

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет захисту рослин, біотехнології та екології**

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету
захисту рослин, біотехнологій та
екології
_____ Коломієць Ю.В.
« ____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
фізіології, біохімії рослин та
біоенергетики
_____ Прилуцька С.В.
« ____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Комплексний вплив вуглецевих наночастинок та добрив на біохімічні показники пшениці»

Спеціальність G21 «Біотехнологія та біоінженерія»

(код і назва)

Освітня програма «Екологічна біотехнологія та біоенергетика»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.с.-г.н., професор

(підпис)

Лісовий М.М.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д.б.н., професор

(підпис)

Прилуцька С.В.

Виконала

(підпис)

Дідур Є.О.

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
фізіології, біохімії рослин та біоенергетики
д.б.н., професор _____ Світлана ПРИЛУЦЬКА
« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ ДІДУР ЄЛИЗАВЕТИ ОЛЕКСАНДРІВНИ

Спеціальність G21 Біотехнології та біоінженерія

Освітня програма «Екологічна біотехнологія та біоенергетика»

Орієнтація освітньої програми Освітньо професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Комплексний вплив вуглецевих наночастинок та добрив на біохімічні показники пшениці»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «07» листопада 2024 р. № 2005 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14 листопада 2025 року.

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: насіння пшениці озимої сортів Актер та Патрас, мінеральне азотне добриво (аміачна селітра), вуглецеві наночастинок (графен оксид GO та фулерен C₆₀), протоколи біохімічних аналізів для визначення вмісту МДА, фотосинтетичних пігментів, ферментативної активності.

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Оцінити морфометричні показники *Triticum aestivum* після дії різних концентрацій графен оксиду GO та фулерену C₆₀ та у комбінації з мінеральним добривом.
2. Оцінити активність каталази у *Triticum aestivum* як маркеру оксидативного стресу після дії різних концентрацій графен оксиду GO та фулерену C₆₀ та у комбінації з мінеральним добривом.
3. Оцінити вміст фотосинтетичних пігментів у *Triticum aestivum* після дії різних концентрацій графен оксиду GO та фулерену C₆₀ та у комбінації з мінеральним добривом.
4. Оцінити вміст малонового діальдегіду у *Triticum aestivum* після дії різних концентрацій графен оксиду GO та фулерену C₆₀ та у комбінації з мінеральним добривом.

Дата видачі завдання 23 жовтня 2024 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ Світлана ПРИЛУЦЬКА
(підпис)

Завдання прийняла до виконання

_____ Єлизавета ДІДУР
(підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Комплексний вплив вуглецевих наночастинок та добрив на біохімічні показники пшениці» виконана у навчально-науковій лабораторії «Біохімії та фітобіотехнології» кафедри фізіології, біохімії рослин та біоенергетики та представлена в обсязі 77 сторінок формату А4, містить 9 таблиць, і 39 рисунків, складається з таких розділів:

- Вступ
- Огляд літератури
- Матеріали і методи
- Результати та їх обговорення
- Висновки
- Список використаних джерел

Актуальність теми: екологічні проблеми, викликані накопиченням традиційних мінеральних добрив у ґрунті внаслідок їхнього використання у сільському господарстві, стимулюють розробку новітніх добрив з повільнішим вивільненням поживних речовин. Дедалі частіше привертають увагу вуглецеві наночастинок, зокрема графен оксид (GO) і фулерен C₆₀, через свою нанорозмірну структуру та хімічно активну поверхню, які дозволяють не тільки підвищити ефективність доставки і, в результаті, зменшити кількість витрат добрив, але і посилити стійкість сільськогосподарських культур до біотичних та абіотичних стресів, що сприяє розвитку сталого сільського господарства.

Об'єкт дослідження: комплексний вплив вуглецевих наночастинок та добрив на біохімічні показники пшениці.

Предмет дослідження: графен оксид GO, фулерен C₆₀, мінеральне добриво, пшениця озима *Triticum aestivum*.

Методи дослідження: фізіологічні, біохімічні, морфометричні, спектрофотометричні, статистичні.

Мета роботи: дослідити вплив вуглецевих наночастинок (графен оксиду GO і фулерену C₆₀) за різних концентрацій (0,5 мкг/мл, 1,0 мкг/мл, 1,5 мкг/мл, 2,0 мкг/мл) окремо та за комплексної дії з мінеральним добривом в аналогічних концентраціях на біохімічні параметри пшениці м'якої *Triticum aestivum* L. Дослідити їх вплив на вміст білку, фотосинтетичних пігментів, малонового діальдегіду, активність АОЕ – каталази.

Для досягнення поставлені такі **завдання:**

- Провести аналіз літературних даних про застосування вуглецевих наночастинок у сільському господарстві.
- Провести аналіз літературних даних щодо фітотоксичності вуглецевих наночастинок.
- Оцінити морфометричні показники *Triticum aestivum* після дії різних концентрацій графен оксиду GO та фулерену C₆₀ та у комбінації з мінеральним добривом.
- Оцінити активність каталази у *Triticum aestivum* як маркеру оксидативного стресу після дії різних концентрацій графен оксиду GO та фулерену C₆₀ та у комбінації з мінеральним добривом.
- Оцінити вміст фотосинтетичних пігментів у *Triticum aestivum* після дії різних концентрацій графен оксиду GO та фулерену C₆₀ та у комбінації з мінеральним добривом.
- Оцінити вміст малонового діальдегіду у *Triticum aestivum* після дії різних концентрацій графен оксиду GO та фулерену C₆₀ та у комбінації з мінеральним добривом.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1. Характеристика наночастинок.....	9
1.1.1. Класифікація та варіативність форм наночастинок	10
1.2. Характеристика та морфологія зернових культур	16
1.2.1. Пшениця	17
1.3. Характеристика нано- та традиційних добрив.....	19
1.3.1. Нанодобрива	21
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ	23
2.1. Реактиви та обладнання.....	23
2.2. Передпосівна обробка насіння.....	23
2.3. Оцінка морфометричних показників	24
2.4. Визначення ферментативної активності.....	34
2.5. Визначення вмісту фотосинтетичних пігментів у <i>Triticum aestivum</i> спектрофотометричним методом	35
2.6. Визначення вмісту малонового диальдегіду у <i>Triticum aestivum</i> спектрофотометричним методом	36
2.7. Статистична обробка даних	37
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	38
3.1. Вплив фулерену C ₆₀ , графен оксиду GO та їх комбінованої дії з мінеральним добривом на морфометричні показники <i>T. aestivum</i>	38
3.2. Активність каталази у <i>T. aestivum</i> після дії фулерену C ₆₀ , графен оксиду GO та їх комбінованої дії з мінеральним добривом	47

3.3. Вплив фулерену C ₆₀ , графен оксиду GO та їх комбінованої дії з мінеральним добривом на вміст пігментів у листі <i>T. aestivum</i>	53
3.4. Вплив фулерену C ₆₀ , графен оксиду GO та їх комбінованої дії з мінеральним добривом на вміст МДА у <i>T. aestivum</i>	59
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

ВСТУП

Мінеральні добрива є важливим інструментом забезпечення глобальної продовольчої безпеки, оскільки за оцінками FAO вони забезпечують від 40 до 60 % приросту врожайності сільськогосподарських культур у світі [22, 58]. Зростання населення планети, яке до 2050 року очікується досягне 9,7 млрд, вимагає збільшення виробництва продовольства на 70 %, що, пропорційно підвищує залежність сільського господарства від мінеральних добрив. Проте, ефективність використання азотних мінеральних добрив лише 30-50 %, фосфорних - 10-25 %, що вказує на те, що значна частина внесених поживних речовин не засвоюється рослинами і втрачається у навколишнє середовище. При цьому світовий ринок мінеральних добрив продовжує зростати, досягаючи понад 200 млн тон щорічно.

Надмірне використання мінеральних добрив спричиняє декілька вагомих екологічних проблем: забруднення водних ресурсів нітратами та фосфатами, що призводить до евтрофікації водойм; закислення ґрунтів, що знижує родючість і порушує структуру, призводячи до деградації ґрунту; акумуляція важких металів з домішок у добривах створює ризики здоров'ю людей і продовольчої безпеки. Європейський Союз встановлює обмеження на внесення азотних добрив та створення буферних зон навколо водойм через Директиву про нітрати (91/676/ЄЕС) [15]. Європейська стратегія "Від ферми до виделки" (Farm to Fork) [23], як частина Європейського зеленого курсу, передбачає зменшення втрат поживних речовин щонайменше на 50 % до 2030 року, а Конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані регулює емісії азоту від сільського господарства на світовому рівні, оскільки з загальних викидів азоту в атмосферу частка сільського господарства складає 10-12 %. Проблеми забруднення мінеральними добривами безпосередньо пов'язані з декількома Цілями сталого розвитку ООН, а саме ЦСР 6 Чиста вода та санітарія, ЦСР 12 Відповідальне споживання та виробництво, ЦСР 14 Збереження морських екосистем і ЦСР 15 Збереження екосистем суші.

Сучасна наука активно розробляє екологічно безпечні альтернативи традиційним добривам, серед яких і інноваційний підхід до оптимізації живлення рослин через нанодобрива та наноносії. Особливу увагу приділяють вуглецевим наночастинкам, а саме фулерену C_{60} та його водорозчинним похідним і графен оксиду GO. Фулерен C_{60} покращує поглинання та утилізацію азоту та інших мінеральних елементів рослинами через модуляцію транспортних систем та активацію ферментів азотного метаболізму [17, 49]. Графен оксид GO може адсорбувати і утримувати катіони поживних речовин (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+) забезпечуючи контрольоване і пролонговане вивільнення поживних речовин та зменшуючи втрати через вимивання [29-30]. Вуглецеві наночастинки можуть підвищити ефективність використання мінеральних добрив на 20-40 % завдяки контрольованому вивільненню та кращому транспорту поживних речовин до кореневої системи, що дозволить зменшити норми внесення традиційних добрив при збереженні або навіть підвищенню врожайності сільськогосподарських культур.

Варто зазначити, що окремі типи вуглецевих наночастин досі не знайшли широкого практичного застосування, незважаючи на їхні перспективні властивості, що підкреслює необхідність подальших досліджень для повної реалізації потенціалу у створенні сталого сільського господарства.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Характеристика наночастинок

Наночастинки - це об'єкти з принаймні одним зовнішнім розміром у нанодіапазоні (1-100 нм), що проявляють специфічні фізико-хімічні властивості, відмінні від властивостей макроскопічного матеріалу тієї ж хімічної природи. Їхня унікальність полягає у співвідношенні розмірів до квантових ефектів, що зумовлює принципово нові оптичні, електромагнітні та каталітичні характеристики [2].

За переглянутою Рекомендацією Європейського Союзу 2011/696/EU від 10.06.2022 наноматеріал визначається як “природній, випадковий або виготовлений наноматеріал, що складається з твердих частинок, присутніх окремо або як ідентифіковані складові частинки в агрегатах або агломератах, де 50 % або більше частинок у числовому розподілі за розмірами відповідає принаймні одній з умов - один або більше зовнішніх розмірів частинки знаходиться в діапазоні від 1 до 100 нм”. Для вуглецевих наночастинок додатковим є критерій питомої площі поверхні $>60 \text{ м}^2/\text{см}^3$ [21].

У США Агенція з охорони навколишнього середовища (EPA) [42], хоч і не встановлює загального визначення наночастинок, але визначає параметри призначені для ідентифікації хімічних речовин “хімічні речовини підлягають регулюванню, якщо вони: 1) є твердими при 25 °C і стандартному атмосферному тиску; 2) виготовляються або обробляються у формі, де будь-які частинки, включаючи агрегати та агломерати, мають розмір 1-100 нм принаймні в одному вимірі; 3) виготовляються для прояву унікальних та нових властивостей”. Управління з контролю продуктів і ліків (FDA) [12] використовує 2 критерії для визначення наноматеріалів “1) матеріал або кінцевий продукт має розмір в діапазоні приблизно 1-100 нм; 2) матеріал або кінцевий продукт розроблений для прояву властивостей або явищ, включаючи фізичні або хімічні властивості чи біологічні ефекти, що відносяться до його розміру, навіть якщо ці розміри виходять за межі діапазону 1-100 нм, до приблизно 1 мікрометра (1000 нм).”

Міжнародний стандарт ISO/TS 80004:2023 визначає наночастинки як “матеріал з будь-яким зовнішнім виміром у нанодіпазоні або з внутрішньою структурою чи поверхневою структурою в нанодіпазоні (1-100 нм)”.

В Україні на сьогоднішній день немає окремого спеціалізованого національного стандарту, який би визначав наноматеріали для всіх сфер їхнього застосування. В період активної євроінтеграції, українські науково-дослідні установи та регуляторні органи керуються міжнародними стандартами ISO та рекомендаціями ЄС для гармонізації законодавства з європейськими нормами.

Вуглецеві наночастинки (ВНЧ), зокрема нанотрубки, квантові точки, наносферичні форми та похідні графену, демонструють значний потенціал для екологічної ремедіації та створення систем пролонгованого вивільнення мінеральних добрив і засобів захисту рослин упродовж тривалих періодів. Багатоманітність форм наночастинок зумавлює унікальні електропровідні та оптоелектронні характеристики у поєднанні з можливістю цілеспрямованої функціоналізації, що визначає їх як унікальні платформи для агротехнічного застосування. Висока питома поверхня, пористість, наявність реакційних центрів, фотокаталітична активність та біологічна сумісність забезпечують надзвичайну адсорбційну здатність, здатність до завантаження активних компонентів та стимул-чутливого вивільнення. При вирішенні екологічних проблем, спричинених надлишковим внесенням агрохімікатів, розробка нових форм наночастинок та модифікація існуючих дозволяє здійснювати точне дозування та контрольоване вивільнення поживних речовин, мінімізуючи наслідки біоаккумуляції у трофічних ланцгах живлення [9, 14].

1.1.1. Класифікація та варіативність форм наночастинок

Відповідно до розмірів виділяють такі групи наночастинок [2]:

0D (нуль-вимірні) - всі три виміри знаходяться в нанодіпазоні, наприклад як у фулеренах (C_{60} , C_{70}), квантових точках, наносферах, нанокластерах.

Фулерени - молекулярні алотропи вуглецю з замкнутою каркасною структурою, утвореною виключно правильними п'яти- та шестикутниками з атомів вуглецю в sp^2 -гібридизації. Найбільш відомий та вивчений представник фулерену це бакмінстерфулерен або фулерен C_{60} , який має форму зрізаного ікосаедра і складається з 60 атомів вуглецю, організований у 12 п'ятикутників і 20 шестикутників (Рис. 1.1.). Він має діаметр зовнішньої поверхні $\sim 0,7$ нм, а для внутрішньої $\sim 0,4$ нм і молекулярну масу 720,66 г/моль. Має два типи зв'язків, короткі подвійні зв'язки між двома шестикутниками ($1,38\text{\AA}$), та довші одинарні зв'язки на межі п'ятикутника та шестикутника ($1,45\text{\AA}$) [48]. У фулерені C_{60} присутній певний sp^3 -характер у класичній sp^2 -зв'язковій системі, що запобігає повній делокалізації π -електронів, роблячи подвійні зв'язки сприйнятливими до реакцій приєднання. Саме це визначає його високу хімічну реактивність через процеси гідрування, галогенування, окиснення, циклоприєднання та функціоналізації [65].

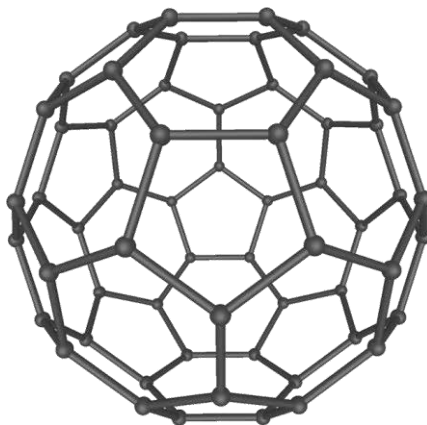


Рис. 1.1. Структура молекули фулерену C_{60}

Друга найпоширеніша варіація фулеренів - це фулерен C_{70} , який має унікальну еліпсоїдну структуру і молекулярну масу 840,77 г/моль (Рис.1.2.). Молекула складається з 12 п'ятикутників та 25 шестикутників атомів вуглецю в sp^2 -гібридизації. Має нижчу симетрію ніж у фулерену C_{60} через наявність додаткового

поясу шестикутників, але має більші внутрішню порожнину і кількість реакційних сайтів, що в свою чергу полегшує інкапсуляцію цільових молекул.

