

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

УДК 635.34:581.1:661.8'62-022.532

**ПОГОДЖЕНО**

Декан факультету  
захисту рослин, біотехнологій та  
екології

\_\_\_\_\_ Коломієць Ю.В.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри  
фізіології, біохімії рослин та  
біоенергетики

\_\_\_\_\_ Прилуцька С.В.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на тему «Морфофізіологічні показники капусти городньої  
(*Brassica oleracea*) за дії вуглецевих наноматеріалів»

Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»  
(код і назва)

Освітня програма Екологічна біотехнологія та біоенергетика  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**  
**к.б.н., доцент** \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

**Ткаченко Т.А.** \_\_\_\_\_  
(ПІБ)

**Виконав** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Северін С.М.** \_\_\_\_\_  
(ПІБ студента)

**Національний університет біоресурсів  
і природокористування України**

**Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології  
Кафедра фізіології, біохімії рослин та біоенергетики  
Освітній ступінь «Магістр»  
Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Северіну Сергію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Морфофізіологічні показники капусти городньої (*Brassica oleracea*) за дії вуглецевих наноматеріалів»

керівник роботи к.б.н., доцент Ткаченко Тетяна Анатоліївна,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

2. Строк подання студентом роботи 10 листопада 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: вуглецеві наночастинки; морфофізіологічні показники сільськогосподарських культур; рослини капусти городньої (*Brassica oleracea*) сорту «Іюнська».

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- 4.1. Літературний огляд та збір інформації за темою дипломної роботи;
- 4.2. Написання основної частини;
- 4.3. Формулювання висновків та рекомендацій;
- 4.4. Оформлення дипломної роботи;
- 4.5. Перевірка дипломної роботи керівником;
- 4.6. виправлення недоліків;

#### 4.7. Захист дипломної роботи.

### 5. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|---|----------------|------------------|
|        |   | завдання видав | завдання прийняв |
| 1      | Ткаченко Т.А.                             |                |                  |
| 2      | Ткаченко Т.А.                             |                |                  |
| 3      | Ткаченко Т.А.                             |                |                  |
| 4      | Ткаченко Т.А.                             |                |                  |
| 5      | Ткаченко Т.А.                             |                |                  |
| 6      | Ткаченко Т.А.                             |                |                  |
| 7      | Ткаченко Т.А.                             |                |                  |

6. Дата видачі завдання 1 вересня 2023 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів випускної бакалаврської роботи                      | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1     | Літературний огляд та збір інформації за темою дипломної роботи; | 1.09.2023-30.11.2023          |          |
| 2     | Написання основної частини;                                      | 1.12.2023 – 28.02.2024        |          |
| 3     | Формулювання висновків та рекомендацій;                          | 1.03.2024 – 31.05.2024        |          |
| 4     | Оформлення дипломної роботи;                                     | 1.06.2024 – 31.08.2024        |          |
| 5     | Перевірка дипломної роботи керівником;                           | 1.09.2024 – 30.09.2024        |          |
| 6     | Виправлення недоліків;   | 1.10.2024 – 31.10.2024        |          |
| 7     | Захист дипломної роботи.   | 2.12. - 4.12.2024             |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Визначення впливу вуглецевих наноматеріалів на морфофізіологічні показники капусти городньої (*Brassica oleracea*)»: 83 с., 17 табл., 19 рис., 122 літературних джерела.

**Мета дослідження** - встановити вплив оксиду графену на морфофізіологічні показники капусти городньої (*Brassica oleracea*).

**Об'єкт дослідження** - морфофізіологічні показники капусти городньої (*Brassica oleracea*) за дії вуглецевих наноматеріалів

**Предмет дослідження:** пагони капусти городньої (*Brassica oleracea*), морфофізіологічні показники.

**Методи дослідження** є біологічні, фізіологічні (визначення морфофізіологічних показників), фізико-хімічні та біохімічні (аналіз вмісту пігментів хлорофілу а та b, каротиноїдів та активності каталази) та статистичні.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....  | 6  |
| ВСТУП.....   | 7  |
| ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....  | 9  |
| 1.1.    Поняття про наноматеріали .....  | 9  |
| 1.2.    Класифікація ВНМ та їх вплив на рослину .....  | 12 |
| 1.2.1.    Фулерени.....  | 12 |
| 1.2.2.    Графен .....   | 16 |
| 1.2.3.    Оксид графену (ГО; C <sub>140</sub> H <sub>42</sub> O <sub>20</sub> ) .....                            | 17 |
| 1.2.4.    Мезопористі вуглецеві наночастинки (МПВНЧ).....  | 21 |
| 1.2.5.    Вуглецеві наночастинки (ВНЧ) .....   | 22 |
| 1.2.6.    Вуглецеві наноточки (ВНТЧ) та флуоресцентні вуглецеві точки (ФВТЧ)<br>23                               |    |
| 1.2.7.    Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) .....   | 25 |
| 1.3.    Загальна характеристика капусти городньої ( <i>Brassica oleracea</i> ) .....                             | 32 |
| 1.3.1.    Загальні відомості .....   | 32 |
| 1.3.2.    Історія окультурення рослини .....   | 33 |
| 1.3.3.    Ботанічний опис .....  | 35 |
| 1.3.4.    Харчова та комерційна значимість.....  | 36 |
| 1.4.    Висновки до розділу.....   | 38 |
| РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....  | 40 |
| 2.1.    Характеристика рослинного матеріалу, передпосівна підготовка та посів.....                               | 40 |
| 2.2.    Визначення вмісту хлорофілів та каротиноїдів .....   | 42 |
| 2.3.    Визначення каталазної активності в капусті городній.....   | 44 |
| РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....  | 45 |
| 3.1.    Схожість насіння.....  | 45 |
| 3.2.    Визначення морфометричних показників .....   | 49 |
| 3.3.    Визначення вмісту хлорофілів та каротиноїдів у капусті городній <i>Brassica</i><br><i>oleracea</i> ..... | 63 |
| 3.4.    Визначення активності каталази в рослинах <i>Brassica oleracea</i> .....                                 | 65 |
| ВИСНОВКИ .....   | 67 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....  | 69 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ВНМ – вуглецеві наноматеріали

ГО – оксид графену;

ВНЧ – вуглецеві наночастинки;

МПВНЧ – мезопористі вуглецеві наночастинки;

ВНТЧ – вуглецеві наноточки;

ФВТЧ – флюоресцентні вуглецеві точки;

ВНТ – вуглецеві нанотрубки;

ОВНТ – одношарові вуглецеві нанотрубки;

ДВНТ – двошарові вуглецеві нанотрубки;

БВНТ – багатшарові вуглецеві нанотрубки;

вр – водорозчинний;

SOD – супероксиддисмутаза;

CAT – каталаза;

POD – пероксидаза.

## ВСТУП

**Актуальність:** Традиційні методи ведення сільського господарства значною мірою ґрунтуються на інтенсивному використанні мінеральних добрив і пестицидів. Хоча використання хімікатів і дозволяє підвищити врожайність, однак надмірне їх використання може погіршити якість продукції, а також завдати значної шкоди ґрунту і навколишньому середовищу.

Під час росту сільськогосподарські культури піддаються дії абіотичних і біотичних стресових факторів. Тому актуальним є пошук рішень, які допоможуть підвищити стресостійкість рослин, збільшити врожайність і підвищити якість продукції.

Перспективним напрямком є використання вуглецевих наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки, графен та фулерен. Ці матеріали мають унікальні властивості, які дозволяють ефективніше використовувати ресурси та мінімізувати шкідливий вплив на екосистеми. Вуглецеві наноматеріали можуть підвищити ефективність використання води та добрив, покращити структуру ґрунтів, а також допомогти у боротьбі зі стресовими факторами навколишнього середовища, такими як засуха чи забруднення.

Потенційний внесок сучасних нанотехнологій у сільське господарство включає:

1. Підвищення продуктивності сільськогосподарських культур шляхом використання стимуляторів росту рослин і нових добрив на основі наноматеріалів;
2. Застосування засобів захисту рослин на основі наноматеріалів [1], включаючи пестициди [2, 3] та гербіциди [4];
3. Загальне зменшення внесених агрохімікатів з використанням нанокапсульованих засобів захисту рослин та добрив із повільним вивільненням;
4. Нанотехнології для оптимізації ведення сільського господарства шляхом впровадження точного землеробства [5].

**Метою дослідження** було вивчення впливу оксиду графену на морфофізіологічні показники капусти городньої (*Brassica oleracea*).

**Об'єкт дослідження** - морфофізіологічні показники капусти городньої (*Brassica oleracea*) за дії оксиду графену.

**Предмет дослідження** - пагони капусти городньої (*Brassica oleracea*), морфофізіологічні показники

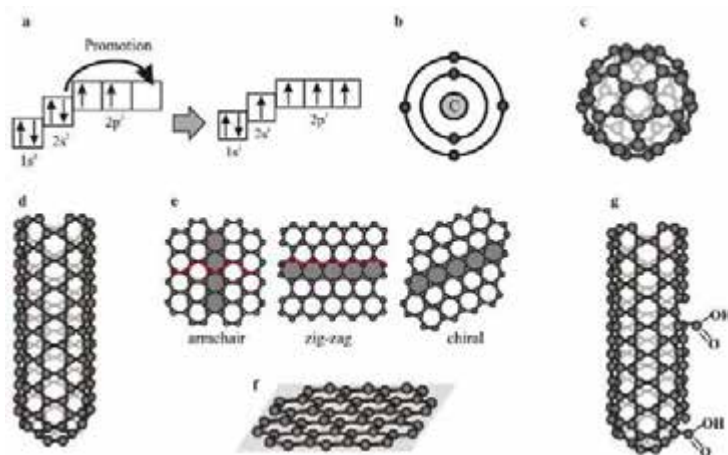
**Методи дослідження:** фізіологічні (визначення морфометричних показників), спектрофотометричні (аналіз вмісту пігментів (хлорофіл а, хлорофіл b, каротиноїди, активність каталази) та статистичні.

## ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Поняття про наноматеріали

Наноматеріали - це різні об'єкти, речовини або їх композиції, розміри структурних елементів яких знаходяться в «нанодіапазоні» від 1 до 100 нм. На такому рівні частинки набувають унікальних механічних, каталітичних, адсорбційних властивостей, оскільки їх поведінка підпорядковується законам квантової механіки, а не класичної фізики. На такому масштабі вуглецеві наноматеріали виявляють нові цікаві фізико-хімічні властивості, включаючи характерну морфологію поверхні, малу площу поверхні, підвищену хімічну реактивність тощо. Ці властивості істотно відрізняються від аналогічних у макроскопічному стані, і ці відмінності зазвичай виникають через різницю в формі агломератів, структурі поверхні та малому розмірі [6].

Вуглецеві наноматеріали набули свого поширення завдяки вуглецю, який є одним із небагатьох хімічних елементів, що здатні полімеризуватися на атомному рівні, утворюючи таким чином дуже довгі вуглецеві ланцюги. Завдяки чотирьом електронам у зовнішньому електронному полі атоми вуглецю мають валентність IV та одинарні, подвійні чи потрійні ковалентні зв'язки як між собою, так і між іншими елементами. Ці властивості атомів вуглецю можна пояснити їх особливою електронною структурою і меншим розміром порівняно з іншими елементами IV групи. Саме тому вуглець може існувати в ряді різних молекулярних форм, що складаються з одного типу атомів, але завдяки різним структурам мають різні властивості. Ці форми називаються «алотропами». З наведених вище причин наноматеріали на основі вуглецю мають різноманітні властивості і широке застосування.



**Рис 1.1.** Структура атома вуглецю та вуглецевих наночастинок. а. Електронна конфігурація атома вуглецю до і після переходу одного s-електрона; б. Схематичне зображення структури атома вуглецю з двома електронними орбітальями навколо ядра і шістьма електронами, розподіленими на них; с. Структура фулерену C<sub>60</sub>; д. Структура одношарової вуглецевої нанотрубки; е. Різні типи одношарових вуглецевих нанотрубок: кріслоподібна, зигзагоподібна і хірально; ф. Структура графенового листа; г. Структура окисленої одношарової вуглецевої нанотрубки [7].

Вуглецеві наноматеріали (ВНМ) - це штучно виготовлені матеріали (діапазон розмірів: діаметр від 1 до 100 нм і довжина від кількох мкм до мм), які можуть бути частинками, агрегатами або агломератами [8]. ВНМ поділяються на різні категорії, включаючи наноточки, нанотрубки, нанороги, фулерен, наночастинки, нанобусинки, нанофібри та нанодіаманти [9]. Найбільшого поширення набули такі ВНМ для різноманітних застосувань: фулерен (C<sub>60</sub>), карбоксифулерен, фулероли, графен, графену оксид (ГО), вуглецеві наноточки (ВНТЧ), вуглецеві нанофібри (ВНФ), флуоресцентні вуглецеві точки (ФВТЧ), вуглецеві нанотрубки (ВНТ) тощо. Список відомих ВНМ постійно зростає завдяки внескам хіміків, біологів та матеріалознавців, які синтезують нові ВНМ та відкривають їх особливі властивості та застосування. Вплив ВНМ на рослини та їх взаємодія викликають різні фізіологічні зміни в окремих видах рослин, залежно від властивостей ВНМ, таких як розмір, тип, форма, заряд, хімічний склад, реактивність, поверхня та

дозування. Ефективність певного типу ВНМ варіюється від рослини до рослини, і результат (нейтральний, позитивний, негативний) взаємодії ВНМ-рослина завжди залежить від концентрації. [9].

У численних дослідженнях повідомляється про позитивний вплив вуглецевих наноматеріалів на фізіологію рослин у багатьох аспектах, таких як стимуляція проростання насіння, індукція росту сіянців, подовження довжини пагонів і коренів, покращення біохімічного складу, підвищення активності ферментів, зміцнення захисної системи шляхом індукції генів, пов'язаних із захистом, пригнічення окислювальних ферментів, підвищення швидкості фотосинтезу та багатьох інших метаболічних процесів, що покращують продуктивність рослин. [10].

Також вуглецеві наноматеріали сприяють збереженню структури ґрунту завдяки повільному вивільненню поживних речовин, покращенню водоутримуючої здатності, підвищенню здатності утримувати поживні речовини та балансуванню рН ґрунту [11].

У багатьох дослідженнях повідомляється про здатність вуглецевих наноматеріалів проникати в рослину через кореневу систему симпластичним або апопластичним шляхом та розповсюджуватися по всій рослині через судини ксилеми. Однак окрім позитивних ефектів є повідомлення про шкідливий вплив ВНМ. Наприклад накопичення ВНМ може негативно впливати на рослини внаслідок утворення активних форм кисню, витоку електролітів, некротичних ушкоджень клітин і т.д. [12].

Саме тому необхідно проводити більше досліджень механізмів взаємодії ВНМ з рослиною. Також на разі практично не дослідженим є довгостроковий вплив вуглецевих наноматеріалів на наступні покоління культур, а також на здоров'я людей і навколишнього середовища. Також потребує уваги вплив ВНМ на мікробні спільноти ґрунту для розуміння впливу на біологічні цикли ґрунту.

## 1.2. Класифікація ВНМ та їх вплив на рослину

### 1.2.1. Фулерени

Фулерен – це молекула, що складається з 60 атомів вуглецю (C<sub>60</sub>) і має сферичну форму. Якщо до молекули фулерену приїднати n-ну кількість гідроксильних груп то утворюються полігідроксильовані фулерени (C<sub>60</sub>(OH)<sub>n</sub>), які ще називають фуллеролами або фулеренолами. Фуллероли добре розчиняються у воді та мають хорошу біосумісність, яку зручно регулювати змінюючи кількість ОН-груп у структурі молекули.

Фулерени та їх похідні мають неоднозначний вплив на рослини, який залежить від концентрації. В одному дослідженні повідомляється, що водорозчинне фулеренове малонове кислотне похідне, або FMAD C<sub>70</sub>(C(COOH)<sub>2</sub>)<sub>4–8</sub>, яке додали до середовища для пророщування гусимки звичайної (*A. thaliana*), спричинив деформацію кінчиків коренів та пригнічував подовження кореня. Цей ефект виявився залежним від концентрації (від 0,005 до 0,2 мг/мл) [13].

Це було пов'язано з втручанням у систему транспорту ауксину в кінчиках коренів, що спричинило аномалії в клітинних циклах у меристематичній зоні кореня та зниження внутрішньоклітинних реактивних форм кисню (ROS). FMAD не впливав на швидкість проростання насіння, завдяки захисними властивостями насінневої оболонки в *A. thaliana* [13].

Варто зазначити, що не всі функціоналізовані фулерени здатні стимулювати ріст рослин. Наприклад, був помічений фітотоксичний вплив карбоксифулеренів (0,01 до 0,144 мг/л) у клітинних культурах *N. tabacum in vitro*, що було пов'язано з коіндукцією окисного стресу та пошкодженням клітинної стінки [14].

В іншій роботі, де досліджувалося поглинання, передача та транспортування ВНМ в рослинах *O. sativa* попередньо обробили насіння *O. sativa* 400 мг/л фулерену (C<sub>70</sub>)-NOM (природний органічний матеріал). Автори дійшли висновку, що мобільність C<sub>70</sub> була викликана використанням NOM.

Накопичення C70 переважно відбувалося в судинній системі рослин *O. sativa* [16].

Велика кількість досліджень, зосереджених на впливі C60 на водні та наземні рослини, повідомляють про відсутність або негативні впливи C60 на ріст рослин [16]. У фрагментах *Populus deltoides*, вирощених у гідропонних умовах, додавання наночастинок фулерену (2 та 15 мг/л) до середовища для росту підвищило поглинання трихлоретилену (промислового відходо-розчинника) рослиною на 26 % та 82 % відповідно [17]. Також фулерени можуть виступати в ролі інгібітора накопичення хлорофілу та росту *Lemna gibba* [18].

Було встановлено, що при вирощуванні наземних рослин на ґрунті, обробленому фулеренами (в концентрації 500–5000 мг/кг), які використовувалися для іммобілізації пестицидів (застарілий хлордан і DDX), відбулося зменшення накопичення біомаси: спостерігалось зниження на 10 %, 40 % і 44 % у *S. lycopersicum*, *G. max* і *Z. mays* відповідно [19]. Було зафіксовано пригнічення росту коренів у *C. pepo* при використанні фулеренових наночастинок [20]. В іншому дослідженні, додавання 40 мг C60 на горщик на вермикулітовому субстраті призвело до збільшення накопичення інсектицидів на 30 %, 45 % і 62 % у *C. pepo*, *G. max* і *S. lycopersicum* відповідно. Фулерени були виявлені переважно на поверхні коренів і в їх тканинах, що свідчить про можливе спільне поглинання C60 із забруднювачами [21].

Зміна еластичності клітин *N. tabacum* під впливом водорозчинного C60 корелювала зі швидкістю проліферації клітин [22]. У гідропонно вирощених рослинах *Raphanus sativus* було виявлено поглинання і накопичення фулерену C60 в кореневій тканині (40–47%), а також транспортування його до стебел (12–16%) і листя (18–22%) [23]. Сіянци *Tectona grandis* продемонстрували підвищену здатність до засвоєння азоту з води з високим вмістом азоту при додаванні 25 мг/л C60, що також збільшило вміст поживних речовин і стимулювало ріст рослин [24]. Позитивний вплив полігидроксильованих фулеренів (ПГФ) на ріст коренів у проростках ячменю підтверджує їх

потенціал як стимулятора росту. Низькі концентрації ПГФ сприяли розширенню клітинних стінок у зонах росту, проте їх використання слід обмежити через можливі негативні наслідки від надмірного накопичення в коренях. ПГФ послаблює вплив стресу внаслідок активації антиоксидантних механізмів [25].

Було досліджено вплив C60 у порівнянні з Cd, Cu та Pb наночастинками на волоті *O. sativa*. Вміст C60 у коренях і стеблах *O. sativa* виявився значно вищим, ніж вміст металевих наночастинок. Проте, накопичення іонів металів ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ) у волотях було значно більшим, ніж концентрація C60 [26].

Було встановлено, що фулероли (розмір частинок від 0.943 до 47.2 нм) мали позитивний вплив на ріст рослин, збільшуючи біомасу до 54%. Обробка насіння фулеролами також сприяла збільшенню розміру плодів (до 20%), кількості плодів (до 59 %), ваги плодів (до 70 %) і загальної врожайності *Momordica charantia* (до 128 %). Крім того, спостерігалось підвищення вмісту інуліну (до 91 %), харантину (до 20 %), лікопіну (до 82 %) та кукурбітацину-В (до 74 %) у плодах *M. charantha*. Фулерол (у концентрації 1–1000 мг/л) полегшував негативний вплив водного стресу на проростання насіння, фотосинтез та ріст рослин *B. napus*. При водному стресі оптимальна концентрація фулеролу покращувала проростання насіння, параметри фотосинтезу, накопичення АБК та надземну біомасу, а також рівні неензиматичних антиоксидантів (зниження малонового діальдегіду (MDA) і глутатіону (GSH)) та ензиматичних антиоксидантів (каталаза (CAT), аскорбат-пероксидаза (APx) і гуаяколпероксидаза (GPx)), що знижувало окислювальні пошкодження. Вплив полігидроксильованого фуллерену-фуллеролу за попередньої обробки насіння або обприскування листя був ефективним для стимуляції росту рослин та покращення стійкості до посухи у *B. napus* L. [27].

