів у сучасних агробіотехнологіях*

**Вступ.** У контексті війни в Україні та зменшення посівних площ виникла гостра потреба у підвищенні врожайності сільськогосподарських культур. Значну частку врожаїв займають зернові культури, зокрема пшениця, яка є джерелом приблизно 21% світових потреб у харчовій енергії та білку [1]. З огляду на це, важливо підвищувати врожайність пшениці, одночасно долаючи несприятливі впливи довкілля, спричинені змінами клімату, деградацією ґрунтів, а також шкідниками і хворобами. Одним із напрямків підвищення врожайності є використання агробіотехнологій, що базуються на застосуванні біостимуляторів, здатних покращувати ріст сільськогосподарських рослин, підвищувати їхню врожайність та стійкість до стресових факторів.

Одним з інноваційних напрямів розвитку агробіотехнологій вважають застосування наноматеріалів [2, 3]. Наночастки різних металів знаходять застосування як нанодобрива, нанопестициди, наногербіциди [3], наносенсори та системи доставки агрохімікатів [4]. Найбільш застосовуваними наноматеріалами є наночастки срібла (AgNPs). AgNPs відомі своїми антимікробними властивостями, що дозволяє використовувати їх для захисту рослин від патогенів.

Наночастки срібла здатні ефективно руйнувати біоплівки, утворені бактеріями, грибами або мікробними асоціаціями. Крім того, AgNPs в поєднанні з біополімерами, які виступають у ролі стабілізаторів, забезпечують поступове вивільнення срібла. Це сприяє пролонгованій антимікробній дії AgNPs, підвищує захист рослин від патогенів та забезпечує біодоступність срібла для рослин. Зокрема, екзополісахариди у поєднанні з AgNPs можуть утворювати гідрогелеві матриці, які можуть безпосередньо стимулювати ріст рослин, впливаючи на метаболізм, водний баланс і антиоксидантну активність; проникати у тканини рослини, впливати на транспорт поживних речовин, підвищувати стійкість рослин до захворювань.

AgNPs отримують за допомогою хімічних, фізичних та біологічних методів. Однак, хімічний та фізичний методи синтезу наночастинок вимагають створення спеціальних умов синтезу, застосування високовартісних та доволі агресивних відновників або розчинників, використання ультразвуку тощо. Вищезгадане робить хімічний та фізичний методи синтезу ресурсовитратними. На противагу, біосинтез («зелений» синтез) наночастинок вважають більше перспективним через низку переваг: екологічність, ресурсоощадливість, відсутність у технології токсичних або агресивних матеріалів. Для реалізації технології «зеленого» синтезу AgNPs найчастіше використовують біологічні агенти: дріжджі, бактерії та гриби [5].

Поряд з наночастиками для впливу на різні фізіологічні процеси в рослинах (наприклад, покращення фотосинтезу, стимулювання росту кореневої системи, підвищення стресостійкості в умовах посухи тощо) використовують лактони. Лактони мають широкий спектр біологічної активності, зокрема антибактеріальної, фунгіцидної, вони є інгібіторами амілази і протеази, мають регуляторну дію на проростання насіння та ріст рослин [6–8].

**Постановка завдання.** Виходячи з вищенаведеного, мета роботи полягала у дослідженні впливу наночастинок срібла та лактонів бактеріального походження на ріст сільськогосподарської культури – пшениці.

Як модельний об'єкт в дослідженні використано озиму пшеницю сорту Подолянка (різновид лютеценс). Сорт отриманий в Інституті фізіології рослин і генетики НАН Миронівському інституті пшениці ім. В. М. Ремесла НААНУ. Сорт Подолянка є середньораннім сортом інтенсивного типу, універсальним, стійким до посухи та вилягання.

Для дослідження також використано наночастки срібла, синтезовані шляхом біосинтезу за допомогою лізату штаму дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* Y-1995, вирощеному на поживному середовищі Сабуро [5]. Розмір синтезованих наночастинок, визначений методом динамічного розсіювання світла (DLS), склав менше 100 нм [9, 10]. В дослідженні також використано N-ацилгомосеринлактони (АГЛ), які відносять до класу молекул медіаторів бактеріального походження. Молекули N-гексанойл- (С6-АГЛ) та N-октанойл- (С8-АГЛ) гомосеринлактони (L та DL ізомери) отримані методом органічного синтезу в Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України.