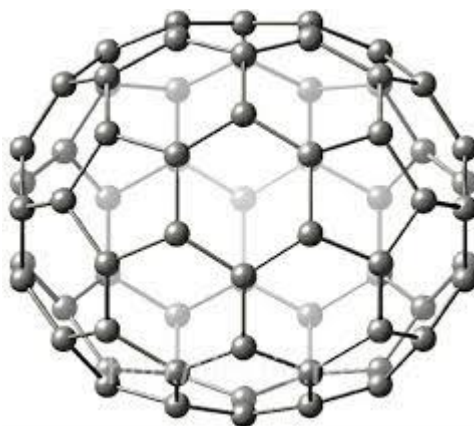


Рис.1.2. Структура молекули фулерену C_{70}

1D (одновимірні) - два виміри знаходяться в нанодіпазоні, третій виходить за його межі, наприклад вуглецеві нанотрубки (одно- і багатостінні), нанодроти, наностержні, нановолокна.

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) - циліндричні структури утворені згортанням графенових листів, з діаметром 0,4-50 нм та довжиною до кількох сантиметрів. Одностінні вуглецеві нанотрубки (Single-walled carbon nanotubes, SWCNTs) складаються з одного шару графену, згорнутого у трубку діаметром 0,2-4 нм (Рис.1.3 *a*).

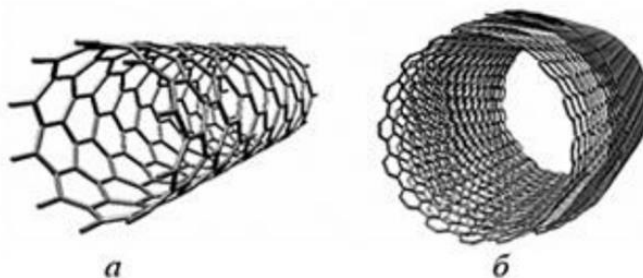


Рис.1.3. Структура одностінних (*a*) та багатостінних (*б*) вуглецевих нанотрубок

Вони розрізняються за хіральністю: зигзаг, крісло та спіральні (Рис. 1.4.), від типу залежать електронні властивості.

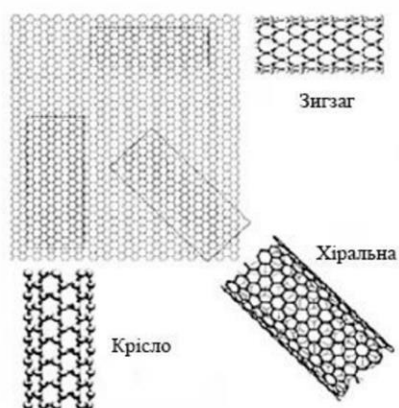


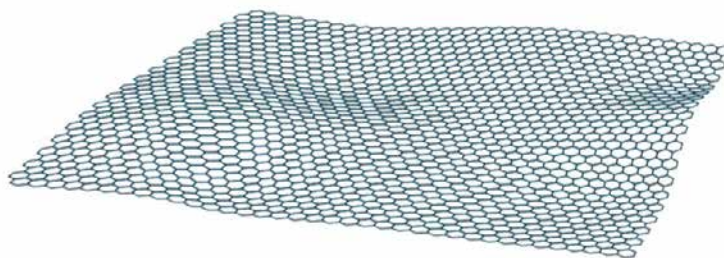
Рис.1.4. Розгортки нанотрубок у графеновій площині

Багатостінні вуглецеві нанотрубки (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs) складаються з декількох шарів графену згорнутим у трубку діаметром 2-50 нм (Рис.1.3 б).

2D (двовимірні) - один вимір в нанодіпазоні (зазвичай товщина), два інші можуть бути більшими, наприклад графен, графен оксид (GO), нанопластинки, наночастиці, нанолісти.

Графен - алотроп вуглецю, який складається з одного шару sp^2 -гібридизованих атомів Карбону організованих у гексагональну ґратку (Рис.1.4.), товщина якої зазвичай не перевищує 0,335 нм, що робить його одним з найтонших матеріалів [20, 33]. Існують одношаровий, двошаровий та багатшаровий графен, які відрізняються своїми електро-магнітними та квантовими властивостями.

Рис. 1.4. Структура моношару графену

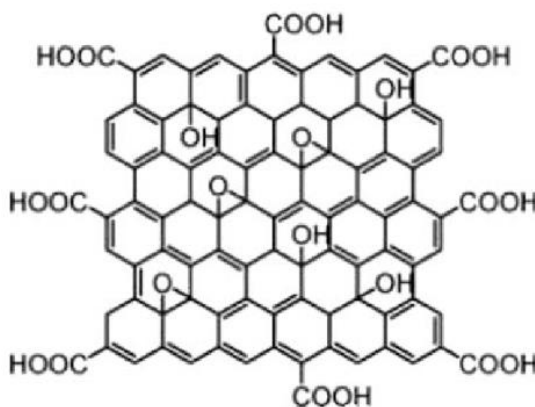


Графен оксид (GO) - функціоналізована форма графену отримана шляхом хімічного окиснення графіту, що містить численні кисневмісні функціональні

групи (епоксидні С-О-С; гідроксильні -ОН; карбоксильні -СООН та карбонільні С=О) по краях та на базовій площині (Рис.1.5.).

Рис.1.5. Структура графен оксиду (GO)

Товщина шару графен оксиду (GO) може коливатися від $\sim 0,7-1,2$ нм, що більше ніж



у графену за рахунок наявності кисневмісних груп, що також робить його високогідрофільним матеріалом [57].

3D (тривимірні) - наноструктуровані матеріали з нанорозмірними компонентами в тривимірній архітектурі, наприклад нанопористі та нанокристалічні матеріали, нанокompозити.

Відповідно до властивостей та загального використання наночастинки поділяються на (Табл. 1.1):

Таблиця 1.1

Класифікація та властивості наночастинок

Походження	Фізико-хімічні властивості	Сфера застосування	Представники
Природні	Пористість, високий заряд, малий розмір, варіативність вкладу	Ґрунтознавство, екологія, біогеохімія	Мінеральні колоїди, вулканічний пил, біогенні наночастинки
Випадкові	Гетерогенність,	Екологічний	Частинки зносу,

	наявність домішок	моніторинг, токсикологія	продукти згоряння, промисловий пил
Інженерні	Висока питома поверхня, контрольована форма і розмір, функціональні групи	Агрохімія, енергетика, електроніка, медицина	Фулерен C ₆₀ , вуглецеві нанотрубки, графен, металеві (Ag, Au, Fe), оксидні (TiO ₂ , ZnO), квантові точки, нанокомпозити, нанополімери
Органічні	Біосумісність, можливість функціоналізації, гнучкість	Біотехнології, фармацевтика, медичні системи доставки препаратів	Ліпосоми, дендримери, полімерні наночастинки
Неорганічні	Каталітичність, електро- і теплопровідність, міцність	Каталіз, сенсори, фармацевтика, промисловість	Металеві (Au, Ag, Cu), оксидні (TiO ₂ , ZnO, Fe ₃ O ₄), силікатні (SiO ₂)
Композитні	Унікальні механічні і хімічні властивості, багатокомпонентна структура	Електроніка, агротехнології	Нанокомпозити, метал-полімерні структури, гібридні наноматеріали

1.2. Характеристика та морфологія зернових культур

Зернові культури становлять основу глобальної продовольчої системи забезпечуючи економічну стабільність. Три основні зернові культури - кукурудза, пшениця і рис - становлять майже 90 % загального світового виробництва зернових. Обсяги виробництва кукурудзи сягають 791,2 млн тонн при площі вирощування у 197 млн га та пшениці - 522,6 млн тонн при площі вирощування 218 млн га щорічно. З цього видно, що при площі меншій на 10,65 %, продуктивність кукурудзи більша на 51,4 % ніж у пшениці [55], що зумовлює стимуляцію врожайності через внесення азотвмісних мінеральних добрив. Використання хімічних добрив значно збільшило світове виробництво продовольства, причому тільки азотні добрива забезпечили збільшення врожайності пшениці на 40-60 % [27]. Зернові культури є найважливішим і найдоступнішим джерелом білку і загальної частки денних калорій, вони забезпечують приблизно 42,5 % калорій та 37 % білку в раціоні людини, зокрема пшениця забезпечує 1/5 глобального рівня [51].

Загальний річний врожай зернових культур сягає 2,5-3 млрд тонн і має вартість понад \$500 млрд, що робить їх найбільш поширеними за обсягом культурами у світі, що продаються [55].

Вирощування зернових культур, зокрема пшениці, має певну роль у виконанні Глобальних цілей, а саме ЦСР 1. Подолання бідності, ЦСР 2. Подолання голоду, ЦСР 5. Гендерна рівність, ЦСР 8. Гідна праця та економічне зростання, ЦСР 12. Відповідальне споживання і виробництво, ЦСР 13. Боротьба зі змінами клімату та ЦСР 15. Збереження екосистем суші.

Зернові культури - сукупність рослин, які вирощуються задля отримання їстівного зерна, яке є основою харчування, кормом для тварин та сировиною для промисловості. Вони поділяються на три основні групи: злакові (пшениця, кукурудза, жито, ячмінь, овес, рис, просо), бобові (горох, квасоля, соя, нут) та гречані (гречка).

Зернові мають мичкувату кореневу систему, яка складається з декількох головних і тонких бічних додаткових коренів. Стебла мають чітко виражені вузли і між ними є порожнистими, за винятком сорго та кукурудзи в яких вони заповнені серцевиною. Листки, які мають паралельне жилкування, розміщені у два ряди вздовж стебла, нижня частина яких охоплює стебло утворює піхви. Зернові здатні утворювати додаткові пагони з базальних бруньок, що утворює характерне кущіння, яке притаманне зерновим. Основним типом суцвіть є справжній колос (пшениця, жито, ячмінь) або волоть (вівсо, рис, просо). Зернові переважно анемофільні, хоча більшість (96 % у пшениці) є висико самозапильними [66]. Характерним типом плоду для злаків, що відрізняє їх від усіх інших, є зернівка, односім'яний сухий плід нерозкривного типу в якому перикарп повністю зрісся з насінневою оболонкою. Зернові культури демонструють принципово різні системи фотосинтезу С3 та С4, що зумовлює їхні фізіологічні властивості, екологічні ніші та продуктивність. С3 зернові (пшениця, рис, ячмінь, овес, жито) становлять 95 % зелених рослин і домінують у помірних і прохолодних кліматах ($t_{\text{опт}}$ - 15-25 °С). С4 зернові (кукурудза, сорго, просо) пристосовані до тропічних та посушливих умов і становлять 5 % зелених рослин, але є надзвичайно продуктивними в теплому кліматі. С4 фотосинтез є еволюційно новим явищем, яке виникло як адаптаційний механізм до високих температур і інтенсивного освітлення [13].

1.2.1. Пшениця

Пшениця - яра або озима однорічна культурна трав'яниста рослина, що належить до родини *Poaceae* (*Gramineae*), роду *Triticum*. Використовується для виготовлення борошна, крупи та інших харчових продуктів. В Україні збирають великі врожаї як продовольчої та і фуражної пшениці.

М'яка (*Triticum aestivum*) і тверда (*Triticum turgidum*) пшениці є найпоширенішими і, відповідно, мають найбільше значення. Площа виробництва зернових культур складає 66 % загальної площі аграрних земель України. За даними Держстату у 2024 році посівна площа пшениці склала 4892,7 тис. га, з якої 4714,3

тис. га для озимої та 178,4 тис. га для ярої. Для порівняння, у 2023 році було засіяно площу під урожай пшениці у 4217,2 тис. га, що менше 13,8 % від площі 2024 року.

У фізіологічних властивостях ярої та озимої пшениці є певні відмінності. Для озимої пшениці характерна сильна верналізація, під впливом низьких температур (0-12 °C) протягом 30-60 днів для індукції цвітіння, має високу морозостійкість (до -20 °C) на ранніх стадіях росту, яка поступово втрачається при переході в трубку та колосіння. В той час як для ярої пшениці слабкіша верналізація. Вона потребує вищої температури (7-18 °C) і меншої тривалості (5-15 днів) для індукції цвітіння, того її висівають навесні аби уникнути перезимівлю [39, 45].

Пшениця є найкращим рослинним об'єктом для комбінування з вуглецевими наночастинками не тільки через свою важливість як сільськогосподарська, але і як найбільш вивчена біологічна зернова культура. Пшениця є гексагаплоїдом з трьома субгеномами, що надає їй генетичну буферність і толерантність до мутацій при внесенні екзогенних речовин, включаючи наночастинки [25]. Вона також має специфічний поріг розмірності поглинання наночастинок: НЧ <36 нм накопичуються в коренях і транслокуються по всіх частинах рослини без розчинення; НЧ ~36-140 нм накопичуються в кореневій паренхімі, але не транслокуються в пагони і інші частини рослини; НЧ >140 нм не акумулюються [37]. Фулерен C₆₀ та графен оксид GO за своєю розмірністю є в оптимальному діапазоні, забезпечуючи транслокацію по всім органам рослини та доставку до фотосинтетичного апарату та репродуктивних органів.

1.3. Характеристика нано- та традиційних добрив

Традиційні мінеральні добрива є синтетичними неорганічними речовинами, які містять мікро- та макроелементи які необхідні для росту і розвитку рослин у концентрованій формі і які виробляються у промислових масштабах. Вони є основою сучасного інтенсивного землеробства з часткою близько 90 % серед усіх добрив, що використовуються у світі. Мінеральні добрива класифікують за типами:

Азотні добрива, де основним елементом живлення рослин є форми азоту, а саме натрати (NO_3^-), амоній (NH_4^+) та аміноациди [43]. Азот основний елемент для синтезу амінокислот, білків, нуклеїнових кислот та хлорофілу, він стимулює розвиток вегетативних частин рослин. Проблема при внесенні азотних добрив полягає у швидкому вимиванні азотних сполук з верхніх шарів ґрунту, що потребує повторних внесень впродовж вегетаційного періоду або використання пролонгованих форм, але це не зменшить ризик вимивання при частих поливах або високій вологості.

Фосфорні добрива, де основне джерело енергії це фосфати, що використовуються для синтезу АТФ, розвитку кореневої системи та репродуктивних органів. При тривалому внесенні можуть акумулюватися у ґрунті у кількості, що перевищує потреби рослин, що є наслідком їхньої низької мобільності у ґрунті [53].

Калійні добрива, в яких основний елемент калій, відповідає за регуляцію водного балансу та тургору клітин. Високі рівні калію можуть конкурувати з поглинанням кальцію та магнію.

Комплексні добрива (NPK, NP, NK, PK) мають коефіцієнт, відсоток за масою азоту (N), фосфору (P_2O_5) та калію (K_2O), який вказує на співвідношення елементів у складі добрива. Воно може бути як рівномірне (20-20-20), так і з переважанням одного з компонентів (10-10-30, з переважанням калію). Також можуть бути і бінарні добрива, які складаються з двох елементів. Зазвичай до складу комплексних добрив додають ще мікроелементи (Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo).

Традиційні добрива можуть бути виготовлені у гранульованій та рідкій формі: гранули застосовують внесенням безпосередньо у ґрунт і вони можуть бути швидкорозчинними (при контакті з вологою ґрунту або при поливі) або з контрольованим вивільненням (напр. коатовані гранули, які мають полімерну оболонку); рідкі готові розчини застосовуються через системи фертигації та фоліарного підживлення, через що мають високе поглинання рослинами.