Фулеролові наночастинки (ФНЧ)  $[(\text{C}_{60}(\text{OH})_{24})]$  можуть проникати в тканини коренів і листя рослин, де вони зв'язуються з водою в різних клітинних відсіках. Така гігроскопічна активність вказує на те, що ФНЧ можуть мати корисний вплив на низку рослин. Збільшення біомаси листя та

стебел *T. aestivum* не зазнавало змін під час інкубації з фулероловими наночастинками при різних концентраціях (0–10.0  $\mu\text{g}/\text{мл}$ ), проте подовження коренів спостерігалось при дозі 2.5  $\mu\text{g}/\text{мл}$  [28]. Також встановлено, що корені були значно більшими порівняно з контролем, коли концентрацію FNP's було підвищено до 10,0  $\text{мкг}/\text{мл}$ . Фулерол також стимулював синтез хлорофілу (у діапазоні 2,5–10,0  $\text{мкг}/\text{мл}$ ) у *T. aestivum* протягом тижневого періоду спостереження. Крім того, фуллеролові наночастинки здебільшого накопичувалися в коренях *T. aestivum* [85,68–263,86 % маси на грам тканини], у той час як у стеблах та листі вони були виявлені в менших кількостях [29].

В одному дослідженні, насіння *Z. mays*, замочили та виростили при різних концентраціях (0, 5 і 50  $\text{мкг}/\text{мл}$ ) фулеролу [ $\text{C}_{60}(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ]. В результаті не було помічено значного впливу на частоту проростання ( $76,11 \pm 0,56$ ), де контрольні зразки показали частоту проростання ( $76,67 \pm 0,96$ ) при концентрації ФНЧ 5  $\text{мкг}/\text{мл}$ . Також є повідомлення про зниження накопичення ROS і рівня MDA у *Z. mays*, підданого впливу ФНЧ за умов посухи. Фулеролові наночастинки підтвердили свою ефективність як агенти, що потенційно стимулюють захист рослин у *Z. mays* [30].

Отримані результати демонструють, що використання фулеролових наночастинок ефективно задля підвищення частоти проростання, покращення стійкості до посухи, збільшення наземної біомаси, кількості плодів, їхнього розміру та кінцевого врожаю. Відповідні дози ФНЧ збільшували накопичення абсцизової кислоти (ABA), параметри фотосинтезу, а також рівень ензиматичних і неензиматичних антиоксидантів у досліджуваних рослинах. Проте, фулерени  $\text{C}_{60}$  можуть негативно впливати на ріст рослин, хоча низькі концентрації фулеренів сприяли покращенню росту коренів у декількох рослинах. Додаткове внесення відповідної кількості фулеренів у фітореMediaційні системи може підвищити ефективність рослин у фіксації азоту та видаленні трихлоретилену (органічного забруднювача). Це дозволяє зробити висновок, що фулерени можуть стати хорошими кандидатами для використання у фітореMediaційних системах. Однак, необхідні подальші

дослідження для вивчення долі фулеренів у різних рослинних системах [17, 19, 27].

### 1.2.2. Графен

Графен, як представник родини двовимірних вуглецевих наночастинок (ВНЧ), має значний потенціал у різних сферах, включаючи наноелектронні пристрої, зберігання енергії, розщеплення води (для отримання зеленого палива — водню), прозорі провідники, біомедицину та охорону довкілля [31].

Було встановлено, що проростки *O. sativa*, вирощені на середовищі MS з додаванням графену, мали краще розвинені кореневу і надземну системи порівняно з контрольними проростками [32].

У подібному дослідженні насіння томатів, оброблене  $40 \mu\text{g mL}^{-1}$  графену в контейнерах з бавовняною підкладкою, продемонструвало збільшення частоти проростання на 26,6 % (на 2 день), 43,4 % (на 4 день) і 13,5 % (на 6 день) порівняно з контролем. Було підтверджено позитивний вплив графену на проростання насіння завдяки здатності графену перфоровати насінневу оболонку, сприяючи поглинанню води [33]. Натомість підвищення концентрації графену (5–200 мг/мл) затримувало проростання насіння *O. sativa* [34]. Інше дослідження виявило негативний вплив графену (250–1500 мг/мл) на ріст і розвиток рослин *T. aestivum* [31]. Фітотоксичність графену може призвести до комбінованого ефекту, включаючи пошкодження корневих волосків, пригнічення фотосинтезу, порушення балансу поживних речовин і окислювальний стрес. У проростків *Z. mays* сульфоновані графенові наночастинок (50 мг/л) викликали гормезисний ефект, стимулюючи ріст при низьких концентраціях і пригнічуючи при високих (500 мг/л) [35]. Також при концентрації 50 мг/л сульфоновані графенові наночастинок значно підвищували накопичення поліхлорованих біфенілів (PCB8 та PCB18) в коренях, але знижували їх кількість у стеблах і листі проростків *Z. mays* [36].

Узагальнюючи, вплив графену на обрані рослини мав залежні від концентрації результати. Хоча частота проростання безумовно підвищувалася

завдяки здатності графену транспортувати воду, при вищих концентраціях також спостерігалися негативні ефекти. Тривалість впливу графену відіграє роль у виникненні фітотоксичності у досліджуваних рослин.

### 1.2.3. Оксид графену (ГО; C<sub>140</sub>H<sub>42</sub>O<sub>20</sub>)

Графен оксид (ГО) є важливим представником сімейства графену. Він має особливий потенціал для використання в промисловості та біомедицині завдяки своїм унікальним характеристикам і 2D-структурі [37]. У рослинах використання водорозчинного графену оксиду (врГО, розчиненого за допомогою натрію як протиіону) призводило до посиленого виділення активних форм кисню (ROS), що стало основною причиною затримки росту на стадії проростання капусти, томатів, червоного шпинату та салату. Некротичні ураження та загибель клітин, викликані графен оксидом, були обумовлені розвитком оксидативного стресу через посилене виділення ROS. Автори виявили, що графен у найвищій концентрації 2000 мг/л інгібує ріст рослин (до 78%), що підтверджено зменшенням кількості листків (до 53%), площі листя (до 91%), маси коренів (до 86%), маси пагонів (до 92%) та загальної надземної біомаси (до 61%) і підземної біомаси (до 78%). Усі ці негативні ефекти виявилися дозозалежними (500–2000 мг/л ГО) [38].

Використання ГО (100–1600 мг/л) як добавки до поживного розчину сприяло позитивному впливу на здоров'я проростків *V. faba L.* при концентрації ГО 400 мг/л, що супроводжувалося значним зменшенням рівнів H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> та окислення ліпідів і білків. При концентрації ГО 1600 мг/л спостерігалось значне зниження показників росту *V. faba L.* у поєднанні з індукованим оксидативним стресом і підвищеним витоком електролітів, що негативно вплинуло на ріст проростків [39].

Ті ж дослідники оцінювали вплив ГО на *V. faba L.* і виявили наявність глутатіонового редокс-системи, що є ключовим фактором підтримки клітинного редокс-гомеостазу. Було зафіксовано дозозалежну відповідь на

стрес (порядок: 1600 > 200 > 100 мг/л ГО) у *V. faba L.*, яка супроводжувалася зменшенням активності оксидативних ферментів [12].

Автори також показали, що низькі (100 та 200 мг/л ГО) та високі (1600 мг/л ГО) концентрації ГО порушували антиоксидантний глутатіоновий метаболізм, тоді як помірні концентрації (400 і 800 мг/л ГО) збільшували глутатіоновий пул у *V. faba L.* [12].

Було встановлено, що ГО більше розподілявся в проростках *Arabidopsis* під стресовими умовами, а ГО наночастинки переміщувалися в корені, стебла та листя. Автори висунули гіпотезу, що під впливом стресу ГО може спричинити витік іонів через мембрани і оксидативний стрес, що, у свою чергу, індукує переміщення ГО від коренів до листя [40].

У дослідженні коекспозиції ГО та арсенату [As(V)], було встановлено, що ГО (0.1–10 мг/л) підвищує антагоністичний вплив арсенату на пшеницю, що значно знижує довжину пагонів, рівень хлорофілу та свіжу масу рослин. Активність супероксиддисмутази (SOD) і пероксидази (POD) також підвищувалася у залежності від концентрації [41].

В іншому дослідженні, з використанням гідратованих графенових стрічок (HGR) для проростання старого насіння *T. aestivum L.*, було виявлено, що HGR підвищували проростання насіння на 15 %, сприяли диференціації коренів на 52–59 % і підвищували стійкість до оксидативного стресу порівняно з графеном і ГО. Метаболомний аналіз показав, що HGR сприяють покращенню цілісності клітинних мембран, метаболізму амінокислот, вуглеводів та жирних кислот, а також підвищують стійкість до окислювального стресу та проникність мембран [41].

Рослини проявляли стійку активність проти транспорту ГО від коренів до верхівки пагонів, що було підтверджено моделями переміщення ГО наночастинок в *Arabidopsis* [42]. Навпаки, при експозиції диких рослин *S. lycopersicum* та відповідних трансгенних рослин до ГО (20 мг/л), у трансгенних рослин спостерігалася коротша довжина зародкового кореня порівняно з контролем. Це було пов'язано з швидким накопиченням гормону

абсцизової кислоти (АВА) у трансгенних рослинах [43]. Наночастинки ГО мали суттєвий вплив на *V. napus*. При концентрації 50 мг/л ГО спостерігалось пригнічення росту кореня та зміна біосинтезу й рівня АВА та індол-3-оцтової кислоти (ІАА) [44].

Проростки *O. sativa* були піддані впливу ГО-наношарів у концентрації 0,01–1 мг/л протягом тижня в гідропонних умовах, після чого тиждень тривала постекспозиція без ГО. Ці дослідження підтвердили значну активацію метаболізму фенілаланіну та вторинного метаболізму у коренях *O. sativa*, які піддавалися впливу ГО [45].

У дослідженні на *T. aestivum*, було застосовано ізотопне мічення для визначення вмісту графену в рослинах і виявлено, що  $^{13}\text{C}$ -ГО накопичувався у коренях пшениці у незначних кількостях. Автори відзначили, що великий розмір частинок  $^{13}\text{C}$ -ГО перешкоджав їхньому переміщенню до стебел і листя, що призвело до пригнічення росту кореневої системи, зміни ультраструктури клітин коренів та затримки росту й розвитку сіянців [46].

ГО спричинив пригнічення фотосинтезу, зменшення довжини сіянців та приросту біомаси голозерного вівса у гідропонній культурі. Токсикологічний механізм у *A. sativa* L. був пов'язаний з оксидативними пошкодженнями [47]. Концентрація ГО 5 мг/л ефективно знижує пошкодження, спричинені Су-стресом у ряски. Було встановлено, що низька концентрація ГО значно стимулює проростання цибулі та шпинату в ґрунті. Щоб прискорити проростання насіння шпинату, функціональні групи ГО, які містять кисень, накопичували воду, а гідрофобні атоми вуглецю ( $\text{sp}^{2+}$  домени) транспортували воду до насіння [48].

Дослідження на проростках кукурудзи (*Zea mays*) показало, що наночастинки ГО (100–1500 мг/л) можуть змінювати вплив  $\text{Cd}^{2+}$  на проростання насіння, ріст сіянців та поглинання  $\text{Cd}^{2+}$  у розчині через адсорбцію іонів кадмію на поверхні ГО. Ці автори встановили, що при використанні розчину з концентрацією кадмію 20 мг/л накопичення  $\text{Cd}^{2+}$  в коренях збільшувалося за наявності ГО (100–500 мг/л), тоді як за низької

концентрації кадмію (5 мг/л) ефекти були незначними. Водночас концентрації  $Cd^{2+}$  у пагонах зменшувались при використанні низької концентрації ГО (100 мг/л), а підвищувались за високої концентрації ГО (понад 500 мг/л) у розчині [49].

Недавнє дослідження продемонструвало, що вплив високих доз ГО *in vitro* погіршував показники пилку двох видів (*Corylus avellana L.* та *N. tabacum L.*) через кислотний характер ГО. Ці автори також повідомили, що проростання пилку та подовження пилкової трубки погіршувались при концентрації ГО понад 50 мкг/мл, зменшившись з 68% до 58% у *Corylus avellana L.* та з 20% до 19% у *N. tabacum L.* [50].

У *Malus domestica* результати свідчать, що застосування ГО (0,1 мг/л) мало позитивний вплив на утворення коренів, збільшуючи кількість транскриптів генів, що відповідають за виведення ауксину (PIN7, ABCB1) та надходження ауксину (LAX2, LAX3), хоча одночасно негативно впливало на ріст коренів. Кількість бічних коренів та довжина додаткових коренів значно зменшилися у відповідь на вплив концентрацій ГО (0,1, 1 і 10 мг/л). Результати також вказують на те, що обробка ГО у концентрації 0,1 мг/л сприяла утворенню додаткових коренів, однак при концентрації 10 мг/л цей процес був пригнічений. ГО підвищував рівень транскрипції та активність ферментів антиоксидантного захисту (SOD, CAT і POD) [51].

Останні результати досліджень на рисі (*Oryza sativa*) показали, що наночастинки ГО (товщиною 1–2 нм) мали значний позитивний вплив на ріст і розвиток рослин, а також на вміст ауксину, абсцизової кислоти, малонового діальдегіду та індоліл-3-оцтової кислоти і на активність ферментів SOD, CAT і POD. Всі ці ефекти виявились залежними від концентрації (5–50 мг/л ГО) та специфічними для різних сортів рослин. Високі концентрації ГО (50 мг/л) були шкідливими для рису та пригнічували ріст коренів. Середня кількість бічних коренів зросла з 7,1 до 9,3 при збільшенні концентрації ГО з 0 до 25 мг/л для сорту Shenyou9521, але зменшилась з 9,05 до 5,95 для сорту Jingchuxiang при обробці ГО в концентрації 50 мг/л [52].

Наявність графенових і ГО наночастинок заважала повному видаленню трирингованого фенантрена (PAHs) з поверхні активно зростаючих листя шпинату. Вплив ГО наночастинок на потенційну небезпеку, пов'язану з PAHs в овочах, викликає стурбованість та потребує термінової уваги з боку агрономів [53, 54].

Можна зробити висновок, що при знижених дозах наночастинки графену позитивно впливають на проростання насіння, ріст проростків і розвиток коренів у кількох видах рослин (наприклад, використання 0,01–1,0 мг/л ГО у рослин *O. sativa* або 5–50 мг/л ГО у рослинах ряски). Застосування більших доз (більше 50 мг/л) ГО зазвичай призводить до негативних ефектів у більшості рослин. Щодо механізму, було доведено, що ГО наночастинки (товщиною 1–2 нм) приносять більше корисних ефектів для росту і розвитку рослин.

#### **1.2.4. Мезопористі вуглецеві наночастинки (МПВНЧ)**

Завдяки стабільній мезопористій структурі, великій поверхні та чудовим каталітичним властивостям, мезопористі вуглецеві наночастинки, отримані з метал-органічних каркасів, мають широкий спектр застосувань, включаючи зберігання енергії, каталіз, фотодинамічну терапію та доставку ліків [55].

Останні дослідження показали, що вплив МПВНЧ (50 і 150 мг/л) на *O. sativa* спричинив негативні ефекти через зміни рівнів важливих рослинних гормонів. Токсичність, спричинена впливом МПВНЧ, залежала від розміру частинок. Ці висновки вказують на потенційний ризик МПВНЧ для сільськогосподарських та садівничих культур, підкреслюючи занепокоєння щодо можливих загроз здоров'ю людини та худоби, які можуть виникати внаслідок використання наноматеріалів і продуктів, що інтегрують наноматеріали, в садівництві та сільському господарстві [56].

### 1.2.5. Вуглецеві наночастинки (ВНЧ)

Вуглецеві наночастинки (ВНЧ) мають виняткову електропровідність, теплопровідність та чудові механічні властивості. Оскільки ВНЧ складаються з чистого вуглецю, вони мають високу стабільність, низьку токсичність, екологічні для навколишнього середовища та є гарними провідниками [57]. ВНЧ знаходять застосування у багатьох галузях біомедичної сфери, таких як доставка ліків, перенесення генів та біовізуалізація [30].

Культивування рослин *N. tabacum L.* під дією ВНЧ з концентраціями від 0 до 125 мг/горщик сприяло підвищенню росту на різних стадіях у порівнянні з ростом рослин при використанні традиційних добрив. Також застосування ВНЧ збільшує вміст азоту та калію в органах рослин *N. tabacum*. В одному дослідженні повідомляється, що вміст калію в листках *N. tabacum* збільшився на стадії зрілості, що позитивно вплинуло на споживчі якості *N. tabacum* [58].

Також був досліджений дозозалежний вплив водорозчинних ВНЧ (розмір від 20 до 50 нм) на *Triticum aestivum*. Водорозчинні ВНЧ (в середньому містили 20 % карбоксильних груп) були виділені з природних ВНЧ, присутніх у біовугіллі. Рослини пшениці (*Triticum aestivum*) обробляли водорозчинними ВНЧ (10–150 мг/л) в ґрунті протягом 20 днів, і результати показали, що оптимальний ріст пшениці спостерігався при концентрації 50 мг/л, причому довжина пагонів і коренів збільшилася втричі порівняно з контролем [59]. Було також досліджено вплив ВНЧ на фотоморфогенез і час цвітіння в *Arabidopsis thaliana*. Вивчення впливу ВНЧ на фотоморфогенез та час цвітіння в *Arabidopsis thaliana* показало, що ці частинки (при концентрації 0–500 мкг/мл) поглинаються рослиною та накопичуються в тканинах листка, що призводить до прискореного цвітіння. Це відбувається шляхом зміни як фітохрому В (PHYB), так і фотоперіодичнозалежних механізмів. Також було виявлено, що ВНЧ сприяють подовженню гіпокотилів при впливі далеких червоних, червоних і синіх світлових хвиль, завдяки гіпосенситивному ефекту, який впливає на всі три основні шляхи фоточутливості. Використання ВНЧ в культурних рослинах як *in vitro*, так і *ex vitro* може стати новим нетрансгенним

підходом для покращення якостей економічно важливих сільськогосподарських культур [9].

Отже, застосування ВНЧ сприяє індукції росту рослин та покращенню поглинання і накопичення мікро- і макроелементів, що, у свою чергу, підвищує ефективність добрив та покращує споживчі якості рослин. Наночастинки можуть бути кращим вибором порівняно з гноєм або добривами завдяки повільному і контрольованому вивільненню поживних речовин для кращого засвоєння рослинами.

#### **1.2.6. Вуглецеві наноточки (ВНТЧ) та флуоресцентні вуглецеві точки (ФВТЧ)**

Флуоресцентні вуглецеві точки (ФВТЧ), які є унікальним типом вуглецевих наноматеріалів, зазвичай представляють собою дуже дрібні наночастинки з регулярною пасивацією поверхні через різні функціональні групи. Вони мають ряд унікальних властивостей, таких як гарна розчинність у воді, легка модифікація, хімічна інертність, висока біосумісність і низька цитотоксичність. Завдяки цим характеристикам, ВТЧ мають багатоцільове застосування в хімічному сенсорюванні, фотокаталізі, фотодинамічній терапії, а особливо в біологічних додатках. Незважаючи на те, що ВТЧ широко використовуються у біовізуалізації та інших біосенсорних технологіях, їхній вплив на рослини досі вивчений недостатньо.

Після десятиденної обробки пшениці (*Triticum aestivum*) вр-вуглецевими наноточками (вр-ВНТЧ) у концентрації 150 мг/л, було зафіксовано значне збільшення росту коренів (у десять разів більше за контроль). У дослідженні на *Z. mays*, після місячної обробки в піщаному середовищі з вр-ВНТЧ (0–2000 мг/л), токсичність вр-ВНТЧ виявилася залежною від концентрації. У концентраціях 250 або 500 мг/л вр-ВНТЧ не спричиняли токсичності у *Z. mays*, проте при концентраціях 1000 або 2000 мг/л свіжу масу пагонів було знижено на 38% і 72% відповідно, а свіжу масу коренів — на 57% і 68%. Крім того, в

коренях *Z. mays* після впливу вр-ВНТЧ у концентрації 2000 мг/л значно підвищився вміст  $H_2O_2$  (у 6,5 разів більше за контроль) та рівень перекисного окиснення ліпідів (у 1,65 разів більше). Активність антиоксидантних ферментів також зростає: каталази - у 2 рази, аскорбатпероксидази - в 1,5 рази, гваяколпероксидази - в 1,9 рази, а супероксиддисмутази - в 1,9 рази. вр-ВНТЧ були виявлені у листках (мезофільні клітини) та коренях (судинні пучки, кора та клітини кореневого ковпачка), що вказує на їх системне поглинання та переміщення по рослині [11]. Листки *N. tabacum*, ін'єковані водорозчинними флуоресцентними наноточками (вр-ФВТЧ), показали підвищення фотосинтетичної активності на 18 % завдяки конверсії UV-світла у блакитне за допомогою ФВТЧ [60].

В рослинах *V. radiata* інкубація з різними концентраціями (0,1 до 1,0 мг/мл) ВТЧ стимулювала позитивні фізіологічні реакції та не викликала фітотоксичності для росту рослин. Довжини стебел і коренів демонстрували тенденцію до збільшення до концентрації 0,4 мг/мл ВТЧ. Результати конфокальної мікроскопії показали, що флуоресцентні ВТЧ переносилися судинною системою з коренів до стебел і нарешті до листків через апопластичний шлях. Дослідження "кінетики поглинання" продемонструвало значне підвищення концентрації ВТЧ протягом проростання та росту рослин. Крім того, *in vivo* візуалізація флуоресцентних ВТЧ підтвердила їх потенційне використання як вантажів або засобів доставки в рослинах завдяки їх унікальним оптичним властивостям [60].