Експериментальні дослідження передбачали обробку модельного об'єкта різними комбінаціями дослідних матеріалів. Дослідні групи обробляли:

- індивідуально N-ацилгомосеринлактонами (L6, DL6, L8, DL8);
- індивідуально наночастиками срібла (AgNPs) або нітратом срібла (AgNO<sub>3</sub>);
- комбінацією нітрату срібла з N-ацилгомосеринлактонами (AgNO<sub>3</sub>+L6, AgNO<sub>3</sub>+DL6, AgNO<sub>3</sub>+L8, AgNO<sub>3</sub>+DL8);
- комбінацією AgNPs з N-АГЛ (AgNPs+L6, AgNPs+DL6, AgNPs+L8, AgNPs+DL8).

Для експерименту сформовано 15 дослідних груп, включаючи контрольну дослідну групу.

Для реалізації експерименту попередньо очищене насіння пшениці обробляли дослідними матеріалами або їх комбінацією. Насіння у чашках Петрі витримували у термостаті за температури 25 ± 1 °С, після чого насіння висаджували в гумус у стерильних умовах. Вирощування упродовж 14 днів здійснювали у контрольованому середовищі термостату за температури 22 °С, при вологості 60 % та циклом освітлення – 16 годин світла / 8 годин темряви.

Отримані пагони пшениці та її кореневу систему досліджували як візуально, так і за допомогою хімічних, фізичних та інструментальних методів аналізу для визначення впливу застосовуваних матеріалів на ріст модельного об'єкта [11–13].

### Результати дослідження.

Після вирощування упродовж 14 днів здійснено візуальний аналіз та визначено розміри пагонів та коренів пшениці всіх дослідних груп (Табл. 1).

Таблиця 1

## Розмір пагонів та коренів пшениці

№	Дослід	Довжина, мм:	
		пагонів	кореневої системи
1	Контроль	21,5	11,8
2	AgNO <sub>3</sub>	18,0	12,8
3	AgNPs	20,6	12,6
4	L6	20,2	15,7
5	L8	20,9	15,3
6	DL6	16,7	12,4
7	DL8	18,0	10,8
8	AgNO <sub>3</sub> +L6	21,9	11,4
9	AgNO <sub>3</sub> +L8	20,8	16,8
10	AgNO <sub>3</sub> +DL6	24,1	15,6
11	AgNO <sub>3</sub> +DL8	20,3	11,0
12	AgNPs+L6	24,5	13,9
13	AgNPs+L8	<b>26,6</b>	<b>18,4</b>
14	AgNPs+DL6	25,9	14,4
15	AgNPs+DL8	20,7	16,6

У дослідних варіантах, в яких використано N-АГЛ, коренева система більш розвинена та розгалужена. У порівнянні з показниками контрольної групи також спостерігали зменшення довжини пагонів у досліді, та збільшення кореневої системи за індивідуального використання AgNO<sub>3</sub> або AgNPs. Більш значний вплив AgNPs порівняно з AgNO<sub>3</sub> на ріст пагонів і кореневої системи може бути пов'язаний з більшою ефективністю наночасток аргентуму у порівнянні з нітратом аргентуму через їх розмірність. Використання комбінації AgNPs+C8-АГЛ (варіант 13) мав найбільший вплив на ріст пагонів і кореневої системи пшениці, що вказує на потенціал цієї комбінації для стимуляції росту рослин. У порівнянні з контрольним варіантом, спостерігали збільшення довжини пагонів на 23,7 %, кореневої системи – 55,9 %; водночас комбінація з AgNO<sub>3</sub>, забезпечувала приріст на 27,9 % та 9,5 % відповідно.

Для ефективного росту рослинам необхідне забезпечення фотосинтезу – процесу перетворення енергії світла на енергію хімічних зв'язків. В клітинах рослин завжди наявні хлоропласти, які і забезпечують вказане перетворення. Хлоропласти містять два види хлорофілу – Chl a та Chl b. Ці пігменти поглинають світло в червоній і фіолетовій частинах спектру. Хлоропласт також містить каротиноїди (Car), які поглинають світло найсильніше в синій частині спектра. Для визначення вмісту каротиноїдів, Chl a та Chl b у дослідних зразках в дослідженні використали спектрофотометричний метод при довжині хвиль, нм: 441, 649, 654 та 665 [12, 13]. За отриманими даними розраховано вміст пігментів у паростках пшениці. Результати розрахунку представлені в табл. 2.