З усіх переваг використання традиційних мінеральних добрив найважливішою для сільського господарства є швидкість вивільнення поживних речовин, адже добрива такого типу мають концентрований вміст елементів в своєму складі і високу розчинність в порівнянні з іншими типами добрив. Також вони є простими для використання в польових умовах, легко розрахувати та внести необхідне дозування, адже кількість і співвідношення компонентів стандартизоване. При гострому дефіциті поживних речовин, вони єдиний швидкий спосіб відновити їхній рівень [7].

Лише в Україні за даними Держстату у 2024 році було внесено під урожай сільськогосподарських культур 1741,6 тис. т мінеральних добрив (у діючій речовині), з яких азотних добрив було внесено 1223,9 тис. т, фосфорних – 271,6 тис. т та калійних – 246,1 тис. т. З цього обсягу під зернові культури було внесено 770,5 тис. т мінеральних добрив (N - 583,7 тис. т, P - 103,8 тис. т, K - 83,0 тис. т), з яких половину було внесено під пшеницю – 376,0 тис. т (N – 291,4 тис. т, P – 51,5 тис. т, K – 33,1 тис. т). Найбільший обсяг внесення (у діючій речовині) був в азотних добрив, а саме аміачної селітри (FRN2002) - 223004,4 т та карбамідно-аміачної суміші (КАС, FRN2004) - 219314,4 т.

Для порівняння, у 2023 році під сільськогосподарські культури було внесено 1734,3 тис. т (N - 1231,9 тис. т, P - 268,4 тис. т, K - 234,0 тис. т) мінеральних добрив, з яких під зернові культури 803,4 тис. т (N - 602,8 тис. т, P - 108,0 тис. т, K - 92,6 тис. т) і майже третина з яких лише була внесена під пшеницю - 325,5 тис. т (N - 257,2 тис. т, P - 38,8 тис. т, K - 29,5 тис. т). З обсягу азотних добрив аналогічно найбільшу кількість було внесено аміачної селітри (FRN2002) - 205682,2 т та КАС (FRN2004) - 197345,6 т.

Така динаміка зростання використання мінеральних добрив для внесення під пшеницю (+15,51 %) при зменшенні загального обсягу внесення під зернові культури (-4,1 %) і посівної площі через війну вказує на прагнення фермерів зберегти той об'єм врожаю який був до військової агресії. Також це може вказувати

на концентруванні ресурсів агровиробників на найбільш експортній культурі, адже у 2024 році Україна експортувала 53,9 млн т зерна на \$9,4 млрд що на 20 % більше ніж у 2023 році і з цього експортний внесок пшениці склав 20,7 млн т (\$3,7 млрд) [1]. Навіть в умовах війни Україна зберігає перевагу - низьку собівартість виробництва завдяки родючості чорноземів. Збільшення внесень добрив дозволяє максимізувати природний потенціал і забезпечити високу врожайність.

1.3.1. Нанодобрива

Нанодобрива - це поживні речовини, інкапсульовані або покриті наноматеріалами, які забезпечують контрольоване вивільнення і поступову дифузію в ґрунт [40]. Їхня унікальність полягає у нанорозмірній структурі, великій питомій поверхні і підвищеній реактивності, що робить їх значно ефективнішими за традиційні добрива. Дослідження демонструють, що нанодобрива можуть підвищити ефективність використання і доставки поживних речовин на 20-30 % в порівнянні з традиційними мінеральними добривами [3, 36]. Зокрема зменшуються втрати і вимивання азотних добрив у ґрунт на 40-60 % [41] і мають пролонговану дію, 40-50 днів порівняно з 4-10 днями у звичайних добрив [60]. Їхнє застосування має низку переваг, які забезпечують максимальне засвоєння рослинами поживних речовин через цільову доставку до кореневої системи, активуючи транспортні білки, і захисту від вимивання через інкапсуляцію [63]. Також використання нанодобрив у сільському господарстві має позитивний екологічний і економічний ефекти: запобігання евтрофікації через зменшення кількості летких незасвоєних мінералів які потрапляють у водні екосистеми; зменшення викидів парникових газів через контрольоване вивільнення азоту і таким чином запобігання емісії оксиду (I) нітрогену (N_2O) [11]; підвищення врожайності сільськогосподарських культур від 10 до 60 % [63]; зменшення обсягів внесених добрив через потребу нанодобрив у меншій кількості в порівнянні з традиційними завдяки вищій ефективності і пролонгованій дії [64]. Такий інтегрований підхід забезпечить максимальну продуктивність з мінімізацією хімічного навантаження на ґрунти, проте наразі

немає чіткої регуляції використання нанодобрих через необхідність довгострокового вивчення впливу на агроєкосистеми.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

2.1. Реактиви та обладнання

Фулерен C_{60} та графен оксид GO було синтезовано, охарактеризовано їх стабільність та структуру, приготовлено водний колоїдний розчин у хімічній лабораторії Інституту Біотехнологій Технічного Університету м. Ільменау (ФРН) та надано для досліджень проф. Уве Ріттером [54].

У дослідженні було використано колоїдні стабільні розчини фулерену C_{60} та графен оксиду GO у чотирьох різних концентраціях: 0,5 мкг/мл, 1,0 мкг/мл, 1,5 мкг/мл, 2,0 мкг/мл.

Для передпосівної обробки і стерилізації були використані: розчин борної кислоти з концентрацією 0,06 г/л; 3% розчин перексиду водню.

Для біохімічних аналізів на визначення ферментативної активності, вмісту фотосинтетичних пігментів, малонового диальдегіду були використані: 0,03 % розчин H_2O_2 ; 4 % розчин молібдату амонію; дистильована вода; 1М фосфатно-сольовий буфер; 96 % етиловий спирт; дрібка $CaCO_3$, 0,1 % трихлороцтова кислота, 20 % трихлороцтова кислота, 0,5 % тіобарбітурова кислота.

Було відібрано сертифіковане насіння озимої пшениці двох сортів Актер та Патрас від офіційного дистриб'ютора DSV (ФРН) в Україні. Загальна кількість проб – 36.

Для досліджень були використані центрифуга ОПН-3.02, спектрофотометр Shimadzu UV Visible Spectrophotometer UVmini-1240, ваги аналітичні ТВЕ 015-0.001-а, рН-метр ADWA AD1030, водяна баня БН-06.2.

2.2. Передпосівна обробка насіння

Передпосівна обробка насіння включала наступні етапи: 1) стерилізація 3% H_2O_2 упродовж 7 хв, після промивання дистильованою водою тричі; 2) замочування у розчині H_3BO_3 (конц. 0,6 г/л) упродовж 20 хв.

Далі насіння замочували у: 1) колоїдних водних розчинах фулерену C_{60} у відповідних концентраціях: 0,5 мкг/мл, 1,0 мкг/мл, 1,5 мкг/мл, 2,0 мкг/мл; 2)

колоїдних водних розчинах графен оксиду GO у відповідних концентраціях: 0,5 мкг/мл, 1,0 мкг/мл, 1,5 мкг/мл, 2,0 мкг/мл; 3) комбінованій дії вуглецевих наночастинок і мінерального добрива (аміачна селітра, FRN2002) (Табл. 2.1) і пророщували протягом 3 діб (72 годин) перед посадкою у ґрунт насіння у чашках Петрі зі змоченим фільтрувальним папером у темному місці при температурі +17 °С.

Проба	C ₆₀ , мкг/мл	GO, мкг/мл	Мінеральне добриво
К	-	-	-
1	0,5	0,5	-
2	1,0	1,0	-
3	1,5	1,5	-
4	2,0	2,0	-
5	0,5	0,5	+
6	1,0	1,0	+
7	1,5	1,5	+
8	2,0	2,0	+

Таблиця 2.1.

Схема замочування насіння перед висадкою у ґрунт

Після проростання насіння висаджували у зволожений ґрунт і вирощували при температурі 16 °С та 15-годинному фотоперіоді.

2.3. Оцінка морфометричних показників

На 14 добу після пророщування для визначення морфометричних показників [44] (довжина пагонів, довжина коренів, загальна довжина та сира маса) було відібрано по 10 проростків пшениці озимої сортів Актер та Патрас для забезпечення мінімальної вибірки (Рис. 2.1-2.20).

Проростки обережно витягали з ґрунту, уникаючи механічного пошкодження корінців, та видаляли з них залишки субстрату. Для визначення довжини пагонів проростки озимої пшениці розміщували на плоскій поверхні та вимірювали за допомогою стандартної лінійки від кореневої шийки (основи пагона) до апікальної меристеми (верхівки першого листка). Оскільки у досліджуваного сорту пшениці (*Triticum aestivum* L.) з зародка насінини сформувалось три рівномірно розвинуті семінальні (зародкові) корені, що утворюють первинну кореневу систему, для визначення довжини було обрано найдовший первинний корінь. Його довжину було виміряно за допомогою стандартної лінійки від кореневої шийки до кінчика кореня. Загальну висоту проростків визначали як відстань від кінчика найдовшого первинного кореня і до верхівки першого листка за допомогою стандартної лінійки. Всі вимірювання виконувались з точністю до 0,1 см (1 мм).



Рис.2.1-2.2. Фотознімки зразків контрольних проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас на 14 добу після пророщування



Рис.2.3-2.4. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за концентрацій фулерену C_{60} 0.5 мкг/мл на 14 добу після пророщування



Рис.2.5-2.6. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за концентрацій фулерену C_{60} 1.0 мкг/мл на 14 добу після пророщування



Рис.2.7-2.8. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за концентрацій фулерену C_{60} 1.5 мкг/мл на 14 добу після пророщування



Рис.2.9-2.10. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за концентрацій фулерену C_{60} 2.0 мкг/мл на 14 добу після пророщування



Рис.2.11-2.12. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за комбінованої дії фулерену C_{60} 0.5 мкг/мл та мінерального добрива на 14 добу після пророщування



Рис.2.13-2.14. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за комбінованої дії фулерену C_{60} 1.0 мкг/мл та мінерального добрива на 14 добу після пророщування



Рис.2.15-2.16. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за комбінованої дії фулерену C_{60} 1.5 мкг/мл та мінерального добрива на 14 добу після пророщування



Рис.2.17-2.18. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за комбінованої дії фулерену C_{60} 2.0 мкг/мл та мінерального добрива на 14 добу після пророщування



Рис.2.19-2.20. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за концентрації графен оксиду GO 0.5 мкг/мл на 14 добу після пророщування



Рис.2.21-2.22. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за концентрації графен оксиду GO 0.5 мкг/мл на 14 добу після пророщування



Рис.2.23-2.24. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за концентрації графен оксиду GO 1.5 мкг/мл на 14 добу після пророщування



Рис.2.25-2.26. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за концентрації графен оксиду GO 2.0 мкг/мл на 14 добу після пророщування



Рис.2.27-2.28. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за комбінованої дії графен оксиду GO 0.5 мкг/мл та мінерального добрива на 14 добу після пророщування



Рис.2.29-2.30. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за комбінованої дії графен оксиду GO 1.0 мкг/мл та мінерального добрива на 14 добу після пророщування



Рис.2.31-2.32. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за комбінованої дії графен оксиду GO 1.5 мкг/мл та мінерального добрива на 14 добу після пророщування



Рис.2.33-2.34. Фотознімки зразків проб пшениці озимої сортів Актер та Патрас за комбінованої дії графен оксиду GO 2.0 мкг/мл та мінерального добрива на 14 добу після пророщування

Після вимірювання лінійних параметрів, визначали сиру масу проростків озимої пшениці за допомогою аналітичних ваг з точністю вимірювань $\pm 0,001$ г. Кожен проросток індивідуально зважували, розміщуючи його на платформі ваг і для забезпечення точності вимірювань, після кожного зважування ваги очищали.

2.4. Визначення ферментативної активності

Для визначення ферментативної активності зразків використовували спектрофотометричний метод Королюка, зокрема, на 14 добу був проведений біохімічний аналіз на визначення активності каталази у досліджуваних пробах [50]. Відбір та підготовку рослинного матеріалу здійснювали за загальноприйнятими методиками. На відміну від пероксидаз, які потребують різноманітних субстратів (поліфенольні сполуки, аскорбат) для відновлення H_2O_2 до води, каталази як субстрат використовують дві молекули H_2O_2 і каталізують їх перетворення на воду і молекулу кисню [61].

Для визначення активності каталази спочатку приготували клітинний екстракт. Для цього 100 мг замороженого рослинного матеріалу гомогенізували у фарфоровій ступці додаючи 2 мл 1М фосфатно-сольового буферу PBS (рН 7,8). Отриману суміш переносили в епандорф та центрифугували протягом 10 хв при швидкості обертання 3000 об/хв. З отриманої надосадової рідини відібрали аліквоту об'ємом 50 мкл та вносили в дослідні проби, за винятком контрольних проб. Подальшу інкубацію вмісту дослідних пробірок проводили на водяній бані при температурі 37 °С впродовж 10 хв. Реакцію припинили внесенням 1 мл розчину молібдату амонію.

Спектрофотометричне вимірювання оптичної щільності проводили при довжині хвилі 374 нм [5] для трьох типів проб: холостих (фосфатний буфер, дистильована вода, молібдат амонію), контрольних (супернатант, фосфатний буфер, пероксид водню, молібдат амонію, без нагріву) та дослідних (супернатант, фосфатний буфер, пероксид водню, молібдат амонію, інкубовані).

Після вираховували активність каталази (ΔE) за формулою:

$$\Delta E \text{ (мкат/г)} = \frac{2,303 \times 16,67}{t} \times \log_{10}\left(\frac{A_k}{A_{\text{досл}}}\right) \times \frac{V_{\text{заг}}}{V_{\text{ек}}} \times \frac{1}{m}, \quad (2.1)$$

де 2,303 - коефіцієнт переведення натурального логарифму в десятковий; 1кU/г = 16,67 мкат/г; t – час інкубації, хв; $A_{\text{досл}}$ – абсорбція дослідної проби, O.D.; A_k – абсорбція контрольної проби, O.D.; $V_{\text{заг}}$ - загальний об'єм реакційної суміші, мл; $V_{\text{ек}}$ - об'єм екстракту (супернатанту), мл; m - маса рослинного матеріалу, г.

Розкладання пероксиду водню каталазою підкоряється кінетиці першого порядку, яка розраховується через натуральний логарифм, але оскільки зручніше використовувати десятковий, вводиться коефіцієнт 2,303. Кожен експеримент виконували у двох аналітичних повторностях.

2.5. Визначення вмісту фотосинтетичних пігментів у *Triticum aestivum* спектрофотометричним методом

Визначення вмісту пігментів у досліджуваних зразках проводили спектрофотометричним методом [6, 67]. Відбір та підготовку рослинного матеріалу здійснювали згідно стандартним методикам. Наважку рослиного матеріалу масою 100 мг розтирали у фарфоровій ступці з додаванням невеликої кількості кальцій карбонату (CaCO_3) для запобігання деградації пігментів. Далі до гомогенату додавали 2 мл 96 % етанолу ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) і проводили фільтрацію через складений фільтрувальний папір. Осад на фільтрі промивали декілька разів невеликою кількістю етанолу до повного знебарвлення зразків. Загальний об'єм проб доводимо до 10 мл 96 % етанолом. Екстракцію проводили у затемненому лабораторному приміщенні, отримані зразки аналізували негайно. І Спектрофотометричне вимірювання оптичної щільності виконували для дослідних проб (знебарвлений екстракт і етанол) і холостої (96 % етанол) при довжині хвилі 665 нм – для хлорофілу *a*, 649 нм – для хлорофілу *b* та 441 нм - для каротиноїдів.

Вміст хлорофілу *a* ($c_{\text{хл } a}$) визначали за формулою:

$$C_{\text{хл } a} = 13,95 \times \lambda_{\text{сер.зн } 665} - 5,76 \times \lambda_{\text{сер.зн } 649} \quad (2.2)$$

Вміст хлорофілу *b* ($c_{\text{хл } b}$) визначали за формулою:

$$C_{\text{хл } b} = 25,8 \times \lambda_{\text{сер.зн } 649} - 7,6 \times \lambda_{\text{сер.зн } 665} \quad (2.3)$$

Вміст каротиноїдів ($c_{\text{кар}}$) визначали за формулою:

$$C_{\text{кар}} = 4,695 \times \lambda_{\text{сер.зн } 441} - 0,268 \times (C_{\text{хл } a} + C_{\text{хл } b}) \quad (2.4)$$

Також визначали показники загального хлорофілу, співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* та співвідношення загального хлорофілу до каротиноїдів (Табл. 3.5-3.6). Кожен експеримент виконували у трьох аналітичних повторностях.