Економічний метод синтезу високоякісних вр-ФВТЧ (середній розмір ~2,5 нм) був розроблений за допомогою гідротермальної обробки псевдостебел бананових рослин. Отримані вр-ФВТЧ не продемонстрували жодної пасивації поверхні щодо окислювальних агентів. Дослідження показали, що ВТЧ можна використовувати як флуоресцентний зонд для клітинної візуалізації  $Fe^{3+}$  [61].

У експерименті з гідропонічно вирощеним римським салатом (*Lactuca sativa*), в якому використовували різні концентрації ВТЧ, синтезованих з пилку ріпаку, було встановлено, що ВТЧ (20–30 мг/л) значно покращують

врожайність салату при зниженні вмісту нітратів. ВТЧ переносилися з розчинів живлення до судин у ксилемі, як через апопластичний, так і клітинний шляхи, разом із транспіраційним потоком. Це дослідження показало, що ВТЧ, синтезовані з пилку ріпаку, можуть служити ідеальним матеріалом для мічення клітин *in vivo*, впливаючи на процеси фізіології рослин і підвищуючи врожайність [62].

При вирощуванні проростків *V. radiata* з різними концентраціями ВТЧ (0,02–0,12 мг/мл) було виявлено концентраційно залежний ефект на ріст проростків. Розширення коренів, стебел, збільшення біомаси та вмісту вуглеводів (збільшення до 21,9%) були виявлені в проростках *V. radiata*, що піддавалися впливу ВТЧ. Подальший аналіз підтвердив, що ВТЧ можуть підвищувати активність фотосистеми (активність Rubisco і вміст хлорофілу) шляхом підвищення швидкості переносу електронів [63]. Флуоресцентні зображення показали, що всі три типи ВТЧ (ВТЧ, ВТЧ-РЕІ (модифіковані поліетиленіміном) та ВТЧ-РАА (модифіковані поліакриловою кислотою), що вплинули на сіянці *S. taxima*, могли накопичуватися в коренях і тканинах пагонів, хоча їх розподіл був різний для кожного типу ВТЧ. Усі три типи ВТЧ потенційно активують антиоксидантні захисні системи, однак така зміна була більше в коренях порівняно з пагонами [64].

Ці дослідження показали, що вр-ВНТЧ легко перетинають біологічні бар'єри в молодих рослинних саджанцях, забезпечуючи більшу кількість води та поживних речовин для підвищення росту і розвитку рослин. Ці результати відкривають нові можливості для використання ВНТЧ у візуалізації клітин і тканин рослин. Однак, оскільки молекулярний механізм індукованої токсичності ВНТЧ ще не досліджений, їх ймовірний вплив на ріст рослин, безпеку їжі та навколишнє середовище потребує подальших досліджень.

### **1.2.7. Вуглецеві нанотрубки (ВНТ)**

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) є одними з найбільш застосовуваних вуглецевих наноматеріалів. Їхні кристалічні структури дуже близькі до графіту

і складаються з атомів карбону, зв'язаних  $sp^2$  (на відміну від алмазу, де атоми карбону є  $sp^3$ -гібридизовані). Структура ВНТ безпосередньо впливає на їхні властивості, включаючи теплопровідність, електричну провідність, щільність і решіткову структуру. Різні ВНТ (ОВНТ, ДВНТ і БВНТ) мають різні властивості та потенціал для використання [65].

Насіння *Brassica juncea* та *Phaseolus mungo* нормально проростало при концентраціях 10, 20 і 40 мг/л БВНТ, що свідчить про нешкідливість вуглецевих нанотрубок [66]. Водорозчинні ВНТ продемонстрували здатність стимулювати ріст рослин *S. arietinum*, покращуючи їх здатність поглинати та утримувати воду [67].

Одношарові вуглецеві нанотрубки БВНТ демонстрували позитивні ефекти при концентрації 40  $\mu\text{g/ml}$  на проростання насіння *Lycopersicon esculantum* (var. *Arka Vikas*) та зростання рослин у порівнянні з контрольною групою [68].

Дослідження також виявили, що проростання насіння *L. esculantum* в середовищі MS (яке містить функціоналізовані COOH-БВНТ) і подальший ріст рослин у ньому забезпечують поглинання БВНТ та їх біорозподіл у коренях, листі й плодах [69].

Стимулюючий ефект БВНТ на проростання насіння та/або подовження коренів сіянців було зафіксовано також у *T. aestivum* [70]. Утворення водно-каналового білка [аквапорин (LeAqp1)] було індуковано у рослинах помідора (*Solanum lycopersicum*) БВНТ, активованими різними функціональними групами (такими як COOH- та поліетиленгліколь (PEG), у порівнянні з необробленими рослинами або рослинами, підданими впливу слабо розподілених та сильно згрупованих БВНТ [71].

Відомо, що вода сприяє транспортуванню білків, необхідних для розвитку рослин, і безпосередньо бере участь у процесах проростання насіння та поглинання води кореневою системою [72]. Було доведено, що експресія білка водного каналу (ген LeAqp2) у коренях томату (*Solanum lycopersicum*) може бути активована під впливом ВНТ у порівнянні з контрольною групою,

яка не зазнала впливу ВНТ [73]. У іншому дослідженні було виявлено підвищення експресії кількох генів, пов'язаних з впливом БВНТ (5–500 мг/мл) на клітини *N. tabacum*, включаючи аквапорин (NtPIP1), що бере участь у транспорті води, та два гени (NtLRX і CусВ), що беруть участь у поділі клітин і формуванні клітинної стінки [74].

Генерація активних форм кисню (АФК), оцінена за допомогою тесту з дігідродихлорофлуоресцеїновим діацетатом (DCFH-DA), детекції перекису водню з використанням 3-3' діамінобензидину (DAB) і забарвлення нітроблакитним тетразолієм (NBT), підтвердила присутність АФК у листі червоного шпинату (*Amaranthus tricolor L.*), вирощеного з БВНТ [38].

У дослідженні рису (*Oryza sativa*) було виявлено, що застосування ВНТ у концентраціях від 0 до 100 мкг/мл сприяло збільшенню довжини стебла та кореня проростків рису. Загальне стимулювання росту у присутності ВНТ було пов'язано з підвищенням поглинання поживних речовин через покращення транспорту води завдяки БВНТ. Коли концентрація була збільшена до 150 мкг/мл, активність коренів, довжина коренів і довжина стебел зменшились у порівнянні з концентрацією 100 мкг/мл. Результати показали, що ВНТ можуть сприяти проростанню насіння *O. sativa* і зростанню коренів при низьких концентраціях, але можуть мати фітотоксичні ефекти при високих концентраціях. [75].

Було досліджено *T. aestivum* та *Medicago sativa* з метою виявити ефекти БВНТ (промислового класу) та їхніх домішок на проростання насіння. Наноматеріал був активований за допомогою наночастинок Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Було виявлено адсорбцію ВНТ на поверхні коренів, що призводило до суттєвого подовження кореня у люцерни та пшениці, хоча з обмеженим поглинанням і переміщенням БВНТ [76].

На противагу цьому, було відзначено покращення росту рослин у помідорів при використанні ВНТ. За допомогою аналітичних методів було встановлено, що ВНТ (10–40 мкг/мл) можуть проникати через товсту оболонку

насіння і сприяти поглинанню води всередині насіння, що позитивно вплинуло на зростання сіянців *L. esculantum* [77].

Також є повідомлення, що БВНТ збільшують ріст рослин не тільки шляхом зміни водного балансу, але й позитивно впливаючи на експресію генів у *L. esculantum* і *N. tabacum* [69, 73, 74,]. Було доведено, що низькі дози різних типів ВНТ проникають крізь оболонки насіння і стимулюють їхнє проростання та ріст рослин [78].

За допомогою ПЛР-аналізу, імуного фарбування та електронної мікроскопії було виявлено, що ОВНТ внаслідок проникнення та накопичення у коренях *Z. mays* можуть змінювати експресію генів, які контролюють розвиток первинного кореня та ріст кореневих волосків. Було встановлено, що ОВНТ позитивно впливають на розвиток первинного кореня, але негативно на ріст кореневих волосків. У сіянцях томату присутність БВНТ у живильному середовищі призвела до підвищення вмісту Са і К у рослинах порівняно з контрольною групою [79].

Було досліджено вплив вуглецевих нанотрубок на рослини на молекулярному рівні. Було встановлено, що довжина та діаметр ОВНТ є обмежуючими факторами для їх проникнення в клітинні стінки рослин. Наноматеріали меншого розміру можуть дифундувати і витікати, в той час як більші можуть залишатися зовні клітини або бути іммобілізованими, навіть якщо їм вдається проникнути через стінку клітини [80].

Було досліджено вплив ВНТ на різні овочі, такі як *L. esculentum* (помідори), *Allium cepa* (цибуля), *R. sativus* (редиска) та *Brassica rapa* (гірчиця). Виявлено, що при концентраціях 10–40 мг/мл ВНТ покращують процес проростання *L. esculentum* та *Allium cepa* більш суттєво, ніж у *B. rapa* та *R. sativus*. Найвищий відсоток проростання досягав 95% для *Allium cepa* і 8% для *L. esculentum*. У той же час контроль для *R. sativus* показав максимальний відсоток проростання (96 %) в лабораторних умовах. Проростання і ріст *B. rapa* не змінилися суттєво. Однак при концентрації 40 мг/мл ВНТ викликали негативні та токсичні ефекти на проростання насіння *R. sativus* та *Allium cepa*

[81]. Було встановлено, що використання БВНТ сприяє збільшенню надходження мінеральних поживних речовин (Ca та Fe) до сіянців *Z. mays* завдяки дії протилежних сил надходження води та її утримування в середовищі перехідними дипольними взаємодіями між іонами та ВНТ [82].

Було досліджено кореляцію між поглинанням БВНТ і пошкодженням ДНК в клітинах *A. cepa* [83, 84, 85]. Останні дослідження на фініковій пальмі (*Phoenix dactylifera L.*) показали, що БВНТ можуть проникати через рослинні тканини і потрапляти всередину клітин. ВНТ сприяють адсорбції поживних речовин і їх транспортуванню в рослинні тканини, проте поживні речовини, що містять натрій, можуть бути заблоковані ВНТ і не потрапляти в клітини рослин [86].

Було продемонстровано, що обробка БВНТ у низьких концентраціях здатна стимулювати стійкість сіянців *Cucurbita pepo L.* до посушливих умов, покращуючи поглинання води та активуючи захисну систему рослини [87]. У *Triticum aestivum L.* (пшениця м'яка) БВНТ сприяли збільшенню розміру ксилеми і флоєми, кількості епідермальних клітин, щільності продохів, кількості зерен, біомаси та поглинання води [88].

Крім того, БВНТ збільшували кількість вузлів і підвищували функціонування нітрогенази. Генетичний аналіз показав, що збільшення кількості вузлів при використанні БВНТ було пов'язане з активацією кількох генів, залучених у сигнальні шляхи. Особливо відзначено значне підвищення експресії гена NIN, який контролює формування вузлів на початковій фазі нодуляції [89].

Також встановлено, що БВНТ сприяли збільшенню врожайності у гідропонно вирощених рослинах *L. esculentum* (томати). Поглинання БВНТ через плоди томатів суттєво впливало на загальний вміст метаболітів плодів, що було підтверджено за допомогою ВЕРХ-ГХ (HPLC-MS) [90]. Виявлено, що вплив БВНТ на параметри росту та накопичення важких металів у сіянців значно залежить від типу важкого металу, концентрації БВНТ та виду рослин [91].

Дослідження впливу БВНТ на суспензійні культури *O. sativa* виявили збільшення утворення ROS, що супроводжувалося зниженням життєздатності клітин [92]. Здатність ОВНТ проникати через клітинну стінку та мембрану рослинних клітин була вивчена за допомогою конфокальних флуоресцентних зображень, які підтвердили поглинання клітинами кон'югатів ОВНТ/ДНК та ОВНМ/ізотіоціанату флуоресцеїну. Ці дослідження показали великий потенціал ОВНТ як нанотранспортерів для клітин з клітинними стінками, здатних доставляти різні речовини в органели клітин [93]. Вплив БВНТ на фенотипи рослин призвів до уповільнення росту *G. max* [94].

ОВНТ відомі своєю фітотоксичністю для *Arabidopsis* і *O. sativa*, що викликало загибель близько 25% протопластів протягом 6 годин [95]. Інші дослідники повідомляють про інгібування росту та загибель клітин у рослин *Amaranthus tricolor* L., вирощених на гідропонних умовах протягом двох тижнів під впливом БВНТ. Було виявлено негативний вплив БВНТ на морфологію листя та коренів червоного шпинату. Показники токсичності наночастинок, такі як ROS і пошкодження клітин, значно зросли через два тижні після впливу. Ці шкідливі ефекти успішно усувались при додаванні вітаміну С ( $C_6H_8O_6$ ), що вказувало на роль ROS у токсичності, викликаній БВНТ. Передбачалося, що основним механізмом токсичності було окислювальне навантаження у рослин. Пошкодження мембран і загибель клітин *Amaranthus dubius* пов'язували з проникненням БВНТ у клітини рослин [96].

Після 15 днів гідропонної культури значно скоротилася довжина кореня та пагона *L. sativa* при впливі концентрацій 1000–2000 мг/мл БВНТ. Також було зафіксовано зниження фотосинтезу, транспірації та провідності продохів у *A. thaliana* під впливом ВНТ (25 мкг/мл) порівняно з контролем, а втрата вуглецю скоротилася на 15%. Водночас точка компенсації вуглекислого газу в рослинах, вирощених у присутності ВНТ, була значно вищою, ніж у контрольних. Маса сухої речовини не зазнала значних змін у рослинах як з ВНТ, так і без них. Також спостерігалось зниження хлорофільної флуоресценції на 11% у

рослинах, вирощених у присутності ВНТ, порівняно з контролем, що вказувало на токсичність ВНТ для *A. thaliana* на рівні цілої рослини [97].

Низькі концентрації БВНТ сприяли позитивному впливу на ріст рослин броколі (*Brassica oleracea* var. *italica*), що відкриває нові перспективи для сільського господарства та садівництва, особливо в умовах стресу [98]. Дослідження показало, що під впливом БВНТ рух пірену від кореня до пагона в рослинах огірка (*Cucumis sativus* L.) посилюється, що пов'язано з можливістю зміни циркуляції аналізованих речовин в присутності БВНТ [52].

Інші дослідження вказали, що концентрація 50 мг/мл БВНТ може мати як позитивний вплив на кількість бічних коренів і фотосинтез, так і фітотоксичний вплив на ріст коренів *A. thaliana* [99]. Виявлення БВНТ у різних органах рослин, підкреслює важливість оцінки ризиків для рослин, забруднених наноматеріалами, які потрапляють у харчовий ланцюг [100].

Було встановлено, що БВНТ негативно впливали на проростання насіння *C. pepo* L. та сповільнювали ріст проростків як за умов водного стресу (~1,5 МПа), так і при нормальному зрошенні (0 МПа) [101]. В умовах гідропоніки у *Brassica oleracea* було виявлено, що виробництво біомаси рослин залежало від концентрації карбамазепіну, а обробка функціоналізованими карбоксильними ВНТ (концентрація 50 мг/мл) значно покращувала ріст рослин [102]. Для вивчення впливу поглинання БВНТ на салат-латук (*Lactuca sativa*), було застосовано як первинні (p)-БВНТ, так і функціоналізовані карбоксильні (c)-БВНТ (концентрація 20 мг/мл), використовуючи розроблений підхід з аналізу за допомогою спектроскопії, що підтвердив наявність БВНТ у тканинах листя, стебел і коренів *L. sativa* [103]. Для стимуляції росту проростків *O. sativa* було висунуто гіпотезу про можливий зв'язок між рослинними гормонами і ROS під дією ВНТ [62].

Вплив ОВНТ і БВНТ показав негативний ефект у *A. thaliana*, що виявлявся у конденсації хроматину, агрегації клітин, зниженні сухої маси клітин, накопиченні  $H_2O_2$ , зниженні життєздатності клітин, активності супероксиддисмутази та вмісту хлорофілу [104]. Було доведено, що індукована

фітотоксичність БВНТ пов'язана з окислювальним стресом і порушенням мікроелементного гомеостазу [105].

Більшість зазначених досліджень показали, що низькі концентрації ВНТ сприяли покращенню проростання насіння, прискоренню вегетативного росту та підвищенню врожайності плодів/насіння. Проте, збільшені дози ВНТ призводили до зниження цих показників, що підкреслює важливість правильного дозування у подібних експериментах.

### **1.3. Загальна характеристика капусти городньої (*Brassica oleracea*)**

#### **1.3.1. Загальні відомості**

Капуста городня, або *Brassica oleracea*) належить до родини хрестоцвітих (*Brassicaceae*), яка включає в себе кілька підвидів, таких як білоголова капуста, червоноголова капуста, цвітна капуста, броколі, брюссельська капуста та інші.



**Рис. 1.2.** Капуста городня. Джерело: [106]

Капуста є однією з найпоширеніших овочевих культур у світі, завдяки своїй високій харчовій цінності, стійкості до кліматичних умов і можливості тривалого зберігання [107].

Зазвичай качан капусти важить від 500 до 1 000 грамів. Найпоширенішою є зелена капуста з гладким листом і твердим качаном, рідше

зустрічаються гладколиста пурпурова і складчаста савойська капуста обох кольорів. За умов довгих сонячних днів, як у північних широтах влітку, капуста може вирости досить великою. Станом на 2012 рік, найважча капуста важила 62,71 кілограма.

Качани зазвичай збирають у перший рік життєвого циклу рослини, але рослинам, призначеним для отримання насіння, дозволяють рости другий рік і їх слід утримувати окремо від інших хрестоцвітих культур, щоб уникнути перехресного запилення. Капуста схильна до кількох дефіцитів поживних речовин, а також до численних шкідників, бактеріальних і грибкових хвороб [108].

### **1.3.2. Історія окультурення рослини**

Більшість науковців вважають, що дика капуста є предком сімейного дерева, яке привело до розвитку приблизно 400 сортів *Brassica oleracea*. Хоча серед вчених досі існують значні розбіжності щодо того, як саме виникли всі сучасні капустяні овочі, є багато згадок про ці овочі в писемних джерелах, що датуються кількома століттями тому. Їхня таксономія також є предметом значних дискусій і вважається нестабільною. Загально визнано, що існує шість основних видів овочевих *Brassica*. Три з них є моногеномними, а три — амфідиплоїдними (тобто диплоїдними для двох геномів, кожен з яких спочатку був отриманий від різних видів) [109].

Дикий предок капусти ймовірно був прибережною рослиною північноєвропейського або середземноморського походження. Усі сучасні дикі види капусти зустрічаються на скелях і скелястих острівцях у досить ізольованих місцях. Дикі сорти *Brassica oleracea* досі ростуть як багаторічні рослини вздовж узбережжя північної Іспанії, західної Франції, а також південної та південно-західної Британії. З часом було створено близько 400 сортів, серед яких капуста, кольрабі, ріпак, брюссельська капуста, цвітна капуста та броколі. Капусту не їли ані євреї, ані єгиптяни. Жоден із

хрестоцвітних овочів не згадується в Старому Завіті, а єдина хрестоцвіта рослина, згадана в Новому Завіті (Марк 4:30–32) - це гірчичне зерно. Однак давні римляни та греки добре знали капусту та цвітну капусту й вірили, що споживання капусти під час бенкету допомагає уникнути сп'яніння.

Вживання капусти в їжу обговорювалося в творах Піфагора, Діогена та Катона, серед інших. Наприклад, Катон рекомендував капусту в раціоні для профілактики хвороб і продовження життя, і стверджував, що завдячує своїми 28 синам капусті. У середньовіччі капустяні компреси використовували для лікувальних цілей, а капусту застосовували для приготування сиропу від кашлю та пов'язок для ран. У 1700-х роках капусту використовували на кораблях завдяки її вмісту вітаміну С та застосовували як пов'язки для боротьби з гангrenoю [110].

Броколі (від італійського «brosso», що означає рука або гілка) вважається нащадком дикої капусти, яка походила з прибережних регіонів Європи і поширилася через Близький Схід до Сходу приблизно 2000–2500 років тому. Деякі дослідники вважають, що перше одомашнення та вирощування броколі (щось подібне до сучасної броколі) відбулося в Італії за часів Стародавнього Риму. Овоч, імовірно броколі, був описаний римським ботаніком Плінієм (I століття н.е.). Однак немає єдиної думки щодо перекладу старовинної назви «сума», і є побоювання, що ранні ботаністи могли плутати броколі та цвітну капусту, як ми їх знаємо сьогодні. Інші дослідники припускають, що перше одомашнення броколі могло відбутися в Малій Азії, а культивовану форму принесли до Італії ранні торговці в 1500-х роках. Проте достеменно відомо, що броколі (також відома на той час як італійська спаржа або проростаюча броколі) була завезена до Англії близько 1720-х років [111].

До кінця 1700-х років броколі була завезена до американських колоній, де її вирощували італійські іммігранти на східному узбережжі США, але вона залишалася маловідомою до 1920-х років. У 1912 році насіннева компанія Stokes завезла насіння броколі до США і почала продавати його виробникам у 1918 році. У 1923 році компанія D'Arrigo Brothers ініціювала польові

випробування в Каліфорнії, і до 1925 року почала відправляти рефрижераторні вагони з броколі назад на східне узбережжя [112].

### 1.3.3. Ботанічний опис

У дворічних видів протягом першого року життя утворюється низьке стебло і значна кількість листків, зібраних в щільний гладкий качан; на другий рік розвивається квітконос до 1,5 метра заввишки.