Таблиця 2

## Кількісний вміст пігментів у пагонах пшениці

№	Дослід	Кількісний вміст пігментів, мг/г:			
		Chl a	Chl b	Car	Chl a/ b
1	Контроль	0,0075	0,0129	0,0011	0.581
2	AgNO <sub>3</sub>	0,0233	0,0240	0,0190	0.971
3	AgNPs	0,0142	0,0162	0,0153	0.877
4	L6	0,0137	0,0166	0,0179	0.825
5	L8	0,0226	0,0279	0,0191	0.810
6	DL6	<b>0,0278</b>	<b>0,0369</b>	0,0107	0.753
7	DL8	0,0233	0,0274	<b>0,0297</b>	0.850
8	AgNO <sub>3</sub> +L6	0,0203	0,0222	0,0112	0.914
9	AgNO <sub>3</sub> +L8	0,0095	0,0143	0,0112	0.664
10	AgNO <sub>3</sub> +DL6	0,0148	0,0187	0,0086	0.791
11	AgNO <sub>3</sub> +DL8	0,0101	0,0168	0,0163	0.601
12	AgNPs+L6	0,0099	0,0151	0,0127	0.656
13	AgNPs+L8	0,0102	0,0234	0,0111	0.436
14	AgNPs+DL6	0,0101	0,0160	0,0127	0.631
15	AgNPs+DL8	0,0122	0,0219	0,0015	0.557

Обробка насіння індивідуально нітратом срібла спричинила трикратне збільшення концентрації Chl a у порівнянні з контрольними зразками і майже 17 кратне збільшення у зразках пшениці каротиноїдів. Це свідчить про сильний

стимулюючий вплив  $\text{AgNO}_3$  на фотосинтетичну механізм. Найвищий вміст Chl a та Chl b спостерігається в зразку, обробленому лактонами DL6 (варіант 6), а каротиноїдів – у зразку, обробленому лактонами DL8 (варіант 7). Скоріше за все, це пов'язано з впливом АГЛ на активацію антиоксидантної системи та їх фітостимулюючими властивостями.

У подальшому дослідженні визначено вміст (мг/г) у дослідних групах білка за методом Бредфорда, глюкози за глюкозо-оксидазним методом, магнію та калію методом атомно-абсорбційної спектроскопії. Дослідження здійснювали у трьох повторях проти холостої проби. Узагальнені результати дослідження представлені на рис.1.

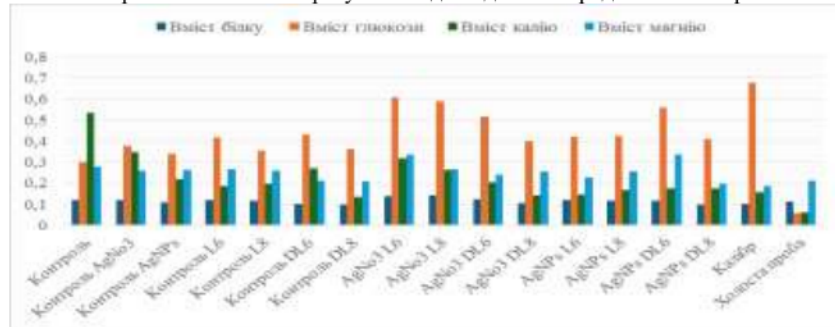


Рис.1. Вміст білку, глюкози, калію й магнію у пшениці

З рис.1 видно, що комбінація  $\text{AgNO}_3$  з лактонами L6 є найефективнішою комбінацією для підвищення вмісту білка, глюкози та магнію у пшениці; комбінація  $\text{AgNO}_3$  з лактонами L8 ефективна для підвищення вмісту глюкози та білка; комбінація AgNPs з лактонами DL6 ефективна для підвищення вмісту у пшениці білка. Вочевидь, нітрат срібла впливає на підвищення активності ферментів, відповідальних за синтез білка, а наночастки срібла та АГЛ впливають на фотосинтез, метаболізм та активацію шляхів накопичення у пагонах пшениці цукрів.

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження було виявлено, що наночастки срібла і N-ацилгломосеринлактони (L6, L8, DL6, DL8) чинять значний вплив на ріст, біометричні показники та метаболізм пшениці. Встановлено, що обробка насіння пшениці наночастками срібла в поєднанні з лактонами L8 сприяє максимальному росту пагонів і корінців, що свідчить про потенціал цієї комбінації для стимуляції розвитку рослин.

Також було визначено, що використання наночасток срібла загалом позитивно впливає на ріст пшениці, порівняно з використанням нітрату срібла, що пов'язано з більш контрольованим та цілеспрямованим ефектом наночасток. Зокрема, наночастки срібла у поєднанні з лактонами DL6 і DL8 показали значний вплив на підвищення вмісту хлорофілу a, b і каротиноїдів, що може свідчити про формування захисних механізмів у рослини.

Дослідження показало, що використання наночасток срібла та N-ацилгломосеринлактонів має значний вплив на ріст пагонів, формування кореневої системи, фотосинтетичну активність, вміст білків, глюкози, мінеральних речовин у пшениці. При цьому, найбільш ефективними комбінаціями для стимуляції росту та метаболічних процесів у пшениці були визначені  $\text{AgNO}_3$  з лактонами L6 та L8, а також AgNPs з лактонами DL6. Різний вплив окремих комбінацій метаболічні процеси пшениці, може бути використаний для цілеспрямованого регулювання росту та розвитку рослин, а також для підвищення їх продуктивності в умовах несприятливих факторів навколишнього середовища.