2.6. Визначення вмісту малонового діальдегіду у *Triticum aestivum* спектрофотометричним методом

Для визначення вмісту малонового діальдегіду (МДА) використовували стандартний метод TBARS (thiobarbituric acid reactive substances), що є загальноприйнятим для оцінки рівня перекисного окиснення ліпідів. Відбір та підготовку рослинного матеріалу проводили з дотриманням стандартних процедур підготовки зразків. Наважку рослинного матеріалу 200 мг гомогенізували у фарфоровій ступці з додаванням 2 мл 0,1 % (мас./об.) трихлороцтової кислоти (ТХК). Гомогенат переносили у пробірки і центрифугували при 5000 об/хв протягом 15 хв. Відбирали супернатант і додавали свіжоприготовлений реагент (20% ТХК + 0,5 % ТБК). Суміш ретельно перемішували і нагрівали на водяній бані при температурі 95 °С протягом 30 хв. Після інкубації дослідні зразки швидко охолоджували у водяній бані з льодом для припинення реакції. Охолоджені до кімнатної температури зразки повторно центрифугували при 5000 об/хв впродовж 10 хв для видалення осаду. Спектрофотометричне вимірювання оптичної щільності виконували для проб при довжинах хвиль 532 нм (дослідні) і 600 нм (холоста, 0,5 мл 0,1 % ТХК, 2 мл 20% ТХК + 0,5 % ТБК, аналогічно оброблена).

Концентрацію МДА у досліджуваних зразках розраховували за формулою:

$$C_{\text{МДА}} \text{ (нмоль/г)} = \frac{(A_{532} - A_{600}) \times V_{\text{заг}} \times 1000}{155 \times m}, \quad (2.5)$$

де A_{532} – абсорбція при 532 нм, O.D.; A_{600} – абсорбція при 600 нм, O.D.; $V_{\text{заг}}$ – загальний об'єм, мл; 155 - $\epsilon/1000$ для зручності розрахунку, де ϵ - коефіцієнт екстинкції МДА-ТБК комплексу ($155000 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$); m - маса рослинного матеріалу, г.

2.7. Статистична обробка даних

Статистична обробка даних морфометричних показників та побудова графіків проводилась за допомогою програми Origin 2024b. Було пораховано відносну похибку та середнє квадратичне відхилення (Табл. 3.1).

Статистична обробка вмісту хлорофілів a і b , каротиноїдів та співвідношень хлорофілу a до b та загального хлорофілу до каротиноїдів, а також активності каталази проводилась за допомогою програми MS Excel.

Статистична обробка активності каталази та вмісту малонового діальдегіду проводилась за допомогою «ANOVA».

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.

3.1. Вплив фулерену C₆₀, графен оксиду GO та їх комбінованої дії з мінеральним добривом на морфометричні показники *T. aestivum*

На 14 добу після пророщування був проведений морфометричний аналіз проростків пшениці сортів Актер та Патрас, який включав визначення довжини пагонів, коренів, загальної висоти рослини та сирої маси, і обраховано середні значення показників (Табл. 3.1-3.2) та побудовано графіки для сортів пшениці Актер (Рис. 3.1) і Патрас (Рис. 3.2) з параметрами довжини пагонів і коренів, загальної висоти надземної частини, а також сирої маси (Рис. 3.3-3.4) на 14 добу після пророщування.

Таблиця 3.1.

Довжина пагонів, коренів, загальна висота та сира маса паростків *T. aestivum* сорту Актер

Проба	Довж. пагонів, мм	Довж. кореня, мм	Заг. висота, мм	Сира маса, г
Контроль	112,1 ± 2,3	132,1 ± 2,5	244,3 ± 3,0	0,17
C ₆₀ 0,5	125,7 ± 1,9	154,3 ± 2,3	280,0 ± 2,1	0,19
C ₆₀ 1,0	140,7 ± 2,5	169,3 ± 2,2	310,0 ± 2,3	0,19
C ₆₀ 1,5	135,8 ± 1,8	164,3 ± 2,9	300,1 ± 2,1	0,19
C ₆₀ 2,0	131,0 ± 2,1	160,0 ± 1,8	291,0 ± 1,9	0,18
C ₆₀ 0,5 + Д	155,6 ± 2,2	184,4 ± 2,0	340,0 ± 2,0	0,18
C ₆₀ 1,0 + Д	171,0 ± 2,1	200,0 ± 2,6	371,0 ± 2,2	0,20
C ₆₀ 1,5 + Д	165,5 ± 2,0	194,1 ± 2,3	359,6 ± 3,4	0,20
C ₆₀ 2,0 + Д	160,6 ± 2,4	189,4 ± 2,2	350,0 ± 2,5	0,20
GO 0,5	125,0 ± 3,1	142,1 ± 2,6	267,1 ± 2,7	0,19
GO 1,0	142,5 ± 2,9	154,5 ± 2,7	297,0 ± 3,2	0,22
GO 1,5	130,5 ± 2,0	148,6 ± 2,3	279,1 ± 2,8	0,22
GO 2,0	115,5 ± 2,0	139,1 ± 1,9	254,5 ± 2,4	0,21
GO 0,5 + Д	140,5 ± 1,9	159,5 ± 2,1	300,0 ± 2,2	0,19
GO 1,0 + Д	155,7 ± 2,3	179,3 ± 2,1	335,0 ± 2,6	0,20
GO 1,5 + Д	135,0 ± 2,6	163,3 ± 2,4	298,3 ± 2,4	0,20
GO 2,0 + Д	110,5 ± 1,8	144,1 ± 2,0	254,5 ± 2,0	0,19

Таблиця 3.2.

Довжина пагонів, коренів, загальна висота та сира маса паростків *T. aestivum* сорту Патрас

Проба	Довж. пагонів, мм	Довж. кореня, мм	Заг. висота, мм	Сира маса, г
Контроль	131, 2 ± 2,2	164,6 ± 2,5	295,8 ± 2,1	0,19
C ₆₀ 0,5	140,4 ± 1,8	173,8 ± 2,3	314,2 ± 2,2	0,21
C ₆₀ 1,0	150,4 ± 2,1	183,8 ± 1,9	334,2 ± 2,4	0,23
C ₆₀ 1,5	145,4 ± 2,0	178,8 ± 2,3	324,2 ± 2,1	0,22
C ₆₀ 2,0	135,4 ± 1,8	168,8 ± 1,8	304,2 ± 2,3	0,21
C ₆₀ 0,5 + Д	155,7 ± 1,6	189,3 ± 2,0	345,0 ± 2,6	0,20
C ₆₀ 1,0 + Д	165,7 ± 2,2	199,3 ± 2,4	365,0 ± 1,8	0,20
C ₆₀ 1,5 + Д	160,8 ± 2,4	194,2 ± 2,2	355,0 ± 2,4	0,21
C ₆₀ 2,0 + Д	155,3 ± 2,1	188,7 ± 2,0	344,0 ± 2,6	0,22
GO 0,5	133,8 ± 2,5	174,6 ± 2,7	308,5 ± 3,1	0,23
GO 1,0	139,6 ± 1,9	184,6 ± 1,9	324,3 ± 2,2	0,23
GO 1,5	136,2 ± 1,8	177,1 ± 2,1	313,3 ± 3,0	0,23
GO 2,0	120,8 ± 2,0	154,2 ± 2,3	275,0 ± 2,6	0,22
GO 0,5 + Д	150,4 ± 1,8	193,8 ± 1,8	344,2 ± 2,1	0,20
GO 1,0 + Д	160,4 ± 2,3	208,8 ± 2,1	369,2 ± 1,9	0,21
GO 1,5 + Д	145,4 ± 2,1	188,8 ± 2,2	334,2 ± 2,4	0,21
GO 2,0 + Д	125,4 ± 2,3	168,8 ± 2,0	294,2 ± 2,2	0,21

Контрольні зразки проростків пшениці сорту Актер (Рис.3.1) демонструють стабільний розвиток з довжиною пагонів $112,1 \pm 2,3$ мм та довжиною первинних коренів $132,1 \pm 2,5$ мм. При дії фулерену C₆₀ в досліджуваному діапазоні концентрацій (0,5-2,0 мкг/мл) середні довжини пагонів зросли на 17,3-25,5 % порівняно з контролем, сягаючи максимуму $140,7 \pm 2,5$ мм при концентрації C₆₀ 1,0 мкг/мл. Чутливість кореневої системи була вищою у відповідь на дію фулерену C₆₀ і середні значення показників збільшились на 16,8-28,1 %, досягаючи $169,3 \pm 2,2$ мм при тій самій концентрації фулерену C₆₀ (1,0 мкг/мл). При вищій концентрації 2,0

мкг/мл спостерігалось зменшення стимулюючого ефекту (довжина пагонів 131,0 мм, коренів - 160,0 мм).

При обробці проростків графен оксидом GO (0,5 мкг/мл) довжина пагонів становила $125,0 \pm 3,1$ мм (+11,5 % від контролю), а коренів - $142,1 \pm 2,6$ мм (+7,6% від контролю). Максимальний ріст спостерігався при концентрації 1,0 мкг/мл: довжина пагонів досягла $142,5 \pm 2,9$ мм (приріст 27,1 %), довжина коренів $154,5 \pm 2,7$ мм (приріст 17 %). Але при вищих концентраціях (1,5 та 2,0 мкг/мл) відмічалось зниження параметрів, що може вказувати на нижчий діапазон оптимальних концентрацій GO порівняно з фулереном C₆₀ і можливу фітотоксичність при вищих дозах.

Комбінована дія фулерену C₆₀ з мінеральним добривом викликала значний ріст пагонів і коренів, сягаючи максимуму ($171,1 \pm 2,1$ мм і $200,0 \pm 2,6$ мм відповідно), при концентрації фулерену C₆₀ 1,0 мкг/мл, що більше на 52,5 % і 51,6% відповідно в порівнянні з контролем. Таке підвищення показників може свідчити про синергічну взаємодію вуглецевих наночастинок та традиційних добрив, де фулерен C₆₀ активує морфогенез надземної частини, в мінеральні поживні речовини стимулюють розвиток кореневої системи.

Комбінована дія GO з мінеральним добривом також демонструвала синергічний ефект, але з певними відмінностями ніж з фулереном C₆₀. При концентрації 1,0 мкг/мл довжина пагонів становила $155,7 \pm 2,3$ мм (приріст 38,9 % від контролю), а коренів $179,3 \pm 2,1$ мм (+35,6 % від контролю), що нижче за показники аналогічної концентрації з фулереном C₆₀. Невисоке пригнічення росту відбулося за вищій концентрації GO 2,0 мкг/мл, довжина пагонів знизилась до $110,5 \pm 1,8$ мм, коренів $144,1 \pm 2,0$ мм, що потенційно є проявом антагоністичних взаємодій графен оксиду і компонентами мінерального добрива при завищених концентраціях.

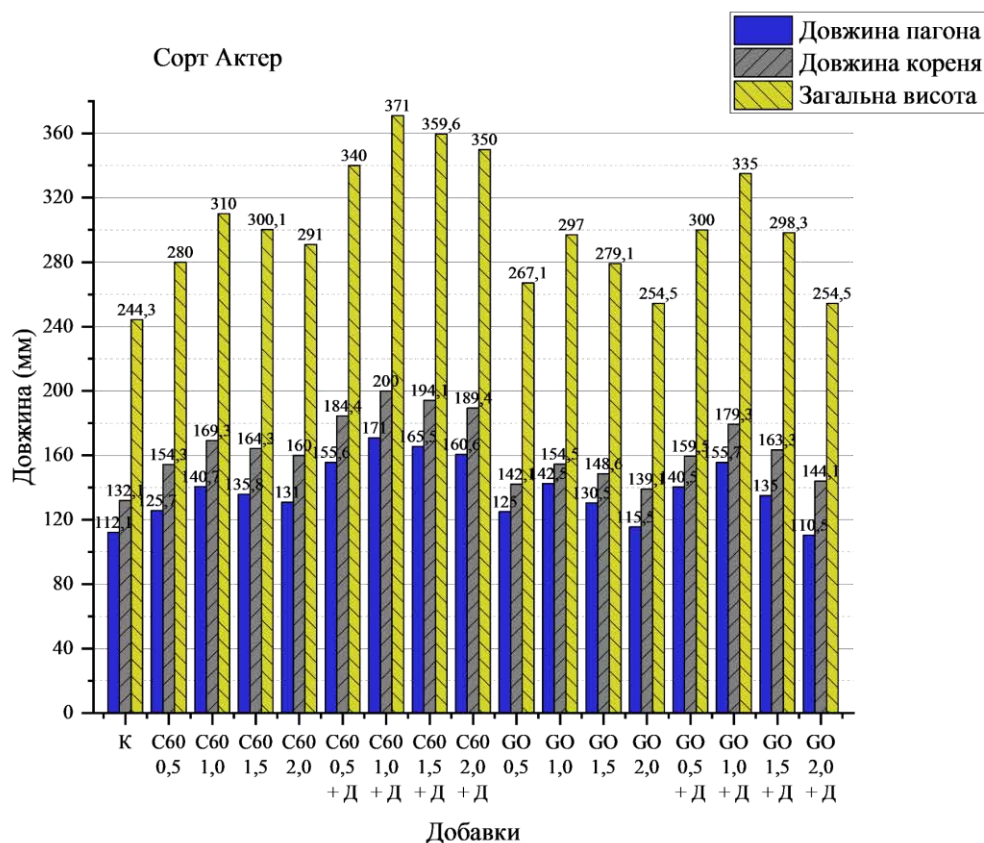


Рис. 3.1. Морфометричні показники (довжина пагонів, коренів і загальна висота) пшениці сорту Актер на 14 добу після пророщення

На відміну від довжинних показників, сира маса проростків пшениці сорту Актер (Рис. 3.3) залишилась практично незмінною (0,17-0,20) у всіх зразках за дії фулерену C_{60} та його комбінації з мінеральним добривом. Найвижчі значення (0,20-0,22) спостерігались за дії графен оксиду GO і його комбінованої дії з добривом у концентраціях 1,0-1,5 мкг/мл.