**Рис. 1.3.** Капуста городня (білокачанна). Джерело: [113]

Листя капусти городньої великі, м'ясисті, стеблові, черешкові або сидячі. Залежно від виду і сорту мають різну форму та розмір. Колір від білого, жовтого, рожевого до сизо-зеленого або фіолетового. За формою - ліроподібне, округле, довгасте, просте або гофроване, цілокрає або розсічене. Зібране в міцну або рихлу головку, або пишну розетку. Коренева система стрижнева. Рослини капусти розвивають досить велику, добре розгалужену кореневу систему. При безрозсадному вирощуванні формується головний корінь, який проникає в ґрунт на глибину 150-180 см. При розсадній культурі, внаслідок обриву кореневої системи при пересаджуванні рослин, формується мичкувата коренева система. Окремі корінці її проникають у ґрунт на глибину до 100-130 см. Основна маса кореневої системи капусти розміщується на глибині до 60-80 см і в діаметрі до 120-140 см [114].

Квітки утворюють суцвіття - видовжені китиці або щитки. Насіння округлої форми, зі слабодрібновиїмчастою поверхнею, від коричневого до чорного забарвлення, блискуче, дрібне (діаметр 2-2,5 мм). Маса 1000 насінин становить від 2,5 до 5 г. У 1г міститься 250-300 шт насіння. Квітки капусти білі або світло-жовті, двостатеві, середнього і великого розмірів (діаметр 1,8-2,8 см), рідше дрібні, мають 6 тичинок (2 зовнішні короткі, 4 внутрішні довгі) і маточкою, віночок з 4 пелюсток. Пелюстки гладкі або різною мірою гофровані, оберненояйцеподібної форми з відгином. Відгин пелюстки від округлої до вузько еліптичної. Плоди – довгі стручки з коротким товстим носиком [115].

#### **1.3.4. Харчова та комерційна значимість**

Капуста є важливою продовольчою культурою з високим попитом як на внутрішніх, так і на міжнародних ринках. Її використовують у свіжому вигляді, для приготування страв, а також у переробленому вигляді (соління, консервування).



**Рис. 1.4.** Технологія вирощування капусти городньої. Джерело: [116]

Велике значення капуста має і в агротехнічних системах завдяки своїй здатності покращувати структуру ґрунту. Капусту застосовують в офіційній та народній медицині, кулінарії та косметології. Відходи її переробки та кормові сорти є важливим кормом для тварин. Декоративні сорти використовуються для прикрашання клумб [117].

Капуста городня може застосовуватися як лікарська рослина для профілактики і лікування хвороб. Капуста є цінним джерелом корисних речовин для людського організму, а її склад змінюється залежно від виду. Листя містить 1,2-2,4 % білків, 2-5 % цукрів, а також такі органічні кислоти, як лимонна, яблучна, кавова, янтарна, глюкуронова, мурашина, хлорогенова, тартронова та феролова. У ній також є вітаміни С, Н, Е, В1, В2, В6, фолієва, пантотенова та ніотинова кислоти, каротин, близько 1 % клітковини, жири й амінокислоти (лізин, триптофан, гістидин, метіонін, тирозин).

Капуста багата на мікро- та макроелементи. Вона містить 180-380 мг% калію, близько 50 мг% фосфору, а також магній, натрій, сірку, залізо, свинець, олово, срібло, нікель, молібден, ванадій і титан. Важливо зазначити, що основна частина вітаміну С у капусті представлена аскорбігеном – речовиною, яка практично не руйнується під час термічної обробки та подрібнення. Капуста є стійкою до холоду культурою, та найкраще росте за температури в діапазоні 15–20 °С. Холодостійкі сорти можуть витримувати короточасні зниження температури до 4 °С, а рослини броколі та цвітної капусти добре розвиваються при слабких заморозках. Майже всі капустяні культури втрачають якість за температури вище 26–27 °С. При зрошенні врожай броколі можна збирати через 10–15 тижнів після прямого висіву, капусту - через 13–17 тижнів, а цвітну капусту - приблизно через 13–16 тижнів, залежно від температури та клімату. Овочі родини капустяних можна вирощувати на різних типах ґрунту, і крім прямого висіву, багато культур зараз вирощують із розсади в теплицях. Усі капустяні овочі тією чи іншою мірою схильні до одних і тих самих хвороб і шкідників, наприклад чорна гниль [118].

Хоча деякі капустині культури не потребують охолодження після збору врожаю, однак броколі та цвітна капуста потребують негайного охолодження до 4 °С. Ці культури зазвичай гідроохолоджуються або занурюються в льодяну кашку. Вони повинні зберігатися в холодильнику для транспортування та зберігання. Термін зберігання броколі складає близько 2 тижнів, цвітної капусти - до 4 тижнів, а для деяких сортів капусти, вирощених у прохолодному кліматі, термін зберігання може досягати 6 місяців [119].

Станом на 2020 рік, світове виробництво капусти становило 71 мільйон тонн. Найбільшим виробником був Китай, який за рік зібрав 33, 8 мільйонів тон, що сягає 48% від загального світового виробництва. Україна в тому ж році виробила лише 1.8 мільйонів тон [120].

#### **1.4. Висновки до розділу**

Проаналізовано літературу стосовно використаних у дипломній роботі рослин, основні типи вуглецевих наноматеріалів та їх впливу на різні сільськогосподарські культури, зокрема на капусту городню, а також досліджено ботанічну характеристику, господарське та економічне значення капусти городньої.

Наноматеріали на основі вуглецю мають суттєві перспективи щодо використання їх у рослинництві. Різні вуглецеві наноматеріали, такі як вуглецеві нанотрубки, фулерени, графен, можуть використовуватись для покращення проростання насіння, розвитку кореневої системи рослин, підвищення їх врожайності та стресостійкості. Зважаючи на повідомлення про токсичний вплив наночастинок вуглецю, зокрема у високих концентраціях, додаткових досліджень потребують питання взаємодії кожного типу вуглецевого наноматеріалу (з підбором відповідної дози і способу застосування) із конкретними видами сільськогосподарських культур для впровадження їх на комерційному рівні.

Зростання інтенсивності сільськогосподарського виробництва на обмежених площах з мінімальним впливом на навколишнє середовище - це

головний виклик найближчого майбутнього, з урахуванням постійного зростання кількості населення світу. Можливі напрямки застосування нанотехнологій у рослинництві включають:

1. Підвищення продуктивності сільськогосподарських культур за допомогою стимуляторів росту та нових нанодобрив;
2. Застосування наноматеріалів у засобах захисту рослин, включаючи пестициди та гербіциди;
3. Загальне зменшення використання агрохімікатів за рахунок нанокапсульованих засобів захисту рослин та добрив з повільним вивільненням;
4. Впровадження точного землеробства за допомогою нанотехнологій.

## РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Характеристика рослинного матеріалу, передпосівна підготовка та посів

Матеріалом дослідження була капуста городньої (*Brassica oleracea*) сорту Іюнська надзвичайно рання (рис. 2.1.а.) на стадії 2 листків (20 день з моменту висадки в ґрунт). Рослини висівалися на універсальний субстрат від виробника Peatfield (рис. 2.1.б.) Рослини вирощували за кімнатної температури в межах 18-25 °С з природнім освітленням.



**Рис. 2.1.** а - насіння капусти городньої сорту "Іюнська"; б – універсальний субстрат Peatfield.

Насіння округлої форми, зі слабодрібновиїмчастою поверхнею, від коричневого до чорного забарвлення, блискуче, дрібне (діаметр 2-2,5 мм).

Для проведення передпосівної обробки насіння було використано наступні препарати та розчини: 3 % розчин пероксиду водню ( $H_2O_2$ ); 0,006 % розчин борної кислоти ( $H_3BO_3$ ); колоїдний розчин оксиду графену (розведення з концентрацією 20 мкг/мл; 50 мкг/мл та 70 мкг/мл).

Передпосівна обробка насіння проходила в кілька етапів:

- 1) Спершу було проведено стерилізацію насіння всіх дослідних груп в 3% розчині  $H_2O_2$  протягом 7 хв з подальшим трьохразовим промиванням дистильованою водою (рис. 2.2.а.)
- 2) Наступним було замочування насіння всіх дослідних груп у 0,006 % розчині  $H_3BO_3$  протягом 20 хв.
- 3) Далі насіння трьох дослідних груп (по 20 мл розчину на групу) капусти було замочено в розчинах оксиду графену з концентраціями 20 мкг/мл; 50 мкг/мл та 70 мкг/мл протягом 2 годин 45 хвилин (рис. 2.2.б.).
- 4) Насіння контрольної групи та трьох інших дослідних груп було замочене в дистильованій воді (100 мл) протягом 2 годин 45 хвилин.



**Рис. 2.2.** а - обробка насіння розчином перекису водню; б - замочування насіння в розчинах оксиду графену.

Насіння було висаджено в 7 лотків (по 6 насінин в одну лунку): 1 лоток (1 група) – контрольна група; 2,3,4 лоток (2,3,4 дослідні групи) - насіння з

попереднім замочуванням в розчинах оксиду графену 20, 50, 70 мкг/мл відповідно; 5,6,7 лоток (5,6,7 дослідні групи) – насіння без попереднього замочування, але з подальшим поливом розчинами оксиду графену з концентраціями 20, 50, 70 мкг/мл відповідно (рис.2.3. ).



**Рис. 2.3.** Підготовка субстрату для посіву.

Всі дослідні групи поливалися протягом 20 діб водою. Дослідні рослини 5,6,7 дослідних груп додатково на 5-тий і 10-тий день після проростання було оброблено шляхом поливу розчином оксиду графену з концентраціями 20, 50, 70 мкг/мл відповідно по 5 мл розчину на одну лунку (6 рослин).

На 20-тий день після проростання було проведено оцінювання схожості насіння, а також проведено морфометричну оцінку рослин з визначенням таких показників як: довжина рослини, довжина стебла, довжина кореня, довжина листків, маса рослини, маса стебла і маса коренів.

Наступним етапом дослідження було визначення вмісту пігментів хлорофілів а і b та каротину, а також визначення активності каталази.

## **2.2. Визначення вмісту хлорофілів та каротиноїдів**

Об'єктом дослідження було обрано пагони капусти городньої. Визначення вмісту хлорофілів а і b та каротину проводилося

спектрофотометричним методом. Для виділення пігментів з рослин капусти використовувався 96% розчин етанолу.

Кількісний аналіз було проведено за такою методикою: наважку 0,1 г (100 мг) нарізаної шматочками рослинної сировини розтирали в ступці з додаванням невеликої кількості кальцію карбонату  $\text{CaCO}_3$  (на кінчику шпателя) до утворення гомогенату. Потім було додано 2-3 мл 96% розчину етанолу, суміш ретельно розтиралася протягом 3 хв. Отриманий гомогенат за допомогою лійки та фільтрувального паперу було відфільтровано в пробірку. Вміст пробірки після цього було доведено до 10 мл етиловим спиртом. Загалом було отримано 7 зразків (по одному зразку з кожної дослідної групи).

Концентрації хлорофілів а і b та каротиноїдів визначали шляхом вимірювання оптичної густини за допомогою спектрофотометра UVmini-1240, для чого використовували довжини хвиль, що відповідають максимумам поглинання пігментів у даному розчиннику: для хлорофілу а –  $\lambda=665$  нм, для хлорофілу b –  $\lambda=649$  нм, а для каротиноїдів –  $\lambda=441$  нм. Розчином порівняння був 96 % етанол. Концентрації хлорофілів та каротиноїдів розраховували за відповідними формулами:

$$C_{\text{хл.а}} = 13,7 \cdot A_{665} - 5,76 \cdot A_{649}, \quad (2.1.)$$

$$C_{\text{хл.б}} = 25,8 \cdot A_{649} - 7,6 \cdot A_{665}, \quad (2.2.)$$

де –  $A_{644}$  – оптична густина розчину за довжини хвилі 644 нм;

$A_{662}$  – оптична густина розчину за довжини хвилі 662 нм.

$$C_{\text{кар}} = 4,695 \cdot A_{441} - 0,268 \cdot (C_a + C_b), \quad (2.3.)$$

де –  $A_{441}$  – оптична густина розчину за довжини хвилі 441 нм;

$C_a + C_b$  – сумарний вміст хлорофілів а та b в розчині, мг/л.

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

$$X = \frac{V \cdot C}{m \cdot 1000}, \quad (2.4.)$$

де V -об'єм спиртової витяжки, мл;

C – концентрація хлорофілу у спиртовій витяжці, мг/л;

$m$  – маса наважки сировини, г [121].

### 2.3. Визначення каталазної активності в капусті городній

Каталаза дуже чутлива до підвищеної температури тому в ході дослідження всі маніпуляції необхідно проводити швидко і не допускаючи підвищення температури рослинних зразків. Для досягнення вказаних умов рослинні зразки, ступки, фосфатний буфер та інші матеріали та обладнання було попередньо охолоджено в холодильнику.

Для приготування клітинного екстракту наважку 0,5 г капусти розтирали в ступці з додаванням 5 мл фосфатного буферу. Ступку при цьому необхідно тримати на холодоагенті. Отриманий гомогенат переносили в епіндорф та відцентрифугували впродовж 10 хвилин при 3 тис об/хв. Далі у пробірки додавали по 1 мл пероксиду водню та 100 мкл супернатанту, а в контрольну пробу замість супернатанту додавали 100 мкл дистильованої води. Пробірки інкубували на водяній бані при температурі 37° С протягом 10 хвилин, після чого реакцію зупиняли шляхом додавання 1 мл молібдату амонію. Вміст пробірок знову центрифугували протягом 10 хвилин при 3 тис. об/хв, після чого інтенсивність забарвлення надосаду вимірювали за допомогою спектрофотометра UVmini-1240, при довжині хвилі 410 нм. Активність каталази розраховували за відповідною формулою:

$$E = (A_{\text{хол}} - A_{\text{досл}}) \cdot V \cdot t \cdot K/m, \quad (2.5.)$$

де  $E$  – активність каталази (мкат/мг);

$A_{\text{хол}}$  - екстинція холостої проби;

$A_{\text{досл}}$  – екстинція дослідної проби;

$V$  – обсяг внесеної проби;

$t$ - час інкубації;

$m$  – маса тканини при внесенні проби (мг);

$K$  – коефіцієнт мілімолярної екстинції пероксиду водню [122].

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

### 3.1. Схожість насіння

На 20-тий день після проростання насіння було оцінено його схожість, а також проведено морфометричну оцінку рослин з визначенням таких показників як: довжина рослини, довжина стебла, довжина кореня, довжина листків, маса рослини, маса стебла і маса коренів.

Було проведено аналіз схожості насіння. Навіть не озброєним оком можна помітити, що лотки, в які висаджувалося насіння попередньо замочене в розчинах оксиду графену, більш густіше наповнені рослинами, на відміну від інших лотків (рис. 3.1.).



**Рис. 3.1.** Сіянци капусти городньої на 20-ту добу з моменту висадки

У всіх лотках в кожену лунку було висаджено по 6 насінин і відповідно 108 насінин в лоток. Тому порахувавши кількість рослин і порівнявши

отримане значення із загальним значенням 108 можна дізнатися відсоток схожості насіння в кожній дослідній групі. Дані було обраховано та занесено в таблиці (табл. 3.1. – табл. 3.7.).

Отже, в контрольній групі, яка не замочувалася в розчині оксиду графену і поливалася лише водою, із 108 насінин проросло 61. Відсоток схожості становить 56% (табл.3.1).

Таблиця 3.1.

### Схожість насіння в контрольній групі

| Лунка, № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | Разом, шт. | Схожість, % |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|-------------|
| К-ть     | 5 | 6 | 6 | 5 | 1 | 6 | 1 | 0 | 3 | 2  | 3  | 6  | 1  | 1  | 6  | 1  | 3  | 5  | 61         | 56          |

В дослідній групі, насіння якої замочувалося в розчині оксиду графену з концентрацією 20 мкг/мл і протягом всього досліді поливалося водою, із 108 насінин проросло 90. Відсоток схожості становить аж 83% (табл.3.2).

Таблиця 3.2.

### Схожість насіння в дослідній групі, насіння якої замочувалося в розчині оксиду графену з концентрацією 20 мкг/мл

| Лунка, № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | Разом, шт. | Схожість, % |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|-------------|
| К-ть     | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 4 | 5 | 6  | 6  | 5  | 3  | 4  | 4  | 5  | 5  | 1  | 90         | 83          |

В дослідній групі, насіння якої замочувалося в розчині оксиду графену з концентрацією 50 мкг/мл і протягом всього досліді поливалося водою, із 108 насінин проросло 71. Відсоток схожості становить 66% (табл.3.3).

Таблиця 3.3.

**Схожість насіння в дослідній групі, насіння якої замочувалося в розчині оксиду графену з концентрацією 50 мкг/мл**

| Лунка, № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | Разом, шт. | Схожість, % |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|-------------|
| К-ть     | 2 | 1 | 5 | 4 | 0 | 6 | 6 | 2 | 6 | 6  | 4  | 6  | 0  | 0  | 6  | 6  | 6  | 5  | 71         | 66          |

В дослідній групі, насіння якої замочувалося в розчині оксиду графену з концентрацією 70 мкг/мл і протягом всього досліді поливалося водою, із 108 насінин проросло 67. Відсоток схожості становить 62% (табл.3.4).

Таблиця 3.4.

**Схожість насіння в дослідній групі, насіння якої замочувалося в розчині оксиду графену з концентрацією 70 мкг/мл**

| Лунка, № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | Разом, шт. | Схожість, % |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|-------------|
| К-ть     | 4 | 2 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 3 | 6 | 1  | 3  | 5  | 1  | 1  | 6  | 5  | 1  | 2  | 67         | 62          |

В дослідній групі, рослини якою поливалися водою і додатково на 5-ту і 10-ту добу поливалися розчином оксиду графену з концентрацією 20 мкг/мл, із 108 насінин проросло 58. Відсоток схожості становить 54% (табл.3.5).

Таблиця 3.5.

**Схожість насіння в дослідній групі, рослини якої поливалися розчином оксиду графену з концентрацією 20 мкг/мл**

| Лунка, № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | Разом, шт. | Схожість, % |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|-------------|
| К-ть     | 5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 | 4 | 3  | 0  | 4  | 1  | 0  | 5  | 3  | 1  | 4  | 58         | 54          |

В дослідній групі, рослини якої поливалися водою і додатково на 5-ту і 10-ту добу підживлювались розчином оксиду графену з концентрацією 20 мкг/мл, із 108 насінин проросло 59. Відсоток схожості становить 55%.

Таблиця 3.6.

**Схожість насіння групі, рослини якою поливалися розчином оксиду графену з концентрацією 50 мкг/мл**

| Лунка, № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | Разом, шт. | Схожість, % |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|-------------|
| К-ть     | 4 | 1 | 6 | 3 | 3 | 2 | 1 | 0 | 5 | 2  | 0  | 3  | 6  | 1  | 6  | 6  | 4  | 6  | 59         | 55          |

В групі, рослини якої поливали водою і додатково на 5-ту і 10-ту добу в ґрунт вносили розчин оксиду графену з концентрацією 20 мкг/мл, із 108 насінин проросло 51. Відсоток схожості становить 47% (табл.3.7).

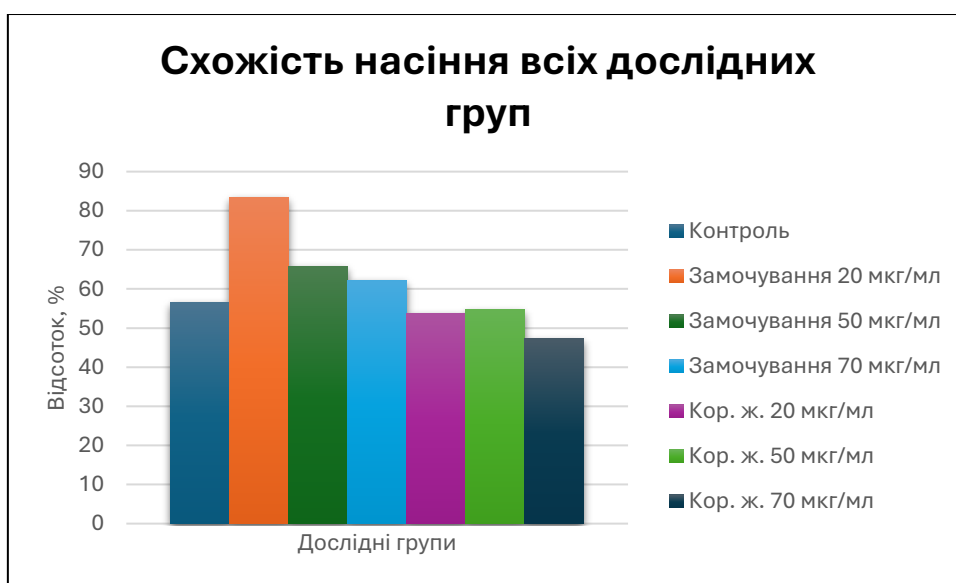
Таблиця 3.7.

**Схожість насіння в дослідній групі, рослини якою поливали розчином оксиду графену з концентрацією 70 мкг/мл**

| Лунка, № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | Разом, шт. | Схожість, % |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|-------------|
| К-ть     | 5 | 2 | 5 | 3 | 0 | 6 | 6 | 0 | 2 | 0  | 0  | 5  | 4  | 0  | 5  | 6  | 0  | 2  | 51         | 47          |

Отже, отримані результати свідчать, що найбільший відсоток проростання насіння зареєстровано в дослідних групах, насіння яких було попередньо замочене в розчинах оксиду графену. У групі, де замочувалось насіння в розчині оксиду графену з концентрацією 20 мкг/мл схожість становила 83%, що є найкращим результатом зі всіх груп. Дещо нижчою (65

%) була схожість насіння капусти в групі, де проводили його замочування в ГО з концентрацією 50 мкг/мл та в групі з замочуванням в розчині ГО з концентрацією 70 мкг/мл (62%). При цьому вказані показники схожості значно перевищували показники в контрольній групі, де схожість насіння капусти становила 56%. В групах рослин, які впродовж дослідів двократно поливали розчинами ГО з концентрацією 20 мкг/мл, 50 мкг/мл і 70 мкг/мл, схожість насіння була нижчою, ніж в контрольній групі і становила 53%, 54%, і 47% відповідно. Також з отриманої діаграми видно, що схожість насіння зменшується зі збільшенням концентрації розчинів ГО.