Таким чином, отримані результати свідчать про перспективність використання сполук срібла та N-ацилгломосеринлактонів у сільському господарстві для підвищення урожайності пшениці, що може сприяти подоланню проблем, пов'язаних зі змінами клімату, деградацією ґрунтів і зменшенням площі засіву в умовах війни.

#### Список використаної літератури

- Jasrotia P., Kashyap P. L., Bhardwaj A. K., Kumar S., & Singh G. P. Scope and applications of nanotechnology for wheat production: A review of recent advances. *Wheat Barley Res.* 2018. № 10 (1). P. 1–14.
- Mittal D., Kaur G., Singh P., Yadav K., & Ali, S. A. Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advances and future outlook. *Frontiers in Nanotechnology.* 2020. № 2, 579954.
- Jiang M., Song Y., Kanwar M. K., Ahammed G. J., Shao S., Zhou J. Застосування фітонанотехнології в сучасному сільському господарстві. *J. Nanobiotechnol.* 2021. № 19. 430.
- Singh R. P., Handa R., & Manchanda G. Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of controlled release.* 2021. № 329. P.1234–1248.
- Харченко С. І., Лазюка Ю. В., Скроцька О. І., Пенчук Ю. М. Отримання біогенних наночасток срібла з використанням дріжджів і перспективи їх застосування у протимікробній терапії. *Наукові праці НУХТ.* 2021. № 27 (3). С. 33–48.
- Badhusha M. S. M., Mohideen M. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Saccharomyces cerevisiae* with different pH and study of antimicrobial activity against bacterial pathogens. *Chemical Science Transactions.* 2016. № 5 (4). P. 906–911.
- Гордей К. Р., Золотайкіна М. Ю., Гонтова Т. М. Сесквітерпенові лактони маруни дівочої: тези доповідей Всеук. нак.-практ. конф. з міжнародною участю, присвяченої 80-річчю з дня народження доктора фармацевтичних наук, професора О.М. Гайдукевича (12-13 квітня 2018 р.) м. Харків / Нац. фармац. ун-т; редкол.: А. А. Котвіцька [та ін.]. Харків : НФаУ, 2018. С. 262–263.
- Волошанська С.Я., Косак Г.М., Скробач Т.Б., Харачко Т.І. Фармакологічні властивості Ялівцю звичайного (*Juniperus communis L.*) та екологічні особливості його поширення на Дрогобиччині. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2014. Вип. 24.4. С. 179–185.
- Лазюка Ю. В., Скроцька О. І., Харченко С. В. Спектрофотометричний аналіз наночасток срібла, синтезованих з використанням безклітинного дріжджового екстракту : *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції.* Програма та тези матеріалів X міжнародної науково-технічної конференції (9-10 листопада 2021 р). Київ : НУХТ, 2021. С. 63–64
- Lahuta L. B. et al. The size-dependent effects of silver nanoparticles on germination, early seedling development and polar metabolite profile of wheat (*Triticum aestivum L.*). *International Journal of Molecular Sciences.* 2022. № 23 (21). 13255.
- Bradford M.M. (1976) Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. *Analytical Biochemistry.* 1976. № 72. P. 248–254.
- Кисличенко О. А., Процька В. В., Журавель І. О. Дослідження фотосинтезувальних пігментів трави канни садової деяких сортів. *Актуальні питання фармацевтичної і медичної науки та практики.* 2019. № 2. С. 141–147.
- Кисличенко О. А., Процька В. В., Журавель І. О. Ідентифікація та визначення вмісту хлорофілів та каротиноїдів у листі, квітках та траві канни садової сортів «Америка», «Президент» та «Маєстро». *Збірник наукових праць співробітників НМАПО імені П. Л. Шупика.* 2018. № 30. С. 16–25.
- Bernhard Welz, Michael Sperling. Atomic Absorption Spectrometry. Authors. Publisher, John Wiley & Sons, 2008. p. 33–36.
- Okalebo J. R., Gathua K. W., & Woomer P. L. Laboratory methods of soil and plant analysis: a working manual second edition. *Sacred Africa, Nairobi.* 2002. № 21. P. 25–26.
- Flook P. Griffin, A. M. and Griffin, H. G. Computer Analysis of Sequence Data, Parts I and II. *Journal of Evolutionary Biology.* 1994. Vol. 7, №. 5. P. 628–629.