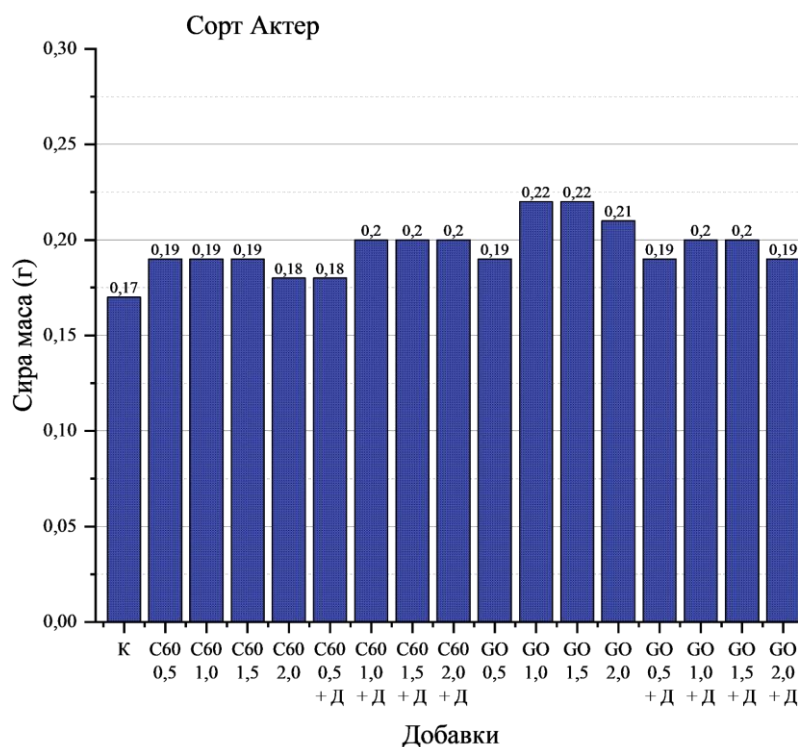


Рис.3.3. Показники сирі маси сорту Актер

Контрольні проростки сорту Патрас характеризувались більшими значеннями морфологічних показників порівняно з сортом Актер, довжина пагонів $131,2 \pm 2,2$ мм, коренів - $164,6 \pm 2,5$ мм та загальна висота $295,8 \pm 2,1$ мм (Рис.3.2). При обробці фулереном C60 (при концентраціях 0,5-1,5 мкг/мл) довжина пагонів збільшилася на 7,0-14,6 % в порівнянні з контролем, досягаючи максимального значення $150,4 \pm 2,1$ мм при концентрації 1,0 мкг/мл. Довжина коренів за цієї ж концентрації досягла $183,8 \pm 1,8$ мм, загалом (при концентраціях 0,5-1,5 мкг/мл) зростаючи на 5,6-11,7 % від контролю. За впливу фулерену C₆₀ у концентрації 2,0 мкг/мл спостерігалось значення показників майже на рівні контролю (довжина пагонів $135,4 \pm 1,9$ мм, довжина коренів $168,8 \pm 1,8$ мм), що може вказувати на його концентраційну залежність.

Дія графен оксиду GO за концентрацій 0,5-1,5 мкг/мл мала позитивний вплив (+1,9-6,4 % до контрольних значень). Максимальні значення довжини пагонів

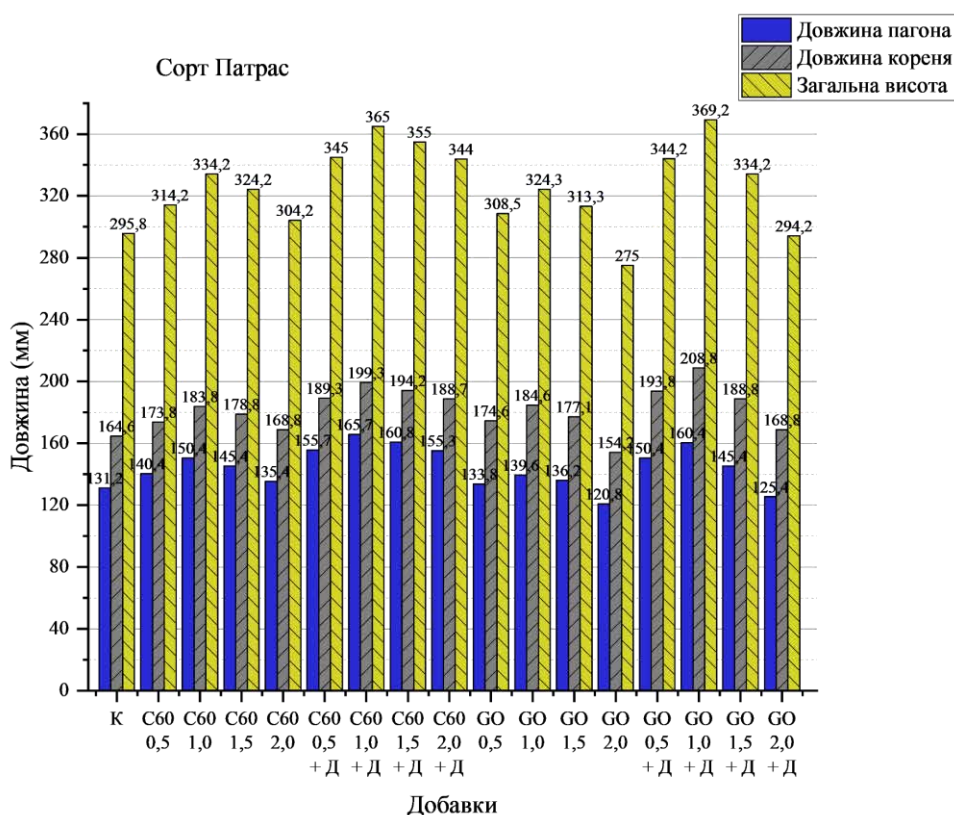
($139,6 \pm 1,9$ мм) і коренів ($184,6 \pm 1,9$ мм) досягалися при концентрації GO 1,0 мкг/мл. Проте за концентрації графен оксиду GO 2,0 мкг/мл спостерігалось пригнічення коренеутворення ($154,2 \pm 2,3$ мм, що на 6,3 % нижче контрольних значень) та росту надземної частини ($120,8 \pm 2,0$ мм, що на 7,9 % нижче контролю). Це може свідчити про фітотоксичність при надлишкових концентраціях.

Синергічний ефект комбінації фулерену C₆₀ і добрива спостерігався в усьому діапазоні дослідних концентрацій (0,5-2,0 мкг/мл). Як і при дії суто фулерену C₆₀ за концентрації 1,0 мкг/мл, так і за комбінованої дії з наночастинками з такою ж концентрацією у дослідних зразків довжина пагонів досягла $165,7 \pm 2,2$ мм (+26,3% від контролю), а коренів - $199,3 \pm 2,4$ мм (приріст 21,1 %). Навіть при вищій концентрації (2,0 мкг/мл) спостерігався, на відміну від проб за дії суто фулерену C₆₀, позитивний ефект впливу ($155,3 \pm 2,1$ мм для пагонів і $188,7 \pm 2,0$ мм для коренів), що може вказувати на захисну дію мінерального добрива проти субтоксичних ефектів наночастинок, яка може бути пояснена конкуренцією у взаємодії катіонів добрива з функціональними групами графен оксиду GO за сайти зв'язування на поверхні коренів. Карбоксильні (-COOH) та гідроксильні (-OH) групи графен оксиду здатні утворювати координаційні зв'язки з іонами металів, що може призвести до блокування транспртерів поживних речовин та індукції стресових відповідей [56].

Комібнована дія графен оксиду GO та мінерального добрива в усьому діапазоні досліджуваних концентрацій також показала синергічний ефект і найвищу ефективність серед усіх досліджуваних варіацій для стимулювання ризогенезу. При оптимальній концентрації 1,0 мкг/мл довжина пагонів становила $160,4 \pm 2,3$ мм (приріст 22,2 %), а коренів - $208,8 \pm 2,1$ мм (+26,9 % від контрольної проби), що перевищує ефект впливу комбінованої дії фулерену C₆₀ з добривом для продуктивності кореневої системи. Враховуючи, що умови вирощування були однаковими для всіх досліджуваних зразків, такий ефект може свідчити про

сортоспецифічність для різних типів вуглецевих наночастинок. Хоча і при концентрації 2,0 мкг/мл значення показників були нижчими ($125,4 \pm 2,3$ мм для пагонів, $168,8 \pm 2,0$ мм для коренів) в порівнянні з іншими концентраціями комбінованої дії (0,5-1,5 мкг/мл), вони були вищими за параметри контрольної проби.

Рис. 3.2. Морфометричні показники (довжина пагонів, коренів і загальна висота)



пшениці сорту Патрас на 14 добу після пророщення

На відміну від сорту Актер, в сорту Патрас спостерігалась концентраційна залежність сирої маси (Рис.3.4). При дії фулерену C_{60} (0,5-1,0 мкг/мл) сира маса збільшилась на 10,5-21,1 % досягаючи максимального значення 0,23 г при концентрації 1,0 мкг/мл в порівнянні 0,19 г контролю. За дії GO сорт Патрас демонструє приріст біомаси до 0,23 г при концентраціях 0,5-1,5 мкг/мл.

Комбінована обробка забезпечила стабільне накопичення маси (0,2-0,22 г) в більшості зразків.

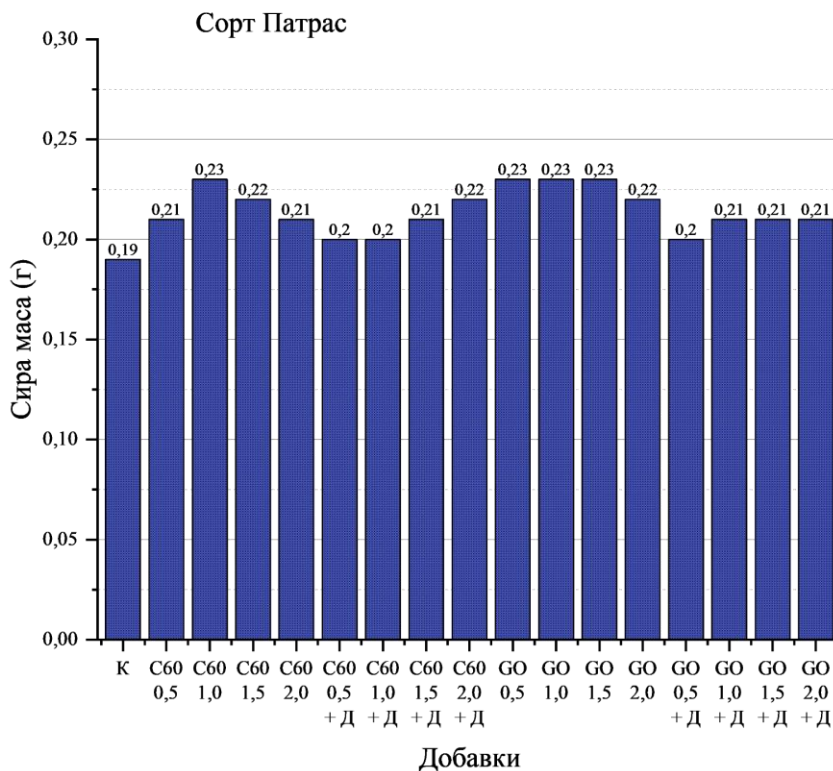


Рис 3.4. Показники сирі маси сорту Патрас

Якщо порівнювати обидва сорти і їх відповідь на дію наночастинок, то чітко можна побачити різні реакції сортів. Сорт Актер можна характеризувати більш пластичним, він мав кращу відповідь на комбіновану дію фулерену C_{60} і добрива (+52,5 % для пагонів), тоді як сорт Патрас демонструє більшу базову продуктивність (вищі значення параметрів контрольної проби) і збалансовану реакцію на обидва типи вуглецевих наночастинок.

Відмінність дії двох типів вуглецевих наночастинок полягає у тому, що фулерен C_{60} проявив більшу послідовність у стимуляції росту з ширшим діапазоном оптимальних концентрацій (за яких спостерігався позитивний ефект) 0,5-1,5 мкг/мл та меншою потенційною фітотоксичністю при концентрації 2,0 мкг/мл. Графен оксид GO продемонстрував вузький діапазон (переважно тільки за концентрації 1,0

мкг/мл) та викликавши виразніші ознаки фітотоксичності при концентрації 2,0 мкг/мл у сорту Актер. Це може бути пов'язано з більшою реакційною здатністю графен оксиду через наявність кисневмісних функціональних груп, які можуть індукувати оксидативний стрес. Синергічна взаємодія вуглецевих наночастинок і мінерального добрива спостерігалась в обох типах наночастинок і сортах пшениці за концентрацій 0,5-1,5 мкг/мл. Поживні речовини (азот у формі NH_4NO_3) забезпечує синтез ауксинів і цитокинінів, які регулюють поділ і розтягування клітин, наночастинок в свою чергу завдяки нанорозмірності можуть моделювати експресію генів транспортерів поживних речовин та гормональних рецепторів. Концентрація 1,0 мкг/мл для обох типів досліджуваних вуглецевих наночастинок забезпечує ефективну транслокацію наночастинок через кореневу систему без індукції захисних механізмів.

Подібні результати були отримані і в інших культурах. У кукурудзи при обробці GO 50 мг/л спостерігалась активація транскрипційних факторів та метаболізму азоту і калію. У томатів низькі концентрації GO (20 мг/л) стимулювали ріст коренів через IAA-залежний шлях, тоді як високі концентрації викликали стресові відповіді, подібні сольовому стресу. У *Arabidopsis thaliana* комбінація GO з селеном та нано-залізом в умовах засолення покращувала антиоксидантну активність та поглинання мінеральних речовин, що підтверджує синергічну взаємодію наночастинок та мінеральних добрив через модуляцію іонного балансу [34].

Високі концентрації GO можуть стимулювати рослину генерувати активні форми кисню (АФК) через взаємодію з мітохондріальними мембранами та порушення електрон-транспортного ланцюга. Макроелементи-компоненти мінеральних добрив (особливо Mg^{2+} та Ca^{2+}) беруть участь у функціонуванні антиоксидантних ензимів (SOD, CAT, POD) та можуть посилювати антиоксидантний захист рослин. Це пояснює, чому при комбінованій дії GO з

мінеральним добривом при концентрації 1,5 мкг/мл морфометричні показники залишаються доволі високими, тоді як при дії самого графен оксиду GO спостерігалось пригнічення росту [46, 52].

3.2. Активність каталази у *T. aestivum* після дії фулерену C₆₀, графен оксиду GO та їх комбінованої дії з мінеральним добривом

Каталаза – це фермент, який розщеплює перекис водню на воду і кисень, знижуючи його токсичну дію в клітинах [50].

Результати обрахунків представлено як зміну активності каталази (ΔE) від базової активності контрольних зразків для сорту Актер (Табл. 3.3) та сорту Патрас (Табл. 3.4) можна визначити стимуляцію або пригнічення ферментативної активності і як наслідок адаптацію клітин пшениці до оксидативного стресу.

Таблиця 3.3.

Результати обрахунку активності каталази (ΔE) у зразках пшениці сорту Актер

№	Дослідна проба	ΔE , мкат/мл
1	Контроль	0
2	C_{60} 0,5 мкг/мл	23,54
3	C_{60} 1,0 мкг/мл	35,52
4	C_{60} 1,5 мкг/мл	16,42
5	C_{60} 2,0 мкг/мл	8,76
6	C_{60} 0,5 мкг/мл + Д	78,62
7	C_{60} 1,0 мкг/мл + Д	104,11
8	C_{60} 1,5 мкг/мл + Д	66,12
9	C_{60} 2,0 мкг/мл + Д	47,65
10	GO 0,5 мкг/мл	7,00
11	GO 1,0 мкг/мл	28,31
12	GO 1,5 мкг/мл	22,35
13	GO 2,0 мкг/мл	14,65
14	GO 0,5 мкг/мл + Д	34,32

15	GO 1,0 мкг/мл + Д	53,76
16	GO 1,5 мкг/мл + Д	41,56
17	GO 2,0 мкг/мл + Д	27,12

У контрольних проростках сорту Актер базовий рівень активності каталази прийнято за нульову точку відліку, відносно якої розраховували зміни активності за дії наночастинок. За дії фулерену C_{60} у концентрації 0,5 мкг/мл спостерігалось підвищення активності каталази на 23,54 мкат/г, що свідчить про стимуляцію антиоксидантних систем рослини. Максимальну активацію ферменту виявлено при концентрації C_{60} 1,0 мкг/мл, коли зміна активності становила 35,52 мкат/г, що вище на 21 % порівняно з контролем. При подальшому збільшенні концентрації фулерену C_{60} до 1,5 та 2,0 мкг/мл ефективність знижувалась до 16,42 та 8,76 мкат/г відповідно.

Застосування комплексу фулерену C_{60} з мінеральним добривом проявило синергічний ефект на активність каталази. У сорту Актер за дії фулерену C_{60} 0,5 мкг/мл з добривом зміна активності становила 78,62 мкат/г, що у 3,3 раза перевищує ефект впливу суто фулерену. Максимальне підвищення активності каталази зафіксовано при концентрації C_{60} 1,0 мкг/мл - 104,11 мкат/г, що в 2,9 раза вище порівняно з пробою без додавання добрива. Посилення ефекту C_{60} за присутності мінерального добрива пояснюється підвищенням доступності поживних елементів, особливо магнію та калію, які є кофакторами антиоксидантних ферментів і стабілізують їхню просторову структуру. При концентраціях C_{60} 1,5 та 2,0 мкг/мл активність знижувалась до 66,12 та 47,65 мкат/г відповідно, проте залишалась вищою ніж за дії лише фулерену.