**Рис. 3.2.** Схожість насіння всіх дослідних груп

З отриманих даних можна зробити висновок, що попереднє замочування насіння капусти *Brassica oleracea* може підвищити схожість насіння. В той час як полив розчином ГО призводить до зменшення схожості насіння.

### 3.2. Визначення морфометричних показників

На 20 добу після висадки насіння в ґрунт було проведено оцінку морфометричних показників рослин всіх дослідних груп (рис. 3.3.).



**Рис. 3.3.** Проведення морфометричних вимірів *Brassica oleracea*

З кожної дослідної групи випадковим чином було відібрано по 20 рослин і досліджено такі параметри як довжина рослини, довжина стебла, довжина кореня, довжина листків, маса рослини, маса стебла і маса коренів. Отримані дані було опрацьовано методом статистичного аналізу.

В першу чергу було досліджено загальну довжину рослин (табл 3.8.)

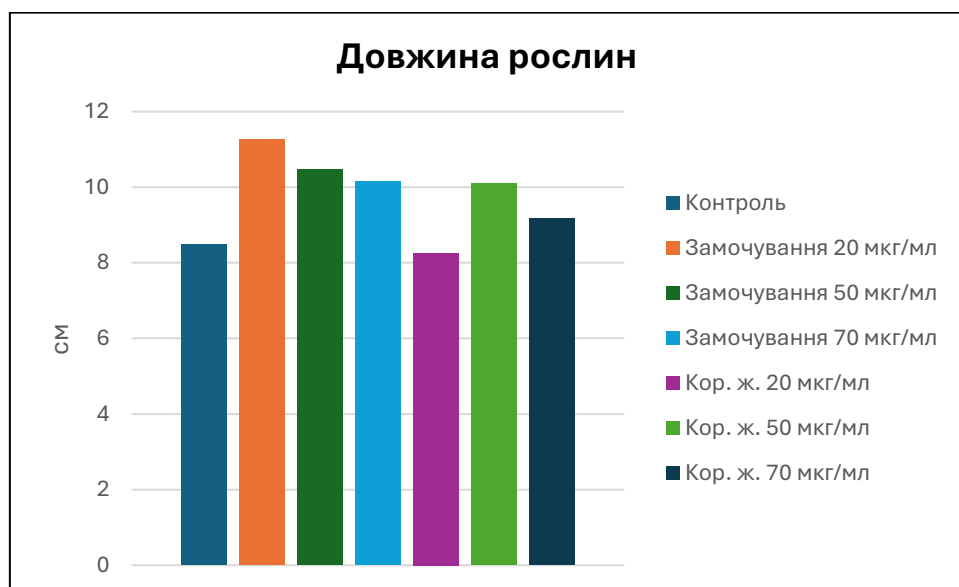
Таблиця 3.8.

**Порівняння довжини рослин *Brassica oleracea* за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену**

| № рослини | Контроль, см | Замочування 20 мкг/мл см | Замочування 50 мкг/мл см | Замочування 70 мкг/мл см | Кор. ж. 20 мкг/мл см | Кор. ж. 50 мкг/мл см | Кор. ж. 70 мкг/мл см |
|-----------|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1         | 11,0         | 14,3                     | 11,7                     | 12,5                     | 9,8                  | 9,0                  | 8,0                  |
| 2         | 8,5          | 13,5                     | 11,0                     | 13,5                     | 8,5                  | 10,5                 | 9,7                  |
| 3         | 7,8          | 9,3                      | 9,5                      | 14,7                     | 7,4                  | 13,1                 | 10,0                 |
| 4         | 11,0         | 10,7                     | 14,5                     | 10,0                     | 8,0                  | 7,5                  | 6,3                  |
| 5         | 6,8          | 10,8                     | 16,0                     | 13,5                     | 8,0                  | 13,5                 | 8,0                  |
| 6         | 9,2          | 13,5                     | 11,0                     | 6,0                      | 8,5                  | 11,5                 | 9,7                  |
| 7         | 10,5         | 12,2                     | 8,0                      | 10,2                     | 9,0                  | 13,1                 | 9,5                  |
| 8         | 6,5          | 10,7                     | 6,5                      | 12,0                     | 6,1                  | 9,0                  | 8,3                  |
| 9         | 8,5          | 9,0                      | 11,0                     | 8,2                      | 8,1                  | 11,0                 | 8,5                  |

|                       |            |             |             |             |             |             |            |
|-----------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 10                    | 9,0        | 11,1        | 10,0        | 9,0         | 11,0        | 13,5        | 10,5       |
| 11                    | 9,5        | 12,1        | 8,0         | 11,5        | 7,5         | 10,0        | 9,3        |
| 12                    | 7,0        | 11,5        | 14,0        | 7,2         | 5,3         | 12,0        | 7,6        |
| 13                    | 11,5       | 11,3        | 2,6         | 8,5         | 9,0         | 9,7         | 6,0        |
| 14                    | 8,5        | 11,0        | 13,0        | 11,0        | 8,0         | 7,0         | 7,0        |
| 15                    | 8,5        | 13,2        | 10,3        | 8,0         | 9,0         | 8,0         | 8,0        |
| 16                    | 6,0        | 9,0         | 8,5         | 8,5         | 7,8         | 11,0        | 15,0       |
| 17                    | 6,5        | 9,0         | 13,7        | 11,0        | 8,0         | 7,0         | 12,7       |
| 18                    | 8,8        | 10,5        | 8,5         | 11,5        | 10,5        | 10,5        | 12,3       |
| 19                    | 5,7        | 10,5        | 8,7         | 8,0         | 8,5         | 9,0         | 5,5        |
| 20                    | 8,9        | 12,1        | 13,0        | 8,0         | 7,2         | 6,0         | 11,5       |
| <b>Середнє, см</b>    | <b>8,5</b> | <b>11,3</b> | <b>10,5</b> | <b>10,1</b> | <b>8,3</b>  | <b>10,1</b> | <b>9,0</b> |
| <b>Відносно К., %</b> |            | <b>32,8</b> | <b>23,5</b> | <b>19,5</b> | <b>-2,7</b> | <b>19,0</b> | <b>8,1</b> |

Встановлено, що рослини, насіння яких було попередньо замочено в розчинах оксиду графену з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл, мають в середньому більшу загальну довжину, ніж інші дослідні групи. Значення довжини рослини становить 11,3, 10,5 та 10,1 см при концентраціях ГО 20, 50 та 70 мкг/мл відповідно. В порівнянні з контролем збільшення довжини рослин складає 32,8, 23,5 та 19,5 % відповідно. В контрольній групі значення довжини становить 8,5 см (рис. 3.4.).



**Рис. 3.4.** Довжина рослин капусти за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену, см

В групі, яка додатково поливалася розчином ГО в концентрації 20 мкг/мл цей параметр становить 8,26 см, що менше за контроль на 2,7 %. В групах, що поливалися розчинами ГО з концентрацією 50 і 70 мкг/мл середня довжина рослин становить 10,1 та 9,2 см відповідно, що в порівнянні з контролем більше на 19,0 і 8,1 % відповідно.

Наступним етапом був аналіз довжини стебла рослин *Brassica oleracea*. Отримані дані занесено в таблицю 3.9.

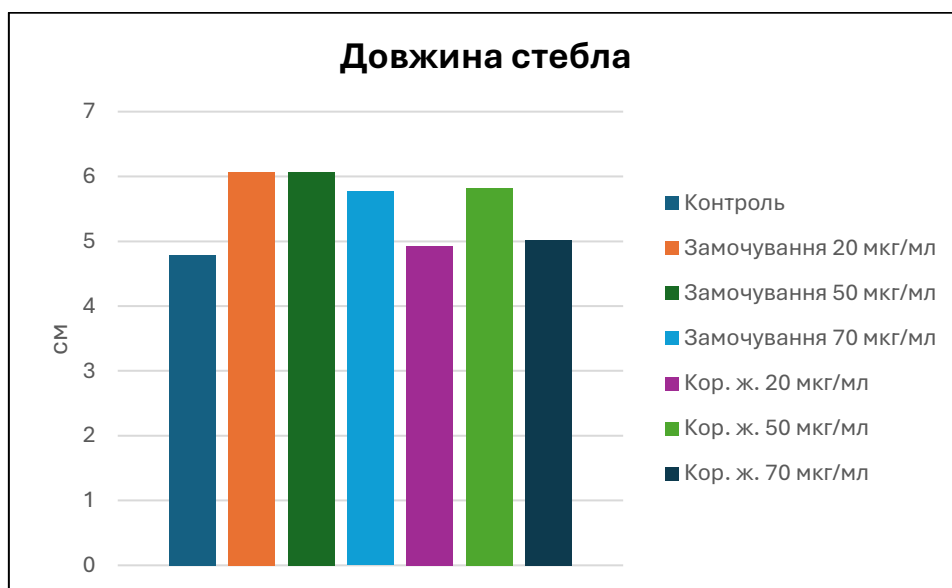
Таблиця 3.9.

**Порівняння довжини стебла рослин у всіх дослідних групах**

| № рослини                           | Контроль, см | Замочування<br>20 мкг/мл<br>см | Замочування<br>50 мкг/мл<br>см | Замочування<br>70 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 20 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 50 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 70 мкг/мл<br>см |
|-------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1                                   | 5,0          | 7,0                            | 9,0                            | 6,4                            | 7,0                     | 5,3                     | 5,5                     |
| 2                                   | 4,4          | 7,5                            | 6,5                            | 8,5                            | 5,0                     | 6,0                     | 5,0                     |
| 3                                   | 4,5          | 4,5                            | 5,3                            | 7,0                            | 4,0                     | 7,5                     | 5,5                     |
| 4                                   | 6,0          | 7,0                            | 8,0                            | 5,0                            | 6,0                     | 3,0                     | 3,3                     |
| 5                                   | 3,3          | 6,5                            | 6,5                            | 6,8                            | 5,5                     | 7,1                     | 5,0                     |
| 6                                   | 6,3          | 7,8                            | 6,0                            | 4,1                            | 4,5                     | 6,3                     | 5,5                     |
| 7                                   | 5,3          | 5,9                            | 4,3                            | 5,8                            | 5,0                     | 6,5                     | 5,0                     |
| 8                                   | 3,8          | 6,7                            | 3,5                            | 6,3                            | 5,7                     | 6,0                     | 4,3                     |
| 9                                   | 5,7          | 4,7                            | 5,3                            | 6,0                            | 4,7                     | 7,5                     | 3,7                     |
| 10                                  | 5,5          | 6,5                            | 6,0                            | 6,0                            | 6,3                     | 7,5                     | 6,0                     |
| 11                                  | 6,0          | 5,5                            | 4,0                            | 6,5                            | 4,0                     | 6,5                     | 5,5                     |
| 12                                  | 3,7          | 4,8                            | 7,5                            | 4,8                            | 3,9                     | 7,7                     | 3,0                     |
| 13                                  | 5,0          | 6,2                            | 7,6                            | 5,8                            | 6,0                     | 4,7                     | 2,3                     |
| 14                                  | 5,0          | 6,8                            | 7,8                            | 6,5                            | 4,0                     | 4,7                     | 3,5                     |
| 15                                  | 4,0          | 9,0                            | 7,0                            | 3,3                            | 6,0                     | 4,8                     | 3,0                     |
| 16                                  | 5,3          | 4,0                            | 5,0                            | 6,0                            | 4,0                     | 7,3                     | 9,0                     |
| 17                                  | 4,6          | 4,6                            | 6,8                            | 5,8                            | 3,7                     | 5,3                     | 8,7                     |
| 18                                  | 4,3          | 5,7                            | 4,3                            | 6,5                            | 5,6                     | 4,0                     | 7,0                     |
| 19                                  | 2,5          | 3,5                            | 4,0                            | 3,8                            | 3,0                     | 5,0                     | 1,5                     |
| 20                                  | 5,5          | 7,1                            | 7,0                            | 4,5                            | 4,6                     | 3,7                     | 8,0                     |
| <b>Середнє<br/>значення,<br/>см</b> | <b>4,8</b>   | <b>6,1</b>                     | <b>6,1</b>                     | <b>5,8</b>                     | <b>4,9</b>              | <b>5,8</b>              | <b>5,0</b>              |
| <b>Відносно<br/>К., %</b>           |              | <b>26,8</b>                    | <b>26,9</b>                    | <b>20,6</b>                    | <b>2,9</b>              | <b>21,6</b>             | <b>4,8</b>              |

Як видно з таблиці у всіх дослідних групах спостерігається збільшення значення довжини стебла рослин. У контрольній групі цей параметр становить 4,78 см. У групах з попереднім замочуванням у розчинах ГО з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл середнє значення довжини стебла становить 6,1, 6,1 та 5,8 см, тобто в порівнянні з контролем приріст довжини складає 26,8 %, 26,9 % та 20,6 % відповідно.

У групах, що додатково поливалися розчинами оксиду графену з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл цей параметр дорівнює 4,9, 5,8 та 5,0 см, також спостерігається приріст порівняно з контролем на 2,9 %, 21,6 % та 4,8 % відповідно. Графічне відображення різниці довжини стебла *Brassica oleracea* за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену представлено на графіку (рис. 3.5.).



**Рис. 3.5.** Довжина стебла рослин *Brassica oleracea* за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену

Наступним етапом був аналіз довжини коренів рослин. Отримані дані занесено в таблицю (табл. 3.10.).

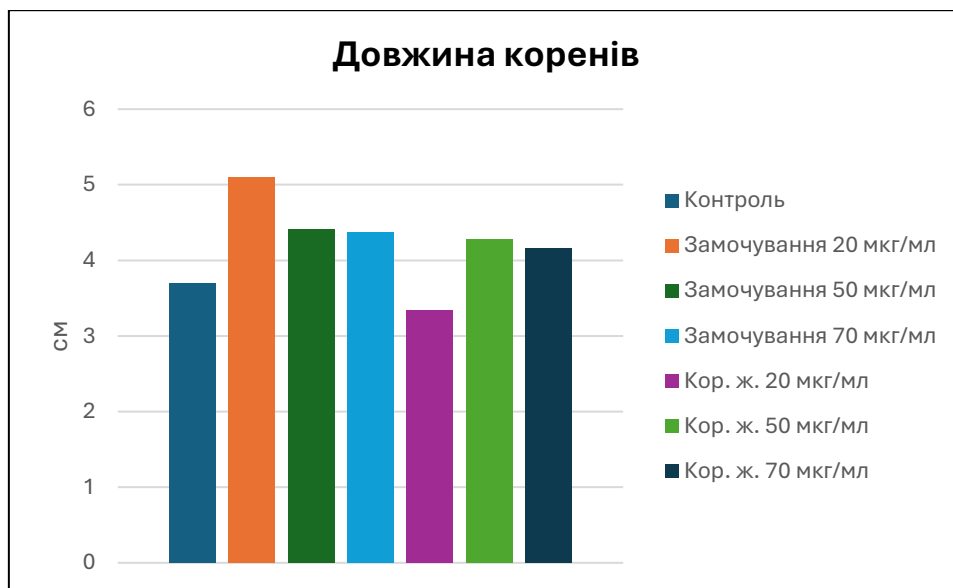
Таблиця 3.10.

## Порівняння довжини кореня рослин у всіх дослідних групах

| № рослини                           | Контроль, см | Замочування<br>20 мкг/мл<br>см | Замочування<br>50 мкг/мл<br>см | Замочування<br>70 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 20 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 50 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 70 мкг/мл<br>см |
|-------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1                                   | 6,0          | 7,3                            | 2,7                            | 6,1                            | 2,8                     | 3,7                     | 2,5                     |
| 2                                   | 4,1          | 6,0                            | 4,5                            | 5,0                            | 3,5                     | 4,5                     | 4,7                     |
| 3                                   | 3,3          | 4,8                            | 4,2                            | 7,7                            | 3,4                     | 5,6                     | 4,5                     |
| 4                                   | 5,0          | 3,7                            | 6,5                            | 5,0                            | 2,0                     | 4,5                     | 3,0                     |
| 5                                   | 3,5          | 4,3                            | 9,5                            | 6,7                            | 2,5                     | 6,4                     | 3,0                     |
| 6                                   | 2,9          | 5,7                            | 5,0                            | 1,9                            | 4,0                     | 5,2                     | 4,2                     |
| 7                                   | 5,2          | 4,2                            | 3,7                            | 4,4                            | 4,0                     | 6,6                     | 4,5                     |
| 8                                   | 2,7          | 4,0                            | 3,0                            | 5,7                            | 0,4                     | 3,0                     | 4,0                     |
| 9                                   | 2,8          | 4,3                            | 5,7                            | 2,2                            | 3,4                     | 3,5                     | 4,8                     |
| 10                                  | 3,5          | 4,6                            | 4,0                            | 3,0                            | 4,7                     | 6,0                     | 4,5                     |
| 11                                  | 3,5          | 6,6                            | 4,0                            | 5,0                            | 3,5                     | 3,5                     | 3,8                     |
| 12                                  | 3,3          | 6,7                            | 6,5                            | 2,4                            | 1,4                     | 4,3                     | 4,6                     |
| 13                                  | 6,5          | 5,1                            | 5,0                            | 2,7                            | 3,0                     | 5,0                     | 3,7                     |
| 14                                  | 3,5          | 4,2                            | 5,2                            | 4,5                            | 4,0                     | 2,3                     | 3,5                     |
| 15                                  | 4,5          | 4,2                            | 3,3                            | 4,7                            | 3,0                     | 3,2                     | 5,0                     |
| 16                                  | 0,7          | 5,0                            | 3,5                            | 2,5                            | 3,8                     | 3,7                     | 6,0                     |
| 17                                  | 1,9          | 4,4                            | 6,9                            | 5,2                            | 4,3                     | 1,7                     | 4,0                     |
| 18                                  | 4,5          | 4,8                            | 4,2                            | 5,0                            | 4,9                     | 6,5                     | 5,3                     |
| 19                                  | 3,2          | 7,0                            | 4,7                            | 4,2                            | 5,5                     | 4,0                     | 4,0                     |
| 20                                  | 3,4          | 5,0                            | 6,0                            | 3,5                            | 2,6                     | 2,3                     | 3,5                     |
| <b>Середнє<br/>значення,<br/>см</b> | 3,7          | 5,1                            | 4,4                            | 4,4                            | 3,3                     | 4,3                     | 4,2                     |
| <b>Відносно<br/>К., %</b>           |              | 37,7                           | 19,1                           | 18,1                           | -9,9                    | 15,5                    | 12,3                    |

Згідно даних, отриманих з таблиці, у більшості дослідних груп спостерігається збільшення середньої довжини коренів рослин у порівнянні з контрольною групою, де цей показник становить 3,7 см. У групах із замочуванням у розчинах ГО з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл середнє значення довжини коренів становить 5,1, 4,4 та 4,4 см, що відповідає приросту на 37,7 %, 19,1 % та 18,1 % відповідно порівняно з контролем. У групах, де рослини додатково поливали розчинами ГО з концентраціями 20, 50 та 70

мкг/мл, середня довжина коренів дорівнює 3,3, 4,3 та 4,2 см. Спостерігається зниження цього параметру у групі, з поливом розчином ГО з концентрацією 20 мкг/мл порівняно з контролем на 9,9 %, однак групи з поливом розчинами ГО з концентраціями 50 та 70 мкг/мл демонструють приріст на 15,5 та 12,3 % відповідно. Графічне відображення різниці довжини стебла в усіх дослідних групах представлено на графіку (рис. 3.6.).



**Рис. 3.6.** Довжина коренів *Brassica oleracea* за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену

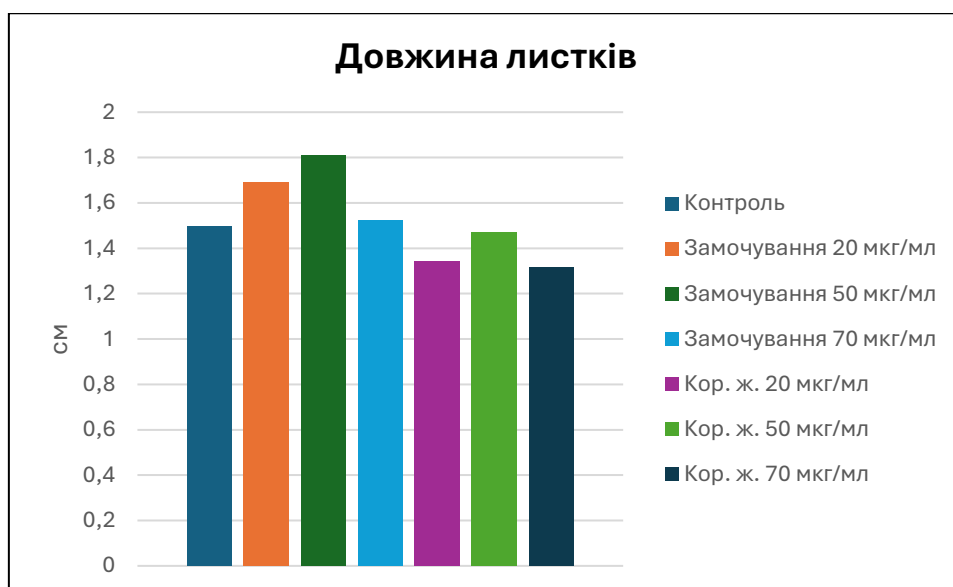
Наступним досліджуваним параметром є довжина листків рослин. Результати вимірювань представлені у таблицю (табл. 3.11.).