Графен оксид GO також стимулював активність каталази, хоча ефект був менш вираженим порівняно з C_{60} . У сорту Актер за дії GO у концентрації 0,5 мкг/мл зміна активності становила 7,00 мкат/г, що у 3,4 раза нижче ніж для проби з окремо

C_{60} при аналогічній концентрації. Оптимальна концентрація GO для активації каталази становила 1,0 мкг/мл з підвищенням активності на 28,31 мкат/г, але це на 20% нижче порівняно з C_{60} у концентрації 1,0 мкг/мл. При концентраціях GO 1,5 та 2,0 мкг/мл активність знижувалась до 22,35 та 14,65 мкат/г відповідно, демонструючи типову концентраційно-залежну відповідь з максимумом при проміжних концентраціях.

Комбінація графен оксиду GO з мінеральним добривом посилювала стимулюючий ефект вуглецевих наночастинок, за дії GO у концентрації 0,5 мкг/мл з добривом активність підвищувалась на 34,32 мкат/г, а при 1,0 мкг/мл - на 53,76 мкат/г. При підвищених концентраціях графен оксиду GO 1,5 та 2,0 мкг/мл зміна активності становила 41,56 та 27,12 мкат/г відповідно, що підтверджує адаптивний характер відповіді рослини на помірний стрес, викликаний графен оксидом.

Таблиця 3.4.

Результати обрахунку активності каталази (ΔE) у зразках пшениці сорту Патрас

№	Дослідна проба	ΔE , мкат/мл
1	Контроль	0
2	C_{60} 0,5 мкг/мл	17,63
3	C_{60} 1,0 мкг/мл	286,34
4	C_{60} 1,5 мкг/мл	160,78
5	C_{60} 2,0 мкг/мл	86,65
6	C_{60} 0,5 мкг/мл + Д	125,5
7	C_{60} 1,0 мкг/мл + Д	197,36
8	C_{60} 1,5 мкг/мл + Д	145,51
9	C_{60} 2,0 мкг/мл + Д	101,04
10	GO 0,5 мкг/мл	49,25

11	GO 1,0 мкг/мл	77,17
12	GO 1,5 мкг/мл	63,11
13	GO 2,0 мкг/мл	40,11
14	GO 0,5 мкг/мл + Д	96,22
15	GO 1,0 мкг/мл + Д	140,47
16	GO 1,5 мкг/мл + Д	110,75
17	GO 2,0 мкг/мл + Д	81,89

У сорту Патрас базовий рівень активності каталази також прийнято за нульову точку відліку. Характерною особливістю цього сорту була значно вища чутливість до дії фулерену C_{60} порівняно з сортом Актер. За впливу C_{60} у концентрації 0,5 мкг/мл зміна активності становила 17,63 мкат/г, що майже не відрізняється від сорту Актер. Проте при концентрації C_{60} 1,0 мкг/мл спостерігалось підвищення активності каталази на 286,34 мкат/г, що у 8,1 раза перевищує відповідь сорту Актер і свідчить про виражену сортову специфічність регуляції антиоксидантних систем. При концентраціях C_{60} 1,5 та 2,0 мкг/мл активність знижувалась до 160,78 та 86,65 мкат/г відповідно, проте залишалась суттєво вищою порівняно з сортом Актер.

За комбінованої дії C_{60} з мінеральним добривом у сорту Патрас зміна активності каталази становила 125,50 мкат/г при 0,5 мкг/мл та досягала 197,36 мкат/г при 1,0 мкг/мл. У сорту Патрас ефект від комбінації фулерену C_{60} з добривом був менш вираженим порівняно з Актером, що може свідчити про наближення до верхньої межі ферментативної активності або інші механізми регуляції. При концентраціях 1,5 та 2,0 мкг/мл зміна активності становила 145,51 та 101,04 мкат/г відповідно, демонструючи стабільно високий рівень ферментативної відповіді.

Графен оксид GO стимулював активність каталази у сорту Патрас ефективніше ніж у сорту Актер. За дії графен оксиду GO у концентрації 0,5 мкг/мл зміна активності становила 49,25 мкат/г, що у 7 разів вище порівняно з Актером.

При концентрації GO 1,0 мкг/мл активність підвищувалась на 77,17 мкат/г, що майже втричі перевищує відповідь Актера. При підвищених концентраціях GO 1,5 та 2,0 мкг/мл активність знижувалась до 63,11 та 40,11 мкат/г відповідно, проте залишалась на рівні, достатньому для ефективної детоксикації пероксиду водню.

Комбінація графен оксиду GO з мінеральним добривом забезпечила найвищу зміну активації каталази при концентрації 1,0 мкг/мл - 140,47 мкат/г. При концентраціях графен оксиду GO 0,5, 1,5 та 2,0 мкг/мл з добривом зміна активності становила 96,22, 110,75 та 81,89 мкат/г відповідно, підтверджуючи синергічний характер взаємодії між наночастинками та компонентами добрива.

Механізм активації каталази під впливом C_{60} пов'язаний з декількома факторами. Фулерени можуть безпосередньо нейтралізувати надлишок H_2O_2 , знижуючи субстратне навантаження на каталазу і також стабілізувати четвертинну структуру каталази, захищаючи її від окисного пошкодження. У графен оксиду механізм є іншим, через наявність кисневмісних функціональних груп на поверхні GO може індукувати помірний окисний стрес, який активує адаптивні механізми захисту, включаючи підвищення активності каталази за принципом гормезису.

Оптимальна концентрація для обох типів наночастинок становить 1,0 мкг/мл, що узгоджується з результатами аналізу морфометричних параметрів. Комбінація наночастинок з мінеральним добривом (аміачна селітра, FRN2002) забезпечує синергічний ефект, особливо виражений для фулерену C_{60} у сорту Актер.

3.3. Вплив фулерену C_{60} , графен оксиду GO та їх комбінованої дії з мінеральним добривом на вміст пігментів у листі *T. aestivum*

Хлорофіл *a* і хлорофіл *b* – два основних типу хлорофілу та основні фотосинтетичні пігменти, що мають дещо різні абсорбційні спектри. Коли фотосинтетична активність стає надмірною, в процесі передачі електронів у фотосистемах I та II можуть утворюватися активні форми кисню, особливо за умов інтенсивного освітлення. Каротиноїди поглинають надлишок світлової енергії і нейтралізують вільні радикали, захищаючи таким чином клітини рослин від

оксидативного стресу. Показник загального хлорофілу вказує на загальну фотосинтетичну активність, відображаючи суму концентрацій хлорофілу *a* та *b*, які беруть участь у поглинанні світлової енергії. Показник співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* або хлорофіловий індекс може бути використаним для оцінки фізіологічного стану рослини, фотосинтетичної активності та ефективності використання світла. Показник співвідношення загального хлорофілу до каротиноїдів демонструє наскільки оптимальними є умови зростання.

За результатами спектрометричного вимірювання для пшениці сорту Актер (Табл. 3.5) у контрольній пробі базові рівні хлорофілу *a* на рівні 3,905 мг/г, хлорофілу *b* - 2,815 мг/г, сумарним вмістом хлорофілу - 6,721 мг/г та каротиноїдів 0,666 мг/г. Під впливом фулерену C_{60} (у концентраціях 0,5-2,0 мкг/мл) спричинив зниження вмісту хлорофілу *a* до 2,837-3,091 мг/г, що менше за показники контролю на 20-27 %. Подібний вплив був і для хлорофілу *b* та загального хлорофілу, значення показників зменшувались у 1,5-2 рази, особливо це помітно при концентрації 2,0 мкг/мл і можна пояснити розвитком оксидативного стресу. У пробах за дії суто фулерену C_{60} спостерігається зниження рівню хлорофілу *b*, що може вказувати на зниження стабільності білково-ліпідного комплексу світлозбирального комплексу, основним складовим якого є якраз хлорофіл *b*. Це підтверджується і хлорофіловим індексом який підвищився з 1,387 мг/г у контролі до 2,027 мг/г при концентрації фулерену C_{60} 2,0 мкг/мл, що обумовлюється функціональними змінами у фотосинтетичному апараті через імовірне руйнування антенних комплексів внаслідок деградації хлорофілу.

При комплексному впливі фулерену C_{60} і мінерального добрива частково компенсується негативна дія вуглецевих наночастинок. Водночас максимальні значення загального хлорофілу у пробі з концентрацією C_{60} 1,0 мг/л + Д (6,170 мг/г), що більше за контрольні значення на 41,9 %. Добриво стимулює азотний обмін та забезпечує основні іони (Mg^{2+}), які потрібні для біосинтезу тетрапірольного кільця хлорофілу, а отже, слугує буфером фотодеструктивного впливу активних форм

кисню, індукованих наночастинками. Каротиноїди під дією C_{60} також зростають за рахунок активації захисних механізмів: з контролю 0,666 мг/г до 0,755–0,821 мг/г у групах з добривом і C_{60} . Це зростання свідчить про посилення антиоксидантних властивостей каротиноїдів таких як захист тилакоїдних мембран та гасіння реактивних форм кисню.

У варіантах із лише графен оксидом GO (0,5-2,0 мкг/мл) спостерігалось ще помітніше зменшення рівня пігментів, особливо при концентрації 2,0 мкг/мл. Це може бути пов'язано з більш вираженою каталітичною активністю GO для продукування H_2O_2 у хлоропластах. Проте в групах за комбінованої дії графен оксиду GO та добрива, як і у випадку з комбінованою дією фулерену C_{60} та добрива, субтоксичний вплив мінімізувався взаємодією з добривом. Показник загального хлорофілу у пробі з комбінацією GO 1,0 мг/л та добрива підвищується до 5,892 мг/г. Всі випадки найбільшої стабілізації фотосинтетичного апарату досягаються при поєднанні оптимальних концентрацій вуглецевих наночастинок і мінерального добрива, яке забезпечує збалансований рівень макро- і мікроелементів.

Таблиця 3.5.

Вміст фотосинтетичних пігментів у зразках пшениці озимої сорту Актер

№	Дослідна проба	$C_{ХЛ a}$	$C_{ХЛ b}$	$C_{кар}$	$C_{ХЛ a} + C_{ХЛ b}$	$C_{ХЛ a} / C_{ХЛ b}$	ХЛ / кар
1	Контроль	3,905	2,815	0,666	4,347	1,387	10,082
2	$C_{60} 0,5$ МКГ/МЛ	2,838	1,509	0,581	5,685	1,880	7,472
3	$C_{60} 1,0$ МКГ/МЛ	3,657	2,029	0,795	5,073	1,801	7,146
4	$C_{60} 1,5$ МКГ/МЛ	3,300	1,773	0,789	4,488	1,861	6,422
5	$C_{60} 2,0$ МКГ/МЛ	3,005	1,482	0,695	5,428	2,027	6,448
6	$C_{60} 0,5$ МКГ/МЛ + Д	3,506	1,922	0,786	6,170	1,824	6,901
7	$C_{60} 1,0$ МКГ/МЛ + Д	3,826	2,343	0,821	5,757	1,632	7,508
8	$C_{60} 1,5$ МКГ/МЛ + Д	3,680	2,076	0,794	5,343	1,772	7,242
9	$C_{60} 2,0$ МКГ/МЛ + Д	3,423	1,920	0,755	6,721	1,782	7,073
10	GO 0,5 МКГ/МЛ	2,685	1,363	0,600	4,049	1,969	6,745
11	GO 1,0 МКГ/МЛ	3,483	1,969	0,810	5,453	1,768	6,726
12	GO 1,5 МКГ/МЛ	3,147	1,740	0,792	4,887	1,808	6,165
13	GO 2,0 МКГ/МЛ	2,848	1,412	0,673	4,260	2,016	6,328

1 4	GO 0,5 мкг/мл + Д	3,371	1,926	0,770	5,297	1,750	6,874
1 5	GO 1,0 мкг/мл + Д	3,756	2,130	0,825	5,886	1,763	7,132
1 6	GO 1,5 мкг/мл + Д	3,529	2,033	0,795	5,563	1,735	6,989
1 7	GO 2,0 мкг/мл + Д	3,239	1,785	0,787	5,024	1,813	6,379

За результатами спектрометричного аналізу дослідних зразків озимої пшениці сорту Патрас (Табл. 3.6) контрольні рослини продемонстрували вміст хлорофілу *a* на рівні 3,857 мг/г і хлорофілу *b* - 2,791 мг/г, що майже відповідає сорту Актер, але з тенденцією до трохи нижчої базової пігментної насиченості, не дивлячись на кращі морфометричні показники. Вплив C_{60} у концентраціях 0,5-2,0 мг/л також спричиняв зниження рівня пігментів, проте не так різко як у сорту Актер. Мінімальні значення хлорофілу *a* спостерігались при 2,0 мг/л (2,947 мг/г, -22,2 % від контролю), у той час як при концентрації C_{60} 1,0 мг/л спостерігався майже такий самий рівень, як і в контролі (3,553 мг/г).

Проби з комбінованою дією фулерену C_{60} та добрива демонстрували виражений синергетичний ефект - при концентрації C_{60} 1,0 мг/л загальний вміст хлорофілів складав 6,121 мг/г, всього на 8% нижче контролю і вище, ніж будь-яка проба з вмістом окремо вуглецевих наночастинок без добрива. Зростання вмісту каротиноїдів у сорту Патрас було подібне до сорту Актер (до 0,828 мг/г), що також вказує на активацію антиоксидантної захисної системи як універсального механізму адаптації до дії наночастинок.

При дії графен оксиду GO спостерігалось більш суттєве зниження обох типів хлорофілів на рівні 21-32% залежно від концентрації, а додавання добрива згладжувало ці відмінності. Збільшення співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу

b (від 1,381 у контролі до 2,081 у варіанті GO 2,0 мг/л) вказує на ті самі структурні зміни в організації фотосистем, як і у сорту Актер. Водночас підвищення вмісту каротиноїдів за дії фулерену C₆₀ та графен оксиду GO з добривом є проявом перебудови фотосинтетичних мембран у напрямку підвищення фотопротекції.

Таблиця 3.6.

**Вміст фотосинтетичних пігментів у зразках пшениці озимої сорту
Патрас**

№	Дослідна проба	$C_{\text{хл } a}$	$C_{\text{хл } b}$	$C_{\text{кар}}$	$C_{\text{хл } a} + C_{\text{хл } b}$	$C_{\text{хл } a} / C_{\text{хл } b}$	хл / кар
1	Контроль	3,857	2,791	0,665	6,648	1,382	9,992
2	C ₆₀ 0,5 мкг/мл	2,789	1,463	0,573	4,253	1,905	7,417
3	C ₆₀ 1,0 мкг/мл	3,553	2,036	0,792	5,590	1,745	7,050
4	C ₆₀ 1,5 мкг/мл	3,251	1,769	0,788	5,020	1,837	6,363
5	C ₆₀ 2,0 мкг/мл	2,947	1,505	0,678	4,452	1,958	6,566
6	C ₆₀ 0,5 мкг/мл + Д	3,500	1,866	0,770	5,366	1,875	6,969
7	C ₆₀ 1,0 мкг/мл + Д	3,774	2,346	0,804	6,121	1,608	7,611

8	C ₆₀ 1,5 мкг/мл + Д	3,621	2,093	0,787	5,715	1,729	7,254
9	C ₆₀ 2,0 мкг/мл + Д	3,384	1,886	0,759	5,270	1,793	6,941
10	GO 0,5 мкг/мл	2,666	1,283	0,600	3,949	2,078	6,575
11	GO 1,0 мкг/мл	3,451	1,902	0,817	5,354	1,814	6,550
12	GO 1,5 мкг/мл	3,115	1,729	0,782	4,844	1,801	6,188
13	GO 2,0 мкг/мл	2,827	1,355	0,668	4,182	2,085	6,261
14	GO 0,5 мкг/мл + Д	3,328	1,850	0,796	5,178	1,798	6,501
15	GO 1,0 мкг/мл + Д	3,716	2,095	0,828	5,811	1,773	7,011
16	GO 1,5 мкг/мл + Д	3,505	1,973	0,806	5,479	1,776	6,795
17	GO 2,0 мкг/мл + Д	3,230	1,737	0,792	4,967	1,858	6,272

Порівнюючи обидва сорти, спостерігається вища чутливість сорту Актер до субточкисичної дії наночастинок, а сорт Патрас демонструє кращу стабільність фотосинтетичного апарату при зовнішніх впливах такого типу. В обох сортів поєднання вуглецевих наночастинок з мінеральним добривом дозволяє пом'якшити вплив фулерену C₆₀ і графен оксиду GO, особливо на фоні оптимальних концентрацій - при 1,0 мг/л обидва сорти майже повністю демонструють рівень пігментів, порівняний із контролем. Підвищення рівня каротиноїдів у цих пробах

є чітким підтвердженням активації захисних механізмів у фотосинтетичному апараті та вказує на адаптацію рослин до стресових умов.

3.4. Вплив фулерену C₆₀, графен оксиду GO та їх комбінованої дії з мінеральним добривом на вміст МДА у *T. aestivum*

Малоновий діальдегід (МДА) є кінцевим продуктом перекисного окислення ліпідів і є важливим біомаркером оксидативного стресу в рослинних клітинах. Визначення вмісту МДА методом TBARS (thiobarbituric acid reactive substances) дозволяє оцінити рівень пошкодження клітинних мембран під впливом активних форм кисню (АФК).

Результати впливу C₆₀ фулерену, графен оксиду GO та їх комбінацій з мінеральним добривом FRN2002 на вміст МДА у проростках пшениці озимої сортів Актер та Патрас на 14 день після пророщування наведені у таблицях 3.7 і 3.8.

У контрольних рослин сорту Актер (табл. 3.7) вміст МДА становив $6,83 \pm 0,17$ нмоль/г, що в середньому відповідає базовому рівню перекисного окислення ліпідів за відсутності стресових чинників. Обробка насіння C₆₀ фулереном у концентраціях 0,5-2,0 мг/л призвела до зниження вмісту МДА, причому найбільший ефект спостерігався при концентрації 1,0 мг/л, де вміст МДА знизився до $5,17 \pm 0,11$ нмоль/г, що на 24,3% менше контролю. При концентрації 0,5 мг/л зниження становило 13,0% від контролю, при 1,5 мг/л - 5,3%, однак при концентрації 2,0 мг/л підвищився на 10,8% в порівнянні з контролем.

Графен оксид GO виявив дозозалежний ефект з проявом гормезису. При концентрації 0,5 мг/л GO вміст МДА практично не відрізнявся від контролю, становлячи $6,97 \pm 0,15$ нмоль/г (+2,0% від контролю), при 1,0 мг/л спостерігалось зниження вмісту до $6,18 \pm 0,12$ нмоль/г (-9,5% від контролю), що свідчить про відсутність токсичної дії. Однак при підвищенні концентрації до 1,5 мг/л відбувалося різке збільшення вмісту МДА до $10,87 \pm 0,24$ нмоль/г (+59,2% від контролю), а при 2,0 мг/л досягнуто $14,43 \pm 0,31$ нмоль/г (+111,3% від контролю). Така дія підвищених концентрацій графен оксиду GO може бути обумовлена

механічним пошкодженням мембран гострими краями графенових площин, генерацією АФК через функціональні групи (-ОН, -СООН, -О-) та порушенням мембранного потенціалу [10].

Комбінована дія фулерену C_{60} з аміачною селітрою посилила антиоксидантний ефект наночастинок. При концентрації C_{60} 1,0 мг/л вміст МДА знизився до мінімального значення $5,08 \pm 0,10$ нмоль/г (-25,6% від контролю без добрива), що навіть нижче, ніж при дії самого C_{60} без добрива (-24,3%). За дії цієї комбінації зафіксовано найвищу активність каталази 6,121 мкат/мг білка, що на 41,9% вище контролю. При інших концентраціях C_{60} з добривом також спостерігалось зниження МДА на 5,1-8,8%, що корелює з підвищеною активністю антиоксидантних ферментів.

Для комбінації графен оксиду GO з добривом спостерігався захисний ефект мінерального живлення. При концентрації GO 1,0 мг/л вміст МДА становив $5,63 \pm 0,11$ нмоль/г (-17,6% від контролю), що краще, ніж без добрива (-9,5%). Найважливіше, що добриво послабило субтоксичний ефект високих концентрацій графен оксиду GO: при 1,5 мг/л з добривом МДА становив $8,52 \pm 0,19$ нмоль/г (+24,7%), тоді як без добрива ріст вмісту МДА становив +59,2% від контролю, а при 2,0 мг/л відповідно $10,18 \pm 0,22$ нмоль/г (+49,1%) проти 14,43 нмоль/г (+111,3%) без добрива. Це підтверджує протекторну роль збалансованого мінерального живлення в умовах оксидативного стресу [24].

Таблиця 3.7.

Вміст МДА у зразках пшениці озимої сорту Актер

№	Вміст проби	Вміст МДА нмоль/г
1	Контроль	$6,83 \pm 0,17$
2	C_{60} 0,5 мкг/мл	$5,94 \pm 0,13$
3	C_{60} 1,0 мкг/мл	$5,17 \pm 0,11$
4	C_{60} 1,5 мкг/мл	$6,47 \pm 0,14$

5	C ₆₀ 2,0 мкг/мл	6,09 ± 0,12
6	C ₆₀ 0,5 мкг/мл + Д	6,48 ± 0,13
7	C ₆₀ 1,0 мкг/мл + Д	5,08 ± 0,10
8	C ₆₀ 1,5 мкг/мл + Д	6,23 ± 0,12
9	C ₆₀ 2,0 мкг/мл + Д	6,37 ± 0,13
10	GO 0,5 мкг/мл	6,97 ± 0,15
11	GO 1,0 мкг/мл	6,18 ± 0,12
12	GO 1,5 мкг/мл	10,87 ± 0,24
13	GO 2,0 мкг/мл	14,43 ± 0,31
14	GO 0,5 мкг/мл + Д	6,39 ± 0,14
15	GO 1,0 мкг/мл + Д	5,63 ± 0,11
16	GO 1,5 мкг/мл + Д	8,52 ± 0,19
17	GO 2,0 мкг/мл + Д	10,18 ± 0,22

У контрольних зразках сорту Патрас (табл. 3.8) вміст МДА становив $6,42 \pm 0,15$ нмоль/г, що дещо нижче, ніж у сорту Актер ($6,83$ нмоль/г). Це може свідчити про більш ефективну базову антиоксидантну систему сорту Патрас, що видно і по результатам морфометричного аналізу.

За дії фулерену C₆₀ проби сорту Патрас мали подібну до сорту Актер динаміку зниження МДА. При концентрації 0,5 мг/л вміст МДА знизився до $5,51 \pm 0,12$ нмоль/г (-14,2% від контролю), при 1,0 мг/л до найнижчого значення $4,83 \pm 0,10$ нмоль/г (-24,8% від контролю). При концентраціях 1,5 та 2,0 мг/л спостерігалось зниження на 5,6-10,7%, що свідчить про стабільну антиоксидантну дію C₆₀ у широкому діапазоні концентрацій.

Графен оксид GO виявив аналогічно до сорту Актер гормезис, але з ще більш вираженою токсичністю високих доз. При концентрації GO 0,5 мг/л вміст МДА був

близьким до контролю ($6,53 \pm 0,14$ нмоль/г, +1,7% від контролю), при 1,0 мг/л знизився до $5,91 \pm 0,12$ нмоль/г (-7,9% від контролю). При 1,5 мг/л відбувся різкий стрибок до $11,27 \pm 0,25$ нмоль/г (+75,5% від контролю), а при 2,0 мг/л до максимуму $15,12 \pm 0,33$ нмоль/г (+135,5% від контролю), що на 24,2% вище, ніж у Актера при тій самій концентрації. Це вказує на те, що сорт Патрас більш чутливий до токсичної дії високих концентрацій ГО, незважаючи на нижчий базовий рівень МДА.

Комбінована дія C_{60} з аміачною селітрою у сорту Патрас виявила найкращі результати. При концентрації C_{60} 1,0 мг/л вміст МДА становив $4,92 \pm 0,10$ нмоль/г (-23,4% від контролю). При інших концентраціях також спостерігалось стійке зниження МДА на 4,4-8,4%.

Для комбінованої дії графен оксиду ГО з добривом у сорту Патрас також проявився захисний ефект мінерального живлення як і в сорту Актер. При концентрації ГО 1,0 мг/л вміст МДА знизився до $5,33 \pm 0,11$ нмоль/г (-17,0% від контролю), що вище, ніж за дії суто графен оксиду ГО (-7,9% від контролю). При токсичній концентрації 2,0 мг/л добриво знизило МДА до $10,67 \pm 0,23$ нмоль/г (+66,2% від контролю), що на 69,3% менше, ніж без добрива (+135,5% від контролю). Це може вказувати на те, що збалансоване мінеральне живлення послаблює окисний стрес, індукований підвищеними концентраціями графен оксиду ГО.

Таблиця 3.8.

Вміст МДА у зразках пшениці озимої сорту Патрас

№	Вміст проби	Вміст МДА нмоль/г
1	Контроль	$6,42 \pm 0,15$
2	C_{60} 0,5 мкг/мл	$5,51 \pm 0,12$
3	C_{60} 1,0 мкг/мл	$4,83 \pm 0,10$
4	C_{60} 1,5 мкг/мл	$6,06 \pm 0,13$

5	C ₆₀ 2,0 мкг/мл	5,73 ± 0,12
6	C ₆₀ 0,5 мкг/мл + Д	6,14 ± 0,13
7	C ₆₀ 1,0 мкг/мл + Д	4,92 ± 0,10
8	C ₆₀ 1,5 мкг/мл + Д	5,88 ± 0,12
9	C ₆₀ 2,0 мкг/мл + Д	5,99 ± 0,13
10	GO 0,5 мкг/мл	6,53 ± 0,14
11	GO 1,0 мкг/мл	5,91 ± 0,12
12	GO 1,5 мкг/мл	11,27 ± 0,25
13	GO 2,0 мкг/мл	15,12 ± 0,33
14	GO 0,5 мкг/мл + Д	6,03 ± 0,13
15	GO 1,0 мкг/мл + Д	5,33 ± 0,11
16	GO 1,5 мкг/мл + Д	8,91 ± 0,20
17	GO 2,0 мкг/мл + Д	10,67 ± 0,23

Загалом, сорт Патрас має дещо нижчий базовий рівень МДА, що свідчить про більш ефективну антиоксидантну систему, однак він виявився більш чутливим до субтоксичної дії підвищених концентрацій графен оксиду GO, демонструючи на 24,2% більше підвищення МДА при 2,0 мг/л порівняно з Актером. Це може бути пов'язано з різницями в товщині та складі кутикули, проникності мембран або співвідношенні насичених та ненасичених жирних кислот у ліпідах мембран між сортами [24].

Обидва сорти показали найкращі результати за комбінованої дії фулерену C₆₀ з мінеральним добривом при концентрації 1,0 мг/л, де вміст МДА знижувався на 23,4-25,6% порівняно з контролем. Для комбінованої дії графен оксиду GO з мінеральним добривом оптимальною також виявилася концентрація 1,0 мг/л, що забезпечила зниження МДА на 17,0-17,6%. Підвищені концентрації графен оксиду

GO (1,5-2,0 мг/л) викликали потенційний оксидативний стрес в обох сортів, але добриво FRN2002 значно послаблювало токсичний ефект, знижуючи вміст МДА на 34,5-49 % порівняно з варіантами без додавання добрива, але це також може вказувати на адаптацію проростків до стресових умов.

Різниця в дії фулерену C_{60} та графен оксиду GO обумовлена їх структурними особливостями. Фулерен C_{60} має закриту сферичну структуру з рівномірним розподілом електронної густини, що забезпечує стабільну антирадикальну активність без оксидативного ефекту. GO має площинну структуру з кисневмісними функціональними групами, які можуть виступати як антиоксиданти при низьких концентраціях через здатність до ОВР, але генерують АФК при високих дозах.

ВИСНОВКИ

Було досліджено вплив фулерену C₆₀ та графен оксиду GO на пшеницю озиму *Triticum aestivum* сортів Актер та Патрас у діапазоні концентрацій – 0,5 мкг/мл, 1,0 мкг/мл, 1,5 мкг/мл, 2,0 мкг/мл окремо та за комплексної дії з мінеральним добривом (аміачна селітра, FRN2002) на морфометричні показники, активність АОЕ – каталази, вміст фотосинтетичних пігментів та малонового диальдегіду (МДА) у проростках пшениці.

1. Застосування C₆₀ стимулювало ріст кореневої системи з максимальним ефектом при концентрації 1,0 мкг/мл, тоді як вищі концентрації призводили до зниження стимулюючої дії. Комбінація вуглецевих наночастинок з мінеральним добривом посилювала позитивний ефект на розвиток кореневої системи. Графен оксид виявив менший ростостимулюючий ефект порівняно з C₆₀, при цьому високі концентрації пригнічували ростові процеси. Сорт Актер виявився більш чутливим до стимулюючої дії вуглецевих наночастинок на ріст коренів порівняно з сортом Патрас.

2. Наночастинки C₆₀ та графен оксид GO чинять протилежний вплив на процеси пероксидного окислення ліпідів мембран, фулерен C₆₀ виявив виражені антиоксидантні властивості, знижуючи інтенсивність пероксидного окислення ліпідів мембран при оптимальних концентраціях. Застосування добрива посилювало захисний ефект C₆₀, що свідчить про синергічну взаємодію між наночастинками та поживними елементами. Графен оксид GO індукував окисний стрес, який залежить від його концентрації, при цьому найвищі дослідні концентрації GO призводили до значного підвищення вмісту продуктів окислення ліпідів. Мінеральне добриво частково нівелювало прооксидантну дію графен оксиду, демонструючи захисний ефект поживних елементів.

3. Активність каталази у проростках пшениці суттєво залежить від типу наночастинок та генетичних особливостей рослин, виявляючи виражену сортову специфічність регуляції антиоксидантних систем. Фулерен C₆₀ індукував

активність каталази з максимальним ефектом при концентрації 1,0 мкг/мл, при цьому сорт Патрас демонстрував значно вищу відповідь порівняно з Актером. Комбінація C_{60} з добривом забезпечувала найвищу активацію ферменту у сорту Актер, тоді як у сорту Патрас максимальна активність спостерігалася без добрива. Графен оксид GO також стимулював активність каталази, хоча ефект був менш вираженим порівняно з фулереном C_{60} . Застосування добрива посилювало індукцію каталази за дії графен оксиду в обох сортів. Виявлена кореляція між підвищенням активності каталази та зниженням інтенсивності пероксидного окислення ліпідів підтверджує ефективність ферментативного антиоксидантного захисту.

4. Вплив наночастинок на вміст фотосинтетичних пігментів характеризується концентраційною залежністю та від типу наноматеріалу, при цьому оптимальна концентрація забезпечує збалансовану активацію пігментного комплексу. Застосування фулерену C_{60} у концентраціях 1,0-1,5 мкг/мл стимулювало синтез хлорофілів та каротиноїдів, при цьому комбінація з мінеральним добривом посилювала накопичення фотосинтетичних пігментів. Співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* залишалось стабільним при дії C_{60} , що свідчить про збалансовану активацію фотосинтетичного апарату. Графен оксид GO у низьких концентраціях також стимулював синтез пігментів, проте високі концентрації призводили до суттєвого зниження їх вмісту та порушення співвідношення. Сорт Патрас характеризувався вищим базовим вмістом фотосинтетичних пігментів, проте реакція на дію вуглецевих наночастинок була співставною між сортами.