За результатами таблиці, у більшості груп із замочуванням спостерігається збільшення середньої довжини листків рослин порівняно з контрольною групою, де цей показник становить 1,5 см. Зокрема, у групах, де насіння попередньо замочували в розчинах ГО з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл, середня довжина листків складає 1,7, 1,8 та 1,5 см, що на 13,0 %, 21,1% та 2,0 % відповідно більше, ніж у контрольній групі.

**Довжина листків *Brassica oleracea* за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену**

| № рослини                           | Контроль, см | Замочування<br>20 мкг/мл<br>см | Замочування<br>50 мкг/мл<br>см | Замочування<br>70 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 20 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 50 мкг/мл<br>см | Кор. ж. 70 мкг/мл<br>см |
|-------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1                                   | 2,0          | 1,7                            | 2,5                            | 2,1                            | 2,1                     | 1,5                     | 2,2                     |
| 2                                   | 1,5          | 1,9                            | 2,2                            | 1,5                            | 2,0                     | 0,5                     | 1,1                     |
| 3                                   | 1,0          | 1,6                            | 2,1                            | 2,0                            | 1,5                     | 2,3                     | 2,1                     |
| 4                                   | 1,7          | 2,0                            | 2,5                            | 0,9                            | 1,3                     | 0,4                     | 0,9                     |
| 5                                   | 2,0          | 2,3                            | 1,5                            | 2,2                            | 0,5                     | 1,3                     | 2,0                     |
| 6                                   | 1,4          | 2,5                            | 2,1                            | 1,1                            | 1,4                     | 0,9                     | 1,9                     |
| 7                                   | 1,5          | 1,7                            | 1,9                            | 1,4                            | 1,2                     | 2,2                     | 1,6                     |
| 8                                   | 1,3          | 1,1                            | 1,1                            | 2,2                            | 1,5                     | 1,2                     | 0,3                     |
| 9                                   | 1,5          | 1,1                            | 1,7                            | 2,1                            | 2,0                     | 1,9                     | 1,1                     |
| 10                                  | 1,5          | 1,7                            | 2,0                            | 1,8                            | 1,8                     | 2,2                     | 1,0                     |
| 11                                  | 1,6          | 1,4                            | 1,5                            | 1,7                            | 1,3                     | 2,1                     | 1,6                     |
| 12                                  | 1,1          | 1,3                            | 2,3                            | 1,2                            | 1,3                     | 1,7                     | 0,3                     |
| 13                                  | 2,0          | 2,0                            | 2,4                            | 1,6                            | 1,0                     | 1,1                     | 0,5                     |
| 14                                  | 2,4          | 1,6                            | 1,9                            | 2,1                            | 1,0                     | 1,7                     | 0,9                     |
| 15                                  | 0,6          | 2,5                            | 1,5                            | 0,9                            | 0,9                     | 1,7                     | 1,0                     |
| 16                                  | 1,6          | 1,7                            | 1,2                            | 1,1                            | 2,0                     | 1,2                     | 1,6                     |
| 17                                  | 1,7          | 1,1                            | 1,8                            | 0,3                            | 1,0                     | 1,6                     | 2,3                     |
| 18                                  | 2,1          | 1,9                            | 1,0                            | 1,5                            | 1,5                     | 1,0                     | 2,3                     |
| 19                                  | 1,1          | 1,1                            | 1,5                            | 1,6                            | 0,6                     | 1,8                     | 0,3                     |
| 20                                  | 0,3          | 1,6                            | 1,5                            | 1,2                            | 0,9                     | 1,1                     | 1,3                     |
| <b>Середнє<br/>значення,<br/>см</b> | 1,5          | 1,7                            | 1,8                            | 1,5                            | 1,3                     | 1,5                     | 1,3                     |
| <b>Відносно<br/>К., %</b>           |              | 13,0                           | 21,1                           | 2,0                            | -10,4                   | -1,7                    | -12,0                   |

У групах з додатковим кореневим живленням розчинами ГО з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл середня довжина листків складає 1,3, 1,5 та 1,3 см, що менше на 10,4 %, 1,7 % та 12,0 % відповідно у порівнянні з контролем. Графічне відображення різниці довжини стебла в усіх дослідних групах представлено на графіку (рис. 3.7.).



**Рис. 3.7.** Довжина листків *Brassica oleracea* за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену

Наступний морфометричним показником саджанців капусти, який досліджується, є сира маса рослин. Результати вимірювань занесені в таблицю (табл. 3.12.).

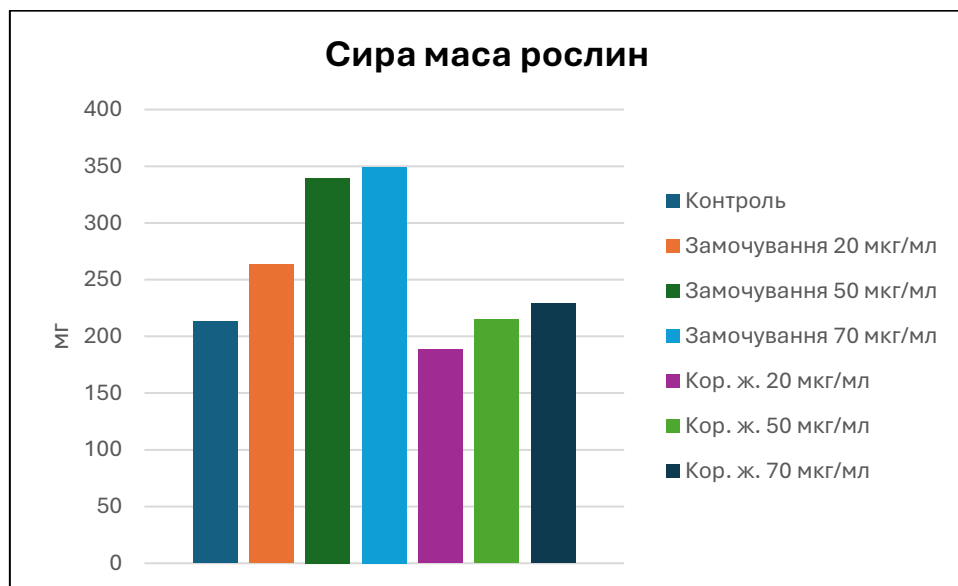
Таблиця 3.12.

**Маса рослин за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену**

| № рослини | Контроль, мг | Замочування 20 мкг/мл<br>мг | Замочування 50 мкг/мл<br>мг | Замочування 70 мкг/мл<br>мг | Кор. ж. 20 мкг/мл<br>мг | Кор. ж. 50 мкг/мл<br>мг | Кор. ж. 70 мкг/мл<br>мг |
|-----------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1         | 104          | 499                         | 401                         | 256                         | 200                     | 188                     | 361                     |
| 2         | 417          | 211                         | 216                         | 836                         | 256                     | 270                     | 531                     |
| 3         | 186          | 278                         | 205                         | 306                         | 522                     | 292                     | 162                     |
| 4         | 217          | 501                         | 703                         | 724                         | 117                     | 145                     | 152                     |
| 5         | 130          | 230                         | 665                         | 573                         | 169                     | 214                     | 243                     |
| 6         | 235          | 263                         | 699                         | 386                         | 82                      | 353                     | 211                     |
| 7         | 241          | 159                         | 233                         | 344                         | 176                     | 251                     | 187                     |
| 8         | 150          | 266                         | 313                         | 18                          | 159                     | 219                     | 135                     |
| 9         | 250          | 213                         | 534                         | 286                         | 222                     | 177                     | 113                     |
| 10        | 135          | 266                         | 69                          | 217                         | 160                     | 214                     | 367                     |
| 11        | 231          | 11                          | 214                         | 136                         | 189                     | 274                     | 211                     |
| 12        | 113          | 201                         | 368                         | 94                          | 92                      | 265                     | 331                     |

|                             |       |       |       |       |        |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 13                          | 163   | 326   | 285   | 172   | 137    | 271   | 46    |
| 14                          | 192   | 236   | 527   | 765   | 262    | 201   | 88    |
| 15                          | 250   | 247   | 173   | 532   | 195    | 118   | 100   |
| 16                          | 85    | 222   | 359   | 83    | 171    | 118   | 389   |
| 17                          | 578   | 128   | 221   | 453   | 220    | 63    | 297   |
| 18                          | 324   | 281   | 154   | 357   | 237    | 205   | 288   |
| 19                          | 203   | 326   | 295   | 241   | 162    | 184   | 183   |
| 20                          | 64    | 403   | 157   | 212   | 42     | 271   | 183   |
| <b>Середнє значення, мг</b> | 213,4 | 263,4 | 339,6 | 349,6 | 188,5  | 214,7 | 228,9 |
| <b>Відносно К., %</b>       | 0,00  | 23,41 | 59,11 | 63,80 | -11,67 | 0,59  | 7,26  |

Аналіз таблиці показує, що замочування насіння в розчинах ГО значно вплинуло на масу рослин. У контрольній групі середня маса рослин становить 213,4 мг. У групах із попереднім замочуванням у розчинах ГО з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл цей показник зріс до 263,4, 339,6 та 349,6 мг, що відповідає приросту на 23,4 %, 59,1 % та 63,8 % відповідно (рис.3.8).



**Рис. 3.8.** Сира маса *Brassica oleracea* за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену

Водночас у групах з корневим внесенням розчинів ГО з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл спостерігаються змішані результати: середня сира маса рослин складає 188,5, 214,7 та 228,9 мг, тобто спостерігається зниження цього

показника на 11,7 % у групі з концентрацією 20 мкг/мл, незначне збільшення на 0,59 % у групі з концентрацією 50 мкг/мл та 7,26 % у групі з концентрацією 70 мкг/мл у порівнянні з контролем.

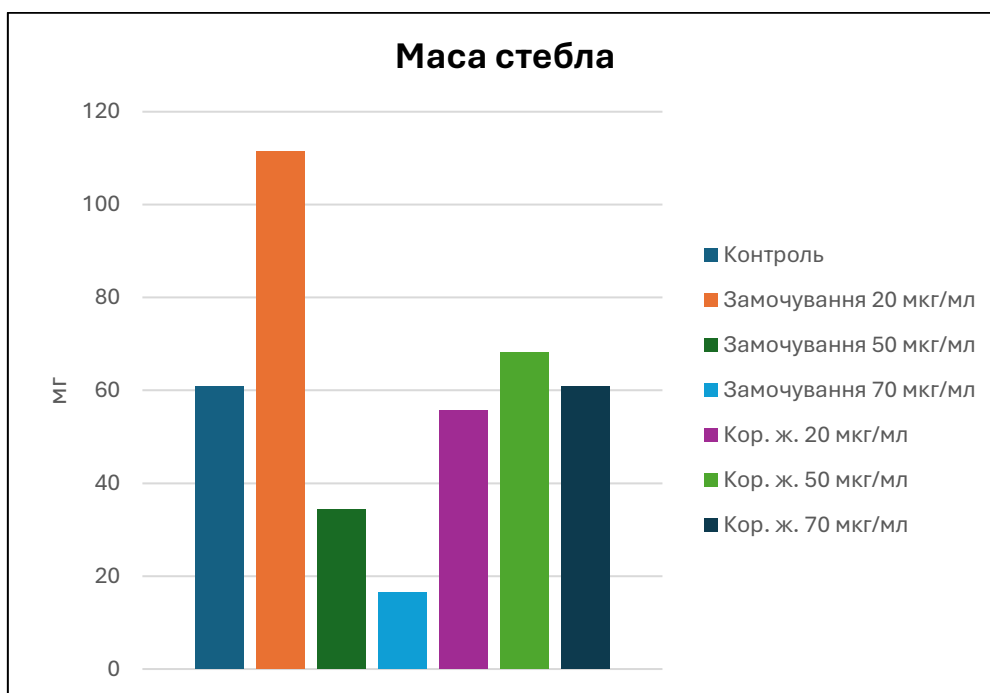
Таблиця 3.13.

**Маса стебла рослин за різних концентрацій та умов внесення оксиду графену**

| № рослини                 | Контроль, мг | Замочування<br>20 мкг/мл<br>мг | Замочування<br>50 мкг/мл<br>мг | Замочування<br>70 мкг/мл<br>мг | Кор. ж.<br>20 мкг/мл<br>мг | Кор. ж.<br>50 мкг/мл<br>мг | Кор. ж.<br>70 мкг/мл<br>мг |
|---------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1                         | 71           | 71                             | 86                             | 60                             | 97                         | 48                         | 93                         |
| 2                         | 75           | 81                             | 87                             | 87                             | 85                         | 52                         | 51                         |
| 3                         | 36           | 50                             | 69                             | 76                             | 90                         | 80                         | 160                        |
| 4                         | 60           | 128                            | 88                             | 57                             | 67                         | 30                         | 45                         |
| 5                         | 75           | 78                             | 74                             | 110                            | 70                         | 101                        | 69                         |
| 6                         | 57           | 80                             | 67                             | 39                             | 46                         | 222                        | 90                         |
| 7                         | 55           | 75                             | 62                             | 59                             | 59                         | 74                         | 47                         |
| 8                         | 38           | 64                             | 290                            | 924                            | 36                         | 43                         | 26                         |
| 9                         | 74           | 40                             | 81                             | 81                             | 67                         | 80                         | 42                         |
| 10                        | 62           | 81                             | 916                            | 82                             | 59                         | 70                         | 33                         |
| 11                        | 49           | 935                            | 48                             | 70                             | 54                         | 77                         | 47                         |
| 12                        | 37           | 29                             | 97                             | 38                             | 36                         | 91                         | 28                         |
| 13                        | 59           | 79                             | 94                             | 59                             | 43                         | 42                         | 28                         |
| 14                        | 88           | 105                            | 77                             | 82                             | 48                         | 77                         | 34                         |
| 15                        | 52           | 72                             | 96                             | 44                             | 42                         | 48                         | 37                         |
| 16                        | 51           | 43                             | 59                             | 66                             | 60                         | 42                         | 68                         |
| 17                        | 75           | 31                             | 65                             | 49                             | 36                         | 51                         | 115                        |
| 18                        | 101          | 73                             | 42                             | 92                             | 54                         | 42                         | 99                         |
| 19                        | 71           | 39                             | 62                             | 55                             | 41                         | 52                         | 16                         |
| 20                        | 31           | 75                             | 58                             | 46                             | 23                         | 40                         | 87                         |
| <b>Середнє,<br/>мг</b>    | 60,9         | 111,5                          | 34,3                           | 16,4                           | 55,7                       | 68,1                       | 60,8                       |
| <b>Відносно<br/>К., %</b> |              | 83,2                           | -43,6                          | -73,1                          | -8,6                       | 11,9                       | -0,1                       |

Результати порівняння маси стебла свідчать про суттєву різницю між групами. У контрольній групі середня маса стебла становить 60,85 мг. У групі з попереднім замочуванням у розчині ГО концентрацією 20 мкг/мл маса стебла значно зросла до 111,45 мг, що на 83,2 % більше порівняно з контролем. Проте,

у групах із замочуванням у розчинах з концентраціями 50 та 70 мкг/мл маса стебла, навпаки, знизилася до 34,3 мг і 16,4 мг, тобто на 43,6 % і 73,1 % відповідно. У групах з кореневим внесенням оксиду графену показник маси стебла мав різноспрямовані зміни: у групі 20 мкг/мл зменшився на 8,6 %, у групі 50 мкг/мл збільшився на 11,9 %, а у групі з концентрацією 70 мкг/мл залишився без змін порівняно з контролем (рис. 3.9.).



**Рис. 3.9.** Маса стебла рослин у всіх дослідних групах

Останнім досліджуваним морфометричним показником є маса коренів рослин, результати вимірювання якого занесені в таблицю 3.14.

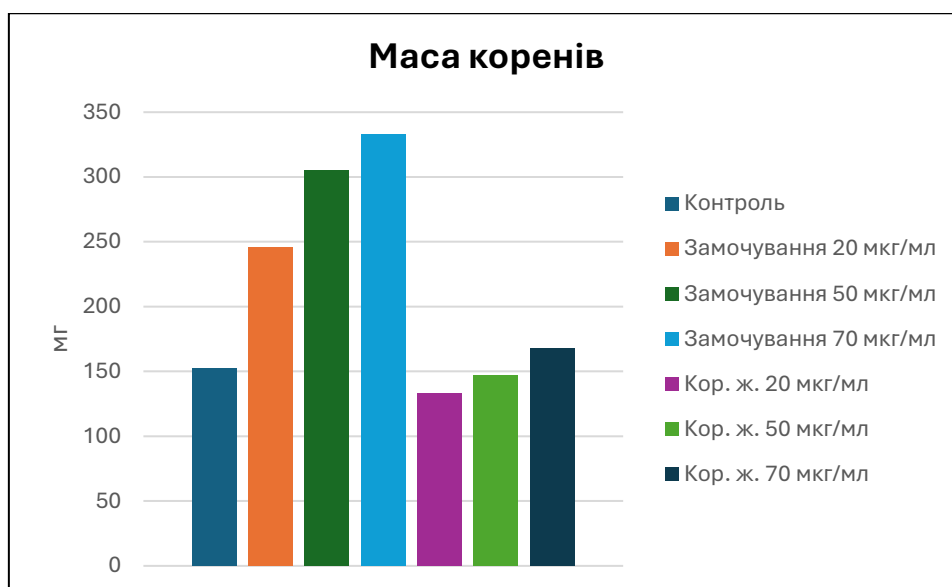
Згідно з даними таблиці, середній показник маси коренів значно відрізняється у дослідних групах. У контрольній групі середня маса коренів становить 152,6 мг.

У дослідних групах, де застосовували замочування насіння капусти у розчинах ГО з концентраціями 20, 50 та 70 мкг/мл цей показник зріс до 245,4, 305,3 та 333,2 мг, тобто на 60,9 %, 100,1 % та 118,4 % відповідно порівняно з контролем.

## Порівняння маси коренів рослин у всіх дослідних групах

| № рослини                 | Контроль, мг | Замочування<br>20 мкг/мл<br>мг | Замочування<br>50 мкг/мл<br>мг | Замочування<br>70 мкг/мл<br>мг | Кор. ж.<br>20 мкг/мл<br>мг | Кор. ж.<br>50 мкг/мл<br>мг | Кор. ж.<br>70 мкг/мл<br>мг |
|---------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1                         | 33           | 428                            | 315                            | 196                            | 103                        | 140                        | 268                        |
| 2                         | 342          | 130                            | 129                            | 749                            | 171                        | 218                        | 480                        |
| 3                         | 150          | 228                            | 136                            | 230                            | 432                        | 212                        | 177                        |
| 4                         | 157          | 373                            | 615                            | 667                            | 50                         | 115                        | 107                        |
| 5                         | 55           | 152                            | 591                            | 463                            | 99                         | 113                        | 174                        |
| 6                         | 178          | 183                            | 632                            | 347                            | 36                         | 131                        | 121                        |
| 7                         | 186          | 84                             | 171                            | 285                            | 117                        | 177                        | 140                        |
| 8                         | 112          | 202                            | 23                             | 942                            | 123                        | 176                        | 109                        |
| 9                         | 176          | 173                            | 453                            | 205                            | 155                        | 97                         | 71                         |
| 10                        | 73           | 185                            | 985                            | 135                            | 101                        | 144                        | 334                        |
| 11                        | 182          | 946                            | 166                            | 66                             | 135                        | 197                        | 164                        |
| 12                        | 76           | 172                            | 271                            | 56                             | 56                         | 174                        | 303                        |
| 13                        | 104          | 247                            | 191                            | 113                            | 94                         | 229                        | 18                         |
| 14                        | 104          | 131                            | 450                            | 683                            | 214                        | 124                        | 54                         |
| 15                        | 198          | 175                            | 77                             | 488                            | 153                        | 70                         | 63                         |
| 16                        | 34           | 179                            | 300                            | 17                             | 111                        | 76                         | 321                        |
| 17                        | 503          | 97                             | 156                            | 404                            | 184                        | 12                         | 182                        |
| 18                        | 223          | 208                            | 112                            | 265                            | 183                        | 163                        | 189                        |
| 19                        | 132          | 287                            | 233                            | 186                            | 121                        | 132                        | 167                        |
| 20                        | 33           | 328                            | 99                             | 166                            | 19                         | 231                        | 96                         |
| <b>Середнє,<br/>мг</b>    | 152,6        | 245,4                          | 305,3                          | 333,2                          | 132,9                      | 146,6                      | 168,1                      |
| <b>Відносно<br/>К., %</b> |              | 60,9                           | 100,1                          | 118,4                          | -12,9                      | -3,9                       | 10,2                       |

У групах з кореневим внесенням розчинів оксиду графену маса коренів змінювалась в різних напрямках: у групі з концентрацією 20 мкг/мл вона знизилася на 12,9 %, у групі з концентрацією 50 мкг/мл – на 3,9 %, а у групі з концентрацією 70 мкг/мл спостерігається збільшення на 10,2 % відносно контролю (рис. 3.10.).



**Рис. 3.10.** Маса коренів рослин у дослідних групах за різних умов внесення та концентрацій оксиду графену

Можна підсумувати, що і обробка насіння, і кореневе внесення розчинів ГО з різними концентраціями вплинули на морфометричні показники рослин, проте вплив неоднозначний і відрізняється залежно від концентрації та методу обробки. У групах із замочуванням у розчинах ГО, як правило, спостерігається значне збільшення довжини та маси рослин, особливо при концентраціях 20 і 50 мкг/мл, з максимальним впливом на масу коренів та стебла. Ці групи демонструють загальну тенденцію до посилення росту порівняно з контрольною групою.

Водночас кореневе живлення розчинами ГО дало менш однозначні результати. При низьких концентраціях (20 мкг/мл) деякі показники, такі як маса коренів та листків, навіть знижувалися порівняно з контролем, а приріст був менш вираженим у параметрах довжини. Найкращий ефект у цих групах спостерігався за концентрації 50 мкг/мл, де маса та довжина стебла демонстрували позитивну динаміку.

Отже, дослідження показало, що замочування насіння в розчинах ГО сприяє інтенсивнішому росту рослин порівняно з кореневим живленням, і вплив ГО є найбільш помітним при концентраціях 20–50 мкг/мл. Подальші

дослідження можуть допомогти уточнити оптимальні умови обробки для досягнення максимальної стимуляції росту рослин.

### 3.3. Визначення вмісту хлорофілів та каротиноїдів у капусті городній *Brassica oleracea*

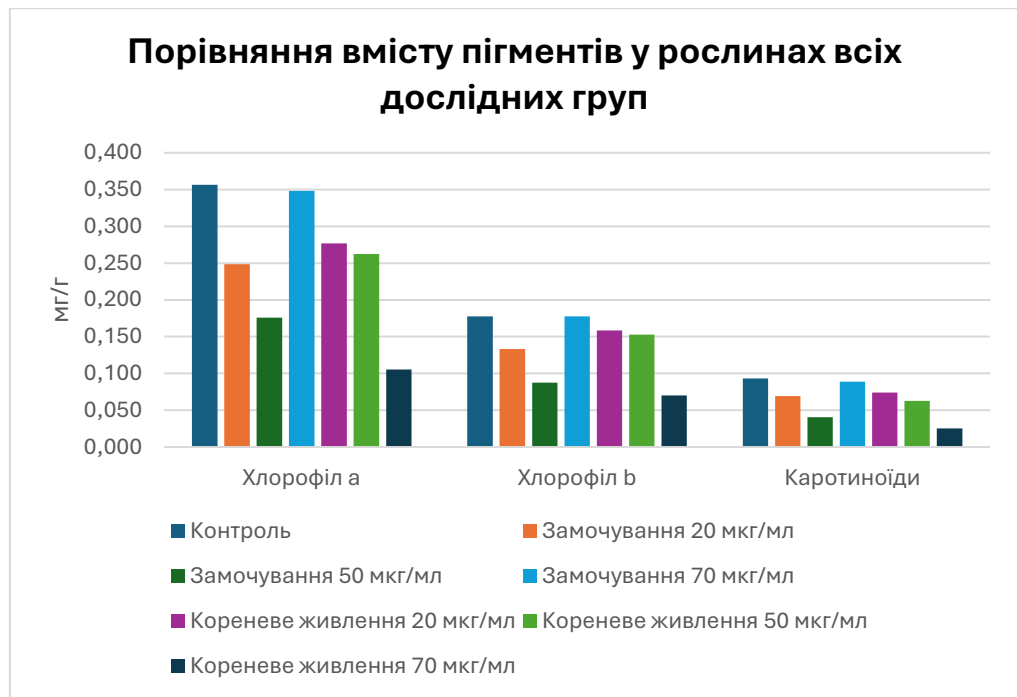
В ході проведення дослідження було проаналізовано вміст таких пігментів як хлорофіл а, хлорофіл b та каротиноїди в капусті городній *Brassica oleracea* (табл. 3.15.).

Таблиця 3.15.

#### Вміст пігментів

| Зразок \ Пігменти              | Хлорофіл а, мг/г | Хлорофіл b, мг/г | Каротиноїди, мг/г |
|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Контроль                       | 0,356            | 0,177            | 0,093             |
| Замочування<br>20 мкг/мл       | 0,249            | 0,133            | 0,069             |
| Замочування<br>50 мкг/мл       | 0,176            | 0,088            | 0,041             |
| Замочування<br>70 мкг/мл       | 0,348            | 0,178            | 0,089             |
| Кореневе живлення<br>20 мкг/мл | 0,277            | 0,158            | 0,074             |
| Кореневе живлення<br>50 мкг/мл | 0,262            | 0,153            | 0,063             |
| Кореневе живлення<br>70 мкг/мл | 0,106            | 0,070            | 0,025             |

У контрольній групі концентрації хлорофілу а та b становлять 0,356 і 0,177 мг/г відповідно, тоді як вміст каротиноїдів - 0,093 мг/г (рис.3.11).



**Рис. 3.11.** Вміст пігментів у рослинах капусти дослідних груп

У дослідних групах, де насіння замочувалося в розчинах із концентрацією 20, 50 та 70 мкг/мл, спостерігається зменшення вмісту пігментів порівняно з контролем, зокрема, найнижчі значення були зафіксовані при обробці 50 мкг/мл, де хлорофіл а і b становлять 0,176 та 0,088 мг/г, а каротиноїди – 0,041 мг/г. Однак при концентрації 70 мкг/мл вміст хлорофілу а і b майже співпадає з контрольними значеннями (0,348 та 0,178 мг/г відповідно), а каротиноїди – 0,089 мг/г.

У випадку кореневого внесення оксиду графену спостерігається схожа тенденція. При обробці розчином з концентрацією 20 мкг/мл показники пігментів залишаються вищими порівняно з концентраціями 50 і 70 мкг/мл. При цьому найнижчі значення вмісту пігментів серед усіх дослідних груп спостерігаються при кореновому внесенні з концентрацією 70 мкг/мл, де хлорофіл а становить 0,106 мг/г, хлорофіл b — 0,070 мг/г, а каротиноїди — 0,025 мг/г.

Отже, можна зробити висновок, що вищі концентрації обробки (50 і 70 мкг/мл) призводять до зниження вмісту фотосинтетичних пігментів, особливо

у випадку з каротиноїдами, які найбільше знижуються при максимальній концентрації.

### 3.4. Визначення активності каталази в рослинах *Brassica oleracea*

Останнім етапом дослідження було проведення визначення активності каталази спектрофотометричним методом. Результати вимірювань були опрацьовані і занесені в таблицю (табл. 3.16.).

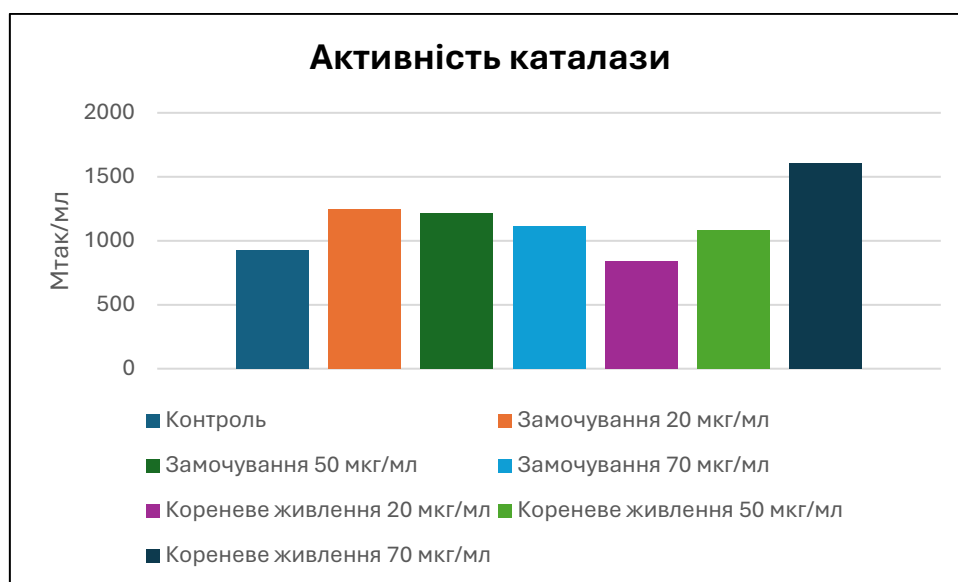
Таблиця 3.16.

#### Порівняння активності каталази в усіх дослідних групах

| Дослідні зразки             | Активність каталази, мкат/мл |
|-----------------------------|------------------------------|
| Контроль                    | 925,74                       |
| Замочування 20 мкг/мл       | 1246,752                     |
| Замочування 50 мкг/мл       | 1213,452                     |
| Замочування 70 мкг/мл       | 1112,22                      |
| Кореневе живлення 20 мкг/мл | 836,496                      |
| Кореневе живлення 50 мкг/мл | 1078,92                      |
| Кореневе живлення 70 мкг/мл | 1610,388                     |

Активність каталази в досліджених зразках демонструє певні закономірності порівняно з контрольною групою. Так, у рослинах отриманих з насіння, яке замочували в оксиді графену концентрацією 20 мкг/мл спостерігається найбільше підвищення активності каталази на 34,7 % порівняно з контролем, що свідчить про значне посилення антиоксидантної активності. При подальшому збільшенні концентрації розчину для замочування насіння до 50 мкг/мл активність каталази також залишається підвищеною на 31,1 %, але дещо менше, ніж в попередній групі. Замочування в оксиді графену концентрацією 70 мкг/мл обумовлює активність ферменту, яка перевищує контрольне значення на 20,1 %, що свідчить про збереження позитивного ефекту, хоча менш вираженого в порівнянні з попередніми групами.

У дослідних групах, де оксид графену застосовували методом поливу, залежність активності каталази від концентрації демонструє іншу картину. При концентрації 20 мкг/мл активність каталази дещо знижується і становить на 9,6 % менше за показники контрольної групи, що може вказувати на зменшення антиоксидантного ефекту. Проте при концентрації 50 мкг/мл активність каталази збільшується на 16,6 % порівняно з контролем, демонструючи помірне посилення антиоксидантної активності. Найбільш виражений ефект спостерігається при кореновому внесенні розчину оксиду графену концентрацією 70 мкг/мл, де активність каталази досягає максимального значення, перевищуючи показники контрольної групи на 73,9 %, що свідчить про суттєве підвищення антиоксидантного захисту (рис. 3.12.).



**Рис. 3.12.** Активність каталази у рослинах у всіх дослідних зразках

Таким чином, замочування насіння капусти розчинами оксиду графену різної концентрації позитивно впливає на активність каталази, особливо в низькій концентрації 20 мкг/мл, тоді як кореневе внесення аналогічних розчинів демонструє максимальний ефект лише в найвищій концентрації 70 мкг/мл.

## ВИСНОВКИ

1. Результати проведеного дослідження свідчать, що найбільший відсоток проростання насіння зареєстровано в дослідних групах, насіння яких було попередньо замочене в розчинах оксиду графену.

2. Встановлено, що у групі, де насіння замочували в розчині оксиду графену з концентрацією 20 мкг/мл схожість становила 83%, що є найкращим результатом зі всіх груп. Дещо нижчою (65 %) була схожість насіння капусти в групі, де проводили його замочування в ГО з концентрацією 50 мкг/мл та в групі з замочуванням в розчині ГО з концентрацією 70 мкг/мл (62 %). При цьому вказані показники схожості значно перевищували показники в контрольній групі, де схожість насіння капусти становила 56 %.

3. В дослідних групах, де оксид графену вносили шляхом двократного поливу в концентраціях 20 мкг/мл, 50 мкг/мл і 70 мкг/мл, схожість насіння була нижчою, ніж в контрольній групі і становила 53 %, 54 %, і 47 % відповідно.

4. Аналіз вмісту фотосинтетичних пігментів показав, що застосування оксиду графену впливає на концентрацію фотосинтетичних пігментів у рослинах. Зокрема, при замочуванні насіння у розчинах оксиду графену спостерігається зменшення вмісту хлорофілів а та б, а також каротиноїдів порівняно з контрольними значеннями, яке найбільш виражене за концентрації 50 мкг/мл. Однак за концентрації 70 мкг/мл вміст хлорофілів не має суттєвих змін порівняно з контрольною групою. При кореновому внесенні зниження вмісту пігментів також є найбільшим за концентрації 70 мкг/мл.

5. Згідно з результатами дослідження активності каталази, оксид графену значно впливає на активність каталази в рослинах залежно від способу та концентрації його внесення. При замочуванні насіння спостерігається максимальне підвищення активності каталази на 34,7 % при концентрації 20 мкг/мл порівняно з контрольною групою. За коренового внесення найбільше

зростання активності каталази на 73,9 % відмічається при концентрації 70 мкг/мл, що ймовірно свідчить про посилення антиоксидантного захисту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gogos A, Knauer K, Bucheli TD. Nanomaterials in plant protection and fertilization: current state, foreseen applications, and research priorities. *J Agric Food Chem.* 2012;60:9781–92.
2. Sarlak N, Taherifar A, Salehi F. Synthesis of nanopesticides by encapsulating pesticide nanoparticles using functionalized carbon nanotubes and application of new nanocomposite for plant disease treatment. *J Agric Food Chem.* 2014;62:4833–8.
3. Suresh Kumar RS, Shiny PJ, Anjali CH, Jerobin J, Goshen KM, Magdassi S, Mukherjee A, Chandrasekaran N. Distinctive effects of nanosized permethrin in the environment. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2013;20:2593–602.
4. Pereira A, Grillo R, Mello NF, Rosa AH, Fraceto LF. Application of poly(epsilon-caprolactone) nanoparticles containing atrazine herbicide as an alternative technique to control weeds and reduce damage to the environment. *J Hazard Mater.* 2014;268:207–15.)
5. Auernhammer H. Precision farming—the environmental challenge. *Comput Electron Agric.* 2001;30:31–43.).
6. Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.-J., Kopittke, P.M., 2016. Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends Plant Sci.* 21, 699–712. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.04.005>.
7. Zaytseva and Neumann *Chem. Biol. Technol. Agric.* (2016) 3:17
8. Wang, X., Jang, Q., Xu, W., Cai, W., Inoue, Y., Zhu, Y., 2013. Effect of carbon nanotube length on thermal, electrical and mechanical properties of CNT/bismaleimide composites. *Carbon* 53, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.10.041>.
9. Kumar, A., Singh, A., Panigrahy, M., Sahoo, P.K., Panigrahi, K.C., 2018. Carbon nanoparticles influence photomorphogenesis and flowering time in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Rep.* 37, 901–912. <https://doi.org/10.1007/s00299-018-2277-6>.

10. Canas, J.E., Long, M., Nations, S., Vadan, R., Dai, L., Luo, M., Ambikapathi, R., Lee, E.H., Olszyk, D., 2008. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon-nanotubes on root elongation of select crop species. *Nanomater. Environ.* 27, 1922–1931. <https://doi.org/10.1897/08-117.1>.
11. Chen, J., Dou, R., Yang, Z., Wang, X., Mao, C., Gao, X., et al., 2016. The effect and fate of water-soluble carbon nanodots in maize (*Zea mays* L.). *Nanotoxicology* 10, 818–828. <https://doi.org/10.3109/17435390.2015.1133864>.
12. Anjum, N.A., Singh, N., Singh, M.K., Shah, Z.A., Duarte, A.C., Pereira, E., et al., 2013. Singlebilayer graphene oxide sheet tolerance and glutathione redox systemsignificance assessment in faba bean (*Vicia faba* L.). *J. Nanopart. Res.* 15, 1770. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1770-7>.
13. Liu, Q., Zhao, Y., Wan, Y., Zheng, J., Zhang, X., Wang, C., et al., 2010. Study of the inhibitory effect of water-soluble fullerenes on plant growth at the cellular level. *ACS Nano* 4, 5743–5748. <https://doi.org/10.1021/nn101430g>.
14. Liu, Q., Zhang, X., Zhao, Y., Lin, J., Shu, C., Wang, C., et al., 2013. Fullerene-induced increase of glycosyl residue on living plant cell wall. *Environ. Sci. Technol.* 47, 7490–7498. <https://doi.org/10.1021/es4010224>.
15. Lin, S., Reppert, J., Hu, Q., Hudson, J.S., Reid, M.L., Ratnikova, T.A., et al., 2009. Uptake, translocation, and transmission of carbon nanomaterials in rice plants. *Small* 5, 1128–1132. <https://doi.org/10.1002/sml.200801556>.
16. Tao, X., Yu, Y., Fortner, J.D., He, Y., Chen, Y., Hughes, J.B., 2015. Effects of aqueous stable fullerene nanocrystal (nC60) on *Scenedesmus obliquus*: evaluation of the sub-lethal photosynthetic responses and inhibition mechanism. *Chemosphere* 122, 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.035>.
17. Ma, X., Wang, C., 2010. Fullerene nanoparticles affect the fate and uptake of trichloroethylene in phytoremediation systems. *Environ. Eng. Sci.* 27, 989–992. <https://doi.org/10.1089/ees.2010.0141>.
18. Santos, S.M., Dinis, A.M., Rodrigues, D.M., Peixoto, F., Videira, R.A., Jurado, A.S., 2013. Studies on the toxicity of an aqueous suspension of C60 nanoparticles using a bacterium (gen. *Bacillus*) and an aquatic plant (*Lemna gibba*)

as in vitro model systems. *Aquat. Toxicol.* 142, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.09.001>.

19. De La Torre-Roche, R., Hawthorne, J., Deng, Y., Xing, B., Cai, W., Newman, L.A., et al., 2013. Multiwalled carbon nanotubes and C60 fullerenes differentially impact the accumulation of weathered pesticides in four agricultural plants. *Environ. Sci. Technol.* 47, 12539–12547. <https://doi.org/10.1021/es4034809>.

20. Kelsey, J.W., White, J.C., 2013. Effect of C60 fullerenes on the accumulation of weathered p,p'-DDE by plant and earthworm species under single and multispecies conditions. *Environ. Toxicol. Chem.* 32, 1117–1123. <https://doi.org/10.1002/etc.2158>.

21. De La Torre-Roche, R., Hawthorne, J., Deng, Y., Xing, B., Cai, W., Newman, L.A., et al., 2012. Fullerene-enhanced accumulation of p,p'-DDE in agricultural crop species. *Environ. Sci. Technol.* 46, 9315–9323. <https://doi.org/10.1021/es301982w>.

22. Zhang, X., Liu, Q., Xia, T., Li, N., He, K., Wang, C., et al., 2013. Atomic forcemicroscopy study of the effects of water-soluble fullerenes on the elasticity of living plant cells. *Chemistry—An Asian Journal* 8, 2388–2394. <https://doi.org/10.1002/asia.201300522>.

23. Avanası, R., Jackson, W.A., Sherwin, B., Mudge, J.F., Anderson, T.A., 2014. C60 fullerene soil sorption, biodegradation, and plant uptake. *Environ. Sci. Technol.* 48, 2792–2797. <https://doi.org/10.1021/es405306w>.

24. Yavari, S., Malakahmad, A., Sapari, N.B., Yavari, S., 2018. Fullerene C60 for enhancing phytoremediation of urea plant wastewater by timber plants. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 11351–11363. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1345-3>.

25. Panova, G., Ktitorova, I., Skobeleva, O., Sinjavina, N., Charykov, N., Semenov, K., 2016. Impact of polyhydroxy fullerene (fullerol or fullerol) on growth and biophysical characteristics of barley seedlings in favourable and stressful conditions. *Plant Growth Regul.* 79, 309–317. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0135-x>

26. Liang, C., Xiao, H., Hu, Z., Zhang, X., Hu, J., 2018. Uptake, transportation, and accumulation of C60 fullerene and heavy metal ions (Cd, Cu, and Pb) in rice plants grown in an agricultural soil. *Environ. Pollut.* 235, 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.062>.
27. Xiong, J.-L., Li, J., Wang, H.-C., Zhang, C.-L., Naeem, M.S., 2018. Fullerol improves seed germination, biomass accumulation, photosynthesis and antioxidant system in *Brassica napus* L. under water stress. *Plant Physiol. Biochem.* <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.026>.
28. Borišev, M., Borišev, I., Župunski, M., Arsenov, D., Pajević, S., Ćurčić, Ž., et al., 2016. Drought impact is alleviated in sugar beets (*Beta vulgaris* L.) by foliar application of fullerol nanoparticles. *PLoS One* 11, e0166248. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166248>
29. Wang, C., Zhang, H., Ruan, L., Chen, L., Li, H., Chang, X.-L., et al., 2016. Bioaccumulation of <sup>13</sup>C-fullerol nanomaterials in wheat. *Environmental Science: Nano* 3, 799–805. <https://doi.org/10.1039/C5EN00276>
30. Lin, J., Chen, X., Peng, H., 2016. Graphene-based nanomaterials for bioimaging. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 105, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.05.013>.
31. Zhang, P., Zhang, R., Fang, X., Song, T., Cai, X., Liu, H., et al., 2016. Toxic effects of graphene on the growth and nutritional levels of wheat (*Triticum aestivum* L.): short-and longterm exposure studies. *J. Hazard. Mater.* 317, 543–551. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.019>.
32. Nair, R., Mohamed, M.S., Gao, W., Maekawa, T., Yoshida, Y., Ajayan, P.M., et al., 2012. Effect of carbon nanomaterials on the germination and growth of rice plants. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 12, 2212–2220. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.5775>.
33. Zhang, M., Gao, B., Chen, J., Li, Y., 2015. Effects of graphene on seed germination and seedling growth. *J. Nanopart. Res.* 17, 78. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2885-9>.

34. Liu, S., Wei, H., Li, Z., Li, S., Yan, H., He, Y., et al., 2015. Effects of graphene on germination and seedling morphology in rice. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 15, 2695–2701.
35. Ren, W., Chang, H., Teng, Y., 2016. Sulfonated graphene-induced hormesis is mediated through oxidative stress in the roots of maize seedlings. *Sci. Total Environ.* 572, 926–934. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.214>.
36. Ren, W., Chang, H., Wang, Y., Teng, Y., Ma, W., Luo, Y., 2018. Effect of sulfonated graphene on uptake, translocation, and metabolism of 2,4,4'-trichlorobiphenyl in maize seedlings. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 1–13 <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2203-z>
37. V., Perman, J.A., Tucek, J., Zboril, R., 2015. Broad family of carbon nanoallotropes: classification, chemistry, and applications of fullerenes, carbon dots, nanotubes, graphene, nanodiamonds, and combined superstructures. *Chem. Rev.* 115, 4744–4822. <https://doi.org/10.1021/cr500304f>.
38. Begum, P., Ikhtiari, R., Fugetsu, B., 2011. Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce. *Carbon* 49, 3907–3919. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.05.029>
39. Anjum, N.A., Singh, N., Singh, M.K., Sayeed, I., Duarte, A.C., Pereira, E., et al., 2014. Single bilayer graphene oxide sheet impacts and underlying potential mechanism assessment in germinating faba bean (*Vicia faba* L.). *Sci. Total Environ.* 472, 834–841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.018>.
40. Wang, Q., Zhao, S., Zhao, Y., Rui, Q., Wang, D., 2014. Toxicity and translocation of graphene oxide in *Arabidopsis* plants under stress conditions. *RSC Adv.* 4, 60891–60901. <https://doi.org/10.1039/C4RA10621K>.
41. Hu, X., Zhou, Q., 2014. Novel hydrated graphene ribbon unexpectedly promotes aged seed germination and root differentiation. *Sci. Rep.* 4, 3782. <https://doi.org/10.1038/srep03782>.
42. Zhao, S., Wang, Q., Zhao, Y., Rui, Q., Wang, D., 2015. Toxicity and translocation of graphene oxide in *Arabidopsis thaliana*. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 39, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2014.11.014>.

43. Jiao, J., Cheng, F., Zhang, X., Xie, L., Li, Z., Yuan, C., et al., 2016. Preparation of graphene oxide and its mechanism in promoting tomato roots growth. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 16, 4216–4223. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.12601>.
44. Cheng, F., Liu, Y.-F., Lu, G.-Y., Zhang, X.-K., Xie, L.-L., Yuan, C.-F., et al., 2016. Graphene oxide modulates root growth of *Brassica napus* L. and regulates ABA and IAA concentration. *J. Plant Physiol.* 193, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.02.011>.
45. Zhou, Q., Hu, X., 2017. Systemic stress and recovery patterns of rice roots in response to graphene oxide nanosheets. *Environ. Sci. Technol.* 51, 2022–2030. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05591>.
46. Chen, L., Wang, C., Li, H., Qu, X., Yang, S.-T., Chang, X.-L., 2017. Bioaccumulation and toxicity of <sup>13</sup>C-skeleton labeled graphene oxide in wheat. *Environ. Sci. Technol.* 51, 10146–10153. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00822>.
47. Chen, L., Yang, S., Liu, Y., Mo, M., Guan, X., Huang, L., et al., 2018. Toxicity of graphene oxide to naked oats (*Avena sativa* L.) in hydroponic and soil cultures. *RSC Adv.* 8, 15336–15343. <https://doi.org/10.1039/C8RA01753K>.
48. Hu, C., Liu, L., Li, X., Xu, Y., Ge, Z., Zhao, Y., 2018. Effect of graphene oxide on copper stress in *Lemna minor* L.: evaluating growth, biochemical responses, and nutrient uptake. *J. Hazard. Mater.* 341, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.061>.
49. Yin, L., Wang, Z., Wang, S., Xu, W., Bao, H., 2018. Effects of graphene oxide and/or Cd<sup>2+</sup> on seed germination, seedling growth, and uptake to Cd<sup>2+</sup> in solution culture. *Water Air Soil Pollut.* 229, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3809-y>.
50. Carniel, F.C., Gorelli, D., Flahaut, E., Fortuna, L., Del Casino, C., Cai, G., et al., 2018. Graphene oxide impairs the pollen performance of *Nicotiana tabacum* and *Corylus avellana* suggesting potential negative effects on the sexual reproduction of seed plants. *Environmental Science: Nano* <https://doi.org/10.1039/C8EN00052B>.

51. Li, F., Sun, C., Li, X., Yu, X., Luo, C., Shen, Y., et al., 2018. The effect of graphene oxide on adventitious root formation and growth in apple. *Plant Physiol. Biochem.* <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.029>.
52. Shen, S., Liu, Y., Wang, F., Yao, G., Xie, L., Xu, B., 2018. Graphene oxide regulates root development and influences IAA concentration in Rice. *J. Plant Growth Regul.*, 1–8 <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9836-5>.
53. Lin, X., Chen, L., Hu, X., Feng, S., Huang, L., Quan, G., et al., 2017. Toxicity of graphene oxide to white moss *Leucobryum glaucum*. *RSC Adv.* 7, 50287–50293. <https://doi.org/10.1039/C7RA10096E>.
54. Sun, H., Feng, R., Nan, Y., Chen, Z., Sang, N., 2018. In-situ examination of graphene and graphene oxide impact on the depuration of phenanthrene and fluoranthene adsorbed onto spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaf surfaces. *Environ. Pollut.* 237, 968–976. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.007>.
55. Wang, S., Shang, L., Li, L., Yu, Y., Chi, C., Wang, K., et al., 2016. Metal–organic-framework-derived mesoporous carbon nanospheres containing porphyrin-like metal centers for conformal phototherapy. *Adv. Mater.* 28, 8379–8387. <https://doi.org/10.1002/adma.201602197>.
56. Hao, Y., Xu, B., Ma, C., Shang, J., Gu, W., Li, W., et al., 2018. Synthesis of novel mesoporous carbon nanoparticles and their phytotoxicity to rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Saudi Chemical Society* <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.05.003>.
57. Yan, Q.-L., Yan, Gozin M., Zhao, F.-Q., Cohena, A., Pangc, S.-P., 2016. Highly energetic compositions based on functionalized carbon nanomaterials. *Nanoscale* 8, 4799–4851. <https://doi.org/10.1039/C5NR07855E>.
58. Liang, T.-B., Yin, Q.-S., Zhang, Y.-L., Wang, B.-L., Guo, W.-M., Wang, J.-W., et al., 2013. Effects of carbon nanoparticles application on the growth, physiological characteristics and nutrient accumulation in tobacco plants. *J. Food. Agric. Environ.* 11, 954–958.

59. Saxena, M., Maity, S., Sarkar, S., 2014. Carbon nanoparticles in 'biochar' boost wheat (*Triticum aestivum*) plant growth. *RSC Adv.* 4, 39948–39954. <https://doi.org/10.1039/C4RA06535B>.
60. Li, W., Zheng, Y., Zhang, H., Liu, Z., Su, W., Chen, S., et al., 2016. Phytotoxicity, uptake, and translocation of fluorescent carbon dots in mung bean plants. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8, 19939–19945. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b07268>
61. Vandarkuzhali, S.A.A., Jeyalakshmi, V., Sivaraman, G., Singaravadivel, S., Krishnamurthy, K.R., Viswanathan, B., 2017. Highly fluorescent carbon dots from pseudo-stem of banana plant: applications as nanosensor and bio-imaging agents. *Sensors Actuators B Chem.* 252, 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.06.088>.)
62. Zhang, H., Yue, M., Zheng, X., Xie, C., Zhou, H., Li, L., 2017. Physiological effects of single and multi-walled carbon nanotubes on rice seedlings. *IEEE Transactions on Nanobioscience* 16, 563–570. <https://doi.org/10.1109/TNB.2017.2715359>.
63. Wang, H., Zhang, M., Song, Y., Li, H., Huang, H., Shao, M., et al., 2018. Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts. *Carbon* 136, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.051>.
64. Qian, K., Guo, H., Chen, G., Ma, C., Xing, B., 2018. Distribution of different surface modified carbon dots in pumpkin seedlings. *Sci. Rep.* 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26167-0>.
65. Georgakilas, V., Perman, J.A., Tucek, J., Zboril, R., 2015. Broad family of carbon nanoallotropes: classification, chemistry, and applications of fullerenes, carbon dots, nanotubes, graphene, nanodiamonds, and combined superstructures. *Chem. Rev.* 115, 4744–4822. <https://doi.org/10.1021/cr500304f>.
66. Ghodake, G., Seo, Y.D., Park, D., Lee, D.S., 2010. Phytotoxicity of carbon nanotubes assessed by *Brassica juncea* and *Phaseolus mungo*. *J. Nanoelectron. Optoelectron.* 5, 157–160. <https://doi.org/10.1166/jno.2010.1084>.

67. Tripathi, S., Sonkar, S.K., Sarkar, S., 2011. Growth stimulation of gram (*Cicer arietinum*) plant by water soluble carbon nanotubes. *Nanoscale* 3, 1176–1181. <https://doi.org/10.1039/C0NR00722F>.
68. Morla, S., Rao, C.R., Chakrapani, R., 2011. Factors affecting seed germination and seedling growth of tomato plants cultured in vitro conditions. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences (JCBPS)* 1, 328.
69. Khodakovskaya, M.V., de Silva, K., Nedosekin, D.A., Dervishi, E., Biris, A.S., Shashkov, E.V., et al., 2011. Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 1028–1033. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008856108>.
70. Wang, X., Han, H., Liu, X., Gu, X., Chen, K., Lu, D., 2012. Multi-walled carbon nanotubes can enhance root elongation of wheat (*Triticum aestivum*) plants. *J. Nanopart. Res.* 14, 841. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-0841-5>.
71. Villagarcia, H., Dervishi, E., de Silva, K., Biris, A.S., Khodakovskaya, M.V., 2012. Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small* 8, 2328–2334. <https://doi.org/10.1002/smll.201102661>.
72. Maurel, C., 2007. Plant aquaporins: novel functions and regulation properties. *FEBS Lett.* 581, 2227–2236. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.03.021>.
73. Khodakovskaya, M.V., Kim, B.S., Kim, J.N., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., et al., 2013. Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small* 9, 115–123. <https://doi.org/10.1002/smll.201201225>.
74. Khodakovskaya, M.V., de Silva, K., Biris, A.S., Dervishi, E., Villagarcia, H., 2012. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS Nano* 6, 2128–2135. <https://doi.org/10.1021/nn204643g>.
75. Jiang, X., Qu, W., Pan, D., Ren, Y., Williford, J.M., Cui, H., et al., 2013. Plasmid-templated shape control of condensed DNA–block copolymer nanoparticles. *Adv. Mater.* 25, 227–232. <https://doi.org/10.1002/adma.201202932>.

76. Miralles, P., Johnson, E., Church, T.L., Harris, A.T., 2012. Multiwalled carbon nanotubes in alfalfa and wheat: toxicology and uptake. *J. R. Soc. Interface* 9, 3514–3527. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0535>.

77. Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li, Z., Watanabe, F., et al., 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano* 3, 3221–3227. <https://doi.org/10.1021/nn900887m>.

78. Lahiani, M.H., Dervishi, E., Chen, J., Nima, Z., Gaume, A., Biris, A.S., et al., 2013. Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 5, 7965–7973. <https://doi.org/10.1021/am402052x>.

79. Tiwari, D., Dasgupta-Schubert, N., Villasenor, L., Tripathi, D., Villegas, J., 2013b. Interaction of carbon nanotubes with mineral nutrients for the promotion of growth of tomato seedlings. *Nano Studies* 7, 87–96.

80. Serag, M.F., Kaji, N., Habuchi, S., Bianco, A., Baba, Y., 2013. Nanobiotechnology meets plant cell biology: carbon nanotubes as organelle targeting nanocarriers. *RSC Adv.* 3, 4856–4862. <https://doi.org/10.1039/C2RA22766E>.

81. Haghghi, M., da Silva, J.A.T., 2014. The effect of carbon nanotubes on the seed germination and seedling growth of four vegetable species. *J. Crop. Sci. Biotechnol.* 17, 201–208. <https://doi.org/10.1007/s12892-014-0057-6>.

82. Tiwari, D., Dasgupta-Schubert, N., Cendejas, L.V., Villegas, J., Montoya, L.C., Garcia, S.B., 2013a. Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Appl. Nanosci.* 4, 577. <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0236-7>.

83. Ghosh, M., Chakraborty, A., Bandyopadhyay, M., Mukherjee, A., 2011. Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT): induction of DNA damage in plant and mammalian cells. *J. Hazard. Mater.* 197, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.090>.

84. Ghosh, M., Bhadra, S., Adegoke, A., Bandyopadhyay, M., Mukherjee, A., 2015a. MWCNT uptake in *Allium cepa* root cells induces cytotoxic and

genotoxic responses and results in DNA hyper-methylation. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 774, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2015.03.004>.

85. Ghosh, M., Bhadra, S., Adegoke, A., Bandyopadhyay, M., Mukherjee, A., 2015b. MWCNT uptake in *Allium cepa* root cells induces cytotoxic and genotoxic responses and results in DNA hyper-methylation. *Mutat. Res.* 774, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2015.03.004>.

86. Taha, R.A., Hassan, M.M., Ibrahim, E.A., Baker, N.H.A., Shaaban, E.A., 2016. Carbon nanotubes impact on date palm in vitro cultures. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 127, 525–534. <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1058-6>.

87. Hatami, M., 2017. Toxicity assessment of multi-walled carbon nanotubes on *Cucurbita pepo* L. under well-watered and water-stressed conditions. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 142, 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.04.018>.

88. Joshi, A., Kaur, S., Dharamvir, K., Nayyar, H., Verma, G., 2018. Multi-walled carbon nanotubes applied through seed-priming influence early germination, root hair, growth and yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Sci. Food Agric.* 98, 3148–3160. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8818>.

89. Yuan, Z., Zhang, Z., Wang, X., Li, L., Cai, K., Han, H., 2017. Novel impacts of functionalized multi-walled carbon nanotubes in plants: promotion of nodulation and nitrogenase activity in the rhizobium-legume system. *Nanoscale* 9, 9921–9937. <https://doi.org/10.1039/c7nr01948c>.

90. McGehee, D.L., Lahiani, M.H., Irin, F., Green, M.J., Khodakovskaya, M.V., 2017. Multiwalled carbon nanotubes dramatically affect the fruit metabolome of exposed tomato plants. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9, 32430–32435. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b10511>.

91. Oloumi, H., Mousavi, E.A., Nejad, R.M., 2018. Multi-wall carbon nanotubes effects on plant seedlings growth and cadmium/lead uptake in vitro. *Russ. J. Plant Physiol.* 65, 260–268. <https://doi.org/10.1134/S102144371802019X>.

92. Tan, X.-m., Lin, C., Fugetsu, B., 2009. Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on suspension rice cells. *Carbon* 47, 3479–3487. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.08.018>.
93. Liu, Q., Chen, B., Wang, Q., Shi, X., Xiao, Z., Lin, J., et al., 2009. Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells. *Nano Lett.* 9, 1007–1010. <https://doi.org/10.1021/nl803083u>.
94. Zhai, G., Gutowski, S.M., Walters, K.S., Yan, B., Schnoor, J.L., 2015. Charge, size, and cellular selectivity for multiwall carbon nanotubes by maize and soybean. *Environ. Sci. Technol.* 49, 7380–7390. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01145>.
95. Shen, C.-X., Zhang, Q.-F., Li, J., Bi, F.-C., Yao, N., 2010. Induction of programmed cell death in Arabidopsis and rice by single-wall carbon nanotubes. *Am. J. Bot.* 97, 1602–1609. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000073>.
96. Begum, P., Fugetsu, B., 2012. Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor* L) and the role of ascorbic acid as an antioxidant. *J. Hazard. Mater.* 243, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.025>.
97. Voleti R, Wait D. Effect of carbon nanotubes on plant growth and gas exchange using Arabidopsis thaliana. Technical proceedings of the 2014 nsti nanotechnology conference and expo. Cambridge: NSTI-Nanotech, 2014, pp. 3.
98. Martínez-Ballesta, M.C., Zapata, L., Chalbi, N., Carvajal, M., 2016. Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *Journal of Nanobiotechnology* 14, 42. <https://doi.org/10.1186/s12951-016-0199-4>.
99. Fan, X., Xu, J., Lavoie, M., Peijnenburg, W., Zhu, Y., Lu, T., et al., 2018. Multiwall carbon nanotubes modulate paraquat toxicity in Arabidopsis thaliana. *Environ. Pollut.* 233, 633–641. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.116>.
100. Lahiani, M.H., Nima, Z.A., Villagarcia, H., Biris, A.S., Khodakovskaya, M.V., 2017. Assessment of effects of the long-term exposure of

agricultural crops to carbon nanotubes. *J. Agric. Food Chem.*  
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01863>.

101. Hatami, M., Hadian, J., Ghorbanpour, M., 2017. Mechanisms underlying toxicity and stimulatory role of single-walled carbon nanotubes in *Hyoscyamus niger* during drought stress simulated by polyethylene glycol. *J. Hazard. Mater.* 324, 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.064>.

102. Deng, Y., Eitzer, B., White, J.C., Xing, B., 2017. Impact of multiwall carbon nanotubes on the accumulation and distribution of carbamazepine in collard greens (*Brassica oleracea*). *Environmental Science: Nano* 4, 149–159. <https://doi.org/10.1039/C6EN00419A>.

103. Das, K.K., You, Y., Torres, M., Barrios-Masias, F., Wang, X., Tao, S., et al., 2018. Development and application of a digestion-Raman analysis approach for studying multiwall carbon nanotube uptake in lettuce. *Environmental Science: Nano* 5, 659–668. <https://doi.org/10.1039/C7EN01047H>.

104. Zaytseva, O., Neumann, G., 2016. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 3, 17. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0070-8>.

105. Zaytseva, O., Wang, Z., Neumann, G., 2017. Phytotoxicity of carbon nanotubes in soybean as determined by interactions with micronutrients. *J. Nanopart. Res.* 19, 29. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3722-5>.

106. *Brassica oleracea: From Kale to Cabbage*. Gardener's Path. URL: <https://gardenerspath.com/brassica-oleracea-vegetables/>

107. Нечитайло В. А., Кучерява Л. Ф. Ботаніка. Вищі рослини. — Київ, Фітосоціоцентр. 2001. ст. 252

108. CABBAGE AND ITS BENEFITS. – Farm360. Farm360 – Farm360. URL: <https://farm360global.com/cabbage-and-its-benefits/> (date of access: 22.09.2024).

109. Kays SJ and Dias JCS (1996) *Cultivated Vegetables of the World*. Athens, GA: Exon Press

110. Natural History of Pompeii. Cambridge University Press. 2002. p. 94. ISBN 978-0-521-80054-9 Ingram, Christine (2000). The Cook's Guide to Vegetables. Hermes House. pp. 64–66. ISBN 978-1-84038-842-8.
111. Lucier G (1999) Broccoli: Super food for all seasons. Agricultural Outlook April: 8–12. Washington, DC: Economic Research Service, USDA.
112. Broccoli's Fascinating History Unearthed. BeMicro. URL: <https://bemicro.farm/blogs/microgreens-news/broccolis-fascinating-history-unearthed?srsltid=AfmBOorhpw3XXutLwIG8PAI4vOAnPS1Qunn9cQAi1DHoc3-0fCtIBJIX>
113. Капуста городня (білокачанна) - Фактосвіт. Фактосвіт. URL: [https://factosvit.com.ua/kapusta-gorodnya-bilokachanna/#google\\_vignette](https://factosvit.com.ua/kapusta-gorodnya-bilokachanna/#google_vignette)
114. Dixon, Geoffrey R. (2007). Vegetable Brassicas and Related Crucifers. Crop Production Science in Horticulture. Vol. 14. CAB International. ISBN 978-0-85199-395-9.
115. Delahaut, K. A.; Newenhouse, A. C (1997). "Growing broccoli, cauliflower, cabbage and other cole crops in Wisconsin"
116. Vecsési savanyú káposzta | Hungarikumok Gyűjteménye - Magyar Értéktár. Hungarikumok Gyűjteménye - Magyar Értéktár. URL: <https://www.hungarikum.hu/hu/content/vecsesi-savanyu-kaposzta>
117. Bradley, Fern Marshall; Ellis, Barbara W.; Martin, Deborah L., eds. (2009). The Organic Gardener's Handbook of Natural Pest and Disease Control. Rodale, Inc. ISBN 978-1-60529-677-7.
118. Капуста городня // Лікарські рослини : енциклопедичний довідник / за ред. А. М. Гродзінського. — Київ : Видавництво «Українська Енциклопедія» ім. М. П. Бажана, Український виробничо-комерційний центр «Олімп», 1992. — С. 194. — ISBN 5-88500-055-7.
119. Maynard, Donald N.; Hochmuth, George J. (2007). Knott's Handbook for Vegetable Growers (5th ed.). Wiley. ISBN 978-0-471-73828-2.]

120. "Crops/Regions/World list/Production Quantity (pick lists), Cabbages and other brassicas, 2020". UN Food and Agriculture Organization, Corporate Statistical Database (FAOSTAT). 2022. Retrieved 20 January 2022.

121. Колісник Ю.С. Пігменти трави грициків звичайних (*Capsella bursa-pastoris*) / Ю. С. Колісник, В. С. Кисличенко, В. Ю. Кузнецова // Фармацевтичний журнал. — 2013. — № 1. — С. 75–77 .

122. Nasrabadi H. Some biochemical properties of catalase from Kohlrabi // J. Biol. Sci. — 2008. — 8, N 3. — P. 649—653.