Комплексний аналіз усіх досліджених параметрів засвідчує узгоджену фізіолого-біохімічну відповідь проростків пшениці на дію наночастинок. Фулерен C_{60} виявив переважно позитивний вплив на рослини, стимулюючи ростові процеси, активуючи антиоксидантний захист, знижуючи окисний стрес та підвищуючи вміст фотосинтетичних пігментів при оптимальній концентрації 1,0 мкг/мл. Графен оксид GO демонстрував при низьких концентраціях стимуляцію адаптивних механізмів та ростових процесів, тоді як при високих концентраціях індукував окисний стрес

та пригнічував фізіологічні процеси. Застосування аміачної селітри (FRN2002) у якості мінерального добрива посилювало позитивні ефекти обох типів наночастинок та частково нівелювало негативну дію високих концентрацій графен оксиду. Потенційний фітотоксичний ефект виявлено лише при застосуванні високих концентрацій графен оксиду (1,5-2,0 мкг/мл), що проявлялося у пригніченні росту, підвищенні окисного стресу та зниженні вмісту фотосинтетичних пігментів, але це може вказувати і на адаптацію рослин до стресу. Комплексний позитивний вплив на біохімічні та фізіологічні параметри пшениці підтверджено для фулерену C₆₀ у концентрації 1,0 мкг/мл у поєднанні з мінеральним добривом, що свідчить про перспективність застосування цього типу наночастинок у агропромисловості для підвищення адаптивного потенціалу та продуктивності однієї з найважливіших сільськогосподарських культур - озимої пшениці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мануїлов О. Україна в 2024 році експортувала зерна на \$9,4 млрд – forbes.ua. Forbes.ua | Бізнес, мільярдери, новини, фінанси, інвестиції, компанії. URL: <https://forbes.ua/news/ukraina-v-2024-rotsi-eksportovala-zerna-na-94-mlrd-tse-drugiy-rezultat-pislya-rekordnogo-2019-go-13012025-26239> (дата звернення: 29.10.2025).
2. A comparative review on carbon nanomaterials and their impact on plant growth with the lens of green chemistry principles / W. Peng et al. *Global challenges*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/gch2.202400008> (date of access: 19.10.2025).
3. Alkhader A. Nanofertilizers as an alternative to inorganic fertilizers: a review. *African journal of food, agriculture, nutrition and development*. 2023. Vol. 23, no. 122. P. 23956–23974. URL: <https://doi.org/10.18697/ajfand.122.23145> (date of access: 29.10.2025).
4. Analysis of competitive binding of several metal cations by graphene oxide reveals the quantity and spatial distribution of carboxyl groups on its surface / R. R. Amirov et al. *Physical chemistry chemical physics*. 2018. Vol. 20, no. 4. P. 2320–2329. URL: <https://doi.org/10.1039/c7cp07055a> (date of access: 05.11.2025).
5. An efficient protocol for quantifying catalase activity in biological samples / M. H. Hadwan et al. *Bulletin of the national research centre*. 2024. Vol. 48, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s42269-024-01189-z> (date of access: 02.11.2025).
6. A novel method for estimating chlorophyll and carotenoid concentrations in leaves: a two hyperspectral sensor approach / R. Falcioni et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 8. P. 3843. URL: <https://doi.org/10.3390/s23083843> (date of access: 02.11.2025).
7. Barłóg P., Grzebisz W., Łukowiak R. Fertilizers and fertilization strategies mitigating soil factors constraining efficiency of nitrogen in plant production. *Plants*. 2022. Vol. 11, no. 14. P. 1855. URL: <https://doi.org/10.3390/plants11141855> (date of access: 28.10.2025).

8. Broad family of carbon nanoallotropes: classification, chemistry, and applications of fullerenes, carbon dots, nanotubes, graphene, nanodiamonds, and combined superstructures / V. Georgakilas et al. *Chemical reviews*. 2015. Vol. 115, no. 11. P. 4744–4822. URL: <https://doi.org/10.1021/cr500304f> (date of access: 21.10.2025).
9. Carbon-based nanomaterials: multifaceted role in agrochemical recognition, remediation, and release / V. Hegde et al. *Nano today*. 2024. Vol. 57. P. 102388. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2024.102388> (date of access: 19.10.2025).
10. Chakraborty U., Pradhan B. Oxidative stress in five wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) exposed to water stress and study of their antioxidant enzyme defense system, water stress responsive metabolites and H₂O₂ accumulation. *Brazilian journal of plant physiology*. 2012. Vol. 24, no. 2. P. 117–130. URL: <https://doi.org/10.1590/s1677-04202012000200005> (date of access: 07.11.2025).
11. Conjoint application of nano-urea with conventional fertilizers: an energy efficient and environmentally robust approach for sustainable crop production / P. K. Upadhyay et al. *Plos one*. 2023. Vol. 18, no. 7. P. e0284009. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284009> (date of access: 29.10.2025).
12. Considering whether a product involves application of nanotechnology. U.S. Food and Drug Administration. URL: <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/considering-whether-fda-regulated-product-involves-application-nanotechnology> (date of access: 07.11.2025).
13. Cui H. Challenges and approaches to crop improvement through c₃-to-c₄ engineering. *Frontiers in plant science*. 2021. Vol. 12. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.715391> (date of access: 23.10.2025).
14. Designing nanomaterials for sustainable agriculture: introducing largely overlooked physicochemical properties / J. Liu et al. *Plant nano biology*. 2024. P. 100121. URL: <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100121> (date of access: 19.10.2025).

15. Directive - 91/676 - EN - EUR-Lex. EUR-Lex – Access to European Union law – choose your language. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:31991L0676> (date of access: 07.11.2025).
16. Effect of graphene oxide on growth of wheat seedlings: insights from oxidative stress and physiological flux / W. Ren et al. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 2020. Vol. 105, no. 1. P. 139–145. URL: <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02888-9> (date of access: 07.11.2025).
17. Effects of fullerene C60 on the uptake of nitrogen and mineral elements in crops using the synchrotron radiation microscopic X-ray fluorescence spectrometry (SR- μ XRF) and stable isotope labeling / W. Wang et al. *Environmental science: nano*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1039/d4en00310a> (date of access: 07.11.2025).
18. Effects of graphene on morphology, microstructure and transcriptomic profiling of *pinus tabuliformis* carr. roots / X. Zhang et al. *Plos one*. 2021. Vol. 16, no. 7. P. e0253812. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253812> (date of access: 05.11.2025).
19. Effects of graphene oxide on plant growth: a review / Y. Yang et al. *Plants*. 2022. Vol. 11, no. 21. P. 2826. URL: <https://doi.org/10.3390/plants11212826> (date of access: 05.11.2025).
20. Electronic and thermal properties of graphene and recent advances in graphene based electronics applications / M. Sang et al. *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9, no. 3. P. 374. URL: <https://doi.org/10.3390/nano9030374> (date of access: 21.10.2025).
21. EUR-Lex – Access to European Union law – choose your language. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614(01)) (date of access: 07.11.2025).
22. Fageria N. K. *Use of nutrients in crop plants*. Taylor & Francis Group, 2019.
23. Farm to fork strategy. Food Safety. URL: https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en (date of access: 07.11.2025).

24. Fe–Mn nanocomposites doped graphene quantum dots alleviate salt stress of *Triticum aestivum* through osmolyte accumulation and antioxidant defense / M. S. Haydar et al. *Scientific reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38268-6> (date of access: 07.11.2025).
25. Genetic modification for wheat improvement: from transgenesis to genome editing / N. Borisjuk et al. *BioMed research international*. 2019. Vol. 2019. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/6216304> (date of access: 27.10.2025).
26. Ghosh S. *Physics at nanoscale I*. URL: <https://ebooks.inflibnet.ac.in/phy12/> (date of access: 21.10.2025).
27. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications / O. Erenstein et al. *Food security*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7> (date of access: 22.10.2025).
28. Graphene oxide amplifies the phytotoxicity of arsenic in wheat / X. Hu et al. *Scientific reports*. 2014. Vol. 4, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/srep06122> (date of access: 07.11.2025).
29. Graphene oxide and its derivatives films for sustained-release trace element zinc based on cation- π interaction / W. Zhang et al. *Scientific reports*. 2025. Vol. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87696-z> (date of access: 07.11.2025).
30. Graphene oxide: a new carrier for slow release of plant micronutrients / S. Kabiri et al. *ACS applied materials & interfaces*. 2017. Vol. 9, no. 49. P. 43325–43335. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b07890> (date of access: 07.11.2025).
31. Graphene oxide nanoparticles and graphite microparticles on seeds germination and growth of *Solanum lycopersicum* seedlings / I. Vera-Reyes et al. *Mundo nano. revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*. 2023. Vol. 17, no. 32. P. 1e–14e. URL: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69734> (date of access: 07.11.2025).

32. Hadwan M. H. Simple spectrophotometric assay for measuring catalase activity in biological tissues. *BMC biochemistry*. 2018. Vol. 19, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12858-018-0097-5> (date of access: 07.11.2025).
33. Hu Y., Gao H. Chemical synthesis of reduced graphene oxide: a review. *Minerals and mineral materials*. 2023. Vol. 2, no. 2. URL: <https://doi.org/10.20517/mmm.2023.07> (date of access: 21.10.2025).
34. Influence of graphene on the multiple metabolic pathways of Zea mays roots based on transcriptome analysis / Z. Chen et al. *Plos one*. 2021. Vol. 16, no. 1. P. e0244856. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244856> (date of access: 05.11.2025).
35. Karnawat M. A review: applications of nanotechnology in plant growth and crop protection. *Current research in agriculture and farming*. 2021. Vol. 2, no. 1. P. 40–45. URL: <https://doi.org/10.18782/2582-7146.130> (date of access: 29.10.2025).
36. Kekeli M. A., Wang Q., Rui Y. The role of nano-fertilizers in sustainable agriculture: boosting crop yields and enhancing quality. *Plants*. 2025. Vol. 14, no. 4. P. 554. URL: <https://doi.org/10.3390/plants14040554> (date of access: 29.10.2025).
37. Lv J., Christie P., Zhang S. Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. *Environmental science: nano*. 2019. Vol. 6, no. 1. P. 41–59. URL: <https://doi.org/10.1039/c8en00645h> (date of access: 27.10.2025).
38. Marković S., Petrović M., Đukić N. Variability of malondialdehyde content and yield elements in *Triticum aestivum* L. under heat stress conditions. *Kragujevac journal of science*. 2020. No. 42. P. 45–54. URL: <https://doi.org/10.5937/kgjsoci2042045m> (date of access: 07.11.2025).
39. Milec Z., Strejčková B., Šafář J. Contemplation on wheat vernalization. *Frontiers in plant science*. 2023. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1093792> (date of access: 23.10.2025).

40. Nanofertilizers: a smart and sustainable attribute to modern agriculture / A. Nongbet et al. *Plants*. 2022. Vol. 11, no. 19. P. 2587. URL: <https://doi.org/10.3390/plants11192587> (date of access: 29.10.2025).
41. Nanofertilizer use for sustainable agriculture: advantages and limitations / F. Zulfiqar et al. *Plant science*. 2019. Vol. 289. P. 110270. URL: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270> (date of access: 29.10.2025).
42. Nanotechnology risk encyclopedia: reports on the medical, environmental, ethical, legal, and societal implications of nanomaterials and nanoscale materials / U. S. Government et al. Independently Published, 2017.
43. Nitrogen journey in plants: from uptake to metabolism, stress response, and microbe interaction / O. Zayed et al. *Biomolecules*. 2023. Vol. 13, no. 10. P. 1443. URL: <https://doi.org/10.3390/biom13101443> (date of access: 27.10.2025).
44. Phenotypic variability in bread wheat root systems at the early vegetative stage / Y. Chen et al. *BMC plant biology*. 2020. Vol. 20, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02390-8> (date of access: 29.10.2025).
45. Photoperiod and vernalization alleles greatly affected phenological and agronomic traits in bread wheat under autumn and spring sowing conditions / A. Amo et al. *Crop and environment*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.11.002> (date of access: 23.10.2025).
46. Phytotoxicity of graphene family nanomaterials and its mechanisms: a review / Q. Wang et al. *Frontiers in chemistry*. 2019. Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00292> (date of access: 05.11.2025).
47. Precise estimation of chlorophyll a, b and carotenoid content by deconvolution of the absorption spectrum and new simultaneous equations for Chl determination / M. Chazaux et al. *The plant journal*. 2022. Vol. 109, no. 6. P. 1630–1648. URL: <https://doi.org/10.1111/tpj.15643> (date of access: 02.11.2025).
48. Properties of fullerene: physical structure and more. Ossila. URL: <https://www.ossila.com/pages/properties-of-fullerene> (date of access: 07.11.2025).

49. Prylutska^{1*}, S., Tkachenko¹ T., Petrovsky² M. Physiological and biochemical parameters of winter wheat *Triticum aestivum* L. plants after seed treatment with fullerene C(60). *The ukrainian biochemical journal*. 2025. Vol. 97, no. 2. P. 90–104. URL: <https://doi.org/10.15407/ubj97.02.090> (date of access: 05.11.2025).
50. Prylutska S. V., Franskevych D. V., Yemets A. I. Cellular biological and molecular genetic effects of carbon nanomaterials in plants. *Cytology and genetics*. 2022. Vol. 56, no. 4. P. 351–360. URL: <https://doi.org/10.3103/s0095452722040077> (date of access: 02.11.2025).
51. Save and grow in practice : maize, rice, wheat: a guide to sustainable cereal production. Food & Agriculture Organization of the United Nations, 2016. 120 p.
52. Soil-based nano-graphene oxide and foliar selenium and nano-Fe influence physiological responses of 'Sultana' grape under salinity / M. A. Aazami et al. *Scientific reports*. 2022. Vol. 12, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08251-8> (date of access: 05.11.2025).
53. Soil-Plant interactions: the chemistry of nutrient uptake and utilization / R. Bhuvaneshwari et al. *Plant science archives*. 2019. Vol. 4, no. 4. P. 4–6. URL: <https://doi.org/10.51470/psa.2019.4.4.04> (date of access: 27.10.2025).
54. Structural features of highly stable reproducible c60fullerene aqueous colloid solution probed by various techniques / U. Ritter et al. *Fullerenes, nanotubes and carbon nanostructures*. 2014. Vol. 23, no. 6. P. 530–534. URL: <https://doi.org/10.1080/1536383x.2013.870900> (date of access: 29.10.2025).
55. Sustainable cereal production through integrated crop management: a global review of current practices and future prospects / V. Yamini et al. *Frontiers in sustainable food systems*. 2025. Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1428687> (date of access: 22.10.2025).
56. Synergistic release of crop nutrients and stimulants from hydroxyapatite nanoparticles functionalized with humic substances: toward a multifunctional nanofertilizer / H. Y.

- Yoon et al. ACS omega. 2020. Vol. 5, no. 12. P. 6598–6610. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04354> (date of access: 05.11.2025).
57. Synthesis and fabrication of graphene and reduced graphene oxide / S. S. Payyappilly et al. Functional nanocomposites and their applications. Boca Raton, 2024. P. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003412748-1> (date of access: 21.10.2025).
58. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production / W. M. Stewart et al. Agronomy journal. 2005. Vol. 97, no. 1. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0001> (date of access: 19.10.2025).
59. The fullerenes / ed. by H. W. Kroto, D. R. M. Walton. Cambridge University Press, 1993. URL: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511622946> (date of access: 21.10.2025).
60. The intersection of nanotechnology and agriculture: enhancing soil fertility and nutritional outcomes – A comprehensive review / S. Gulaiya et al. Journal of pure and applied microbiology. 2025. URL: <https://doi.org/10.22207/jpam.19.2.50> (date of access: 29.10.2025).
61. The role of nanoparticles in response of plants to abiotic stress at physiological, biochemical, and molecular levels / J. M. Al-Khayri et al. Plants. 2023. Vol. 12, no. 2. P. 292. URL: <https://doi.org/10.3390/plants12020292> (date of access: 02.11.2025).
62. Toxicity and translocation of graphene oxide in Arabidopsis plants under stress conditions / Q. Wang et al. RSC Adv. 2014. Vol. 4, no. 105. P. 60891–60901. URL: <https://doi.org/10.1039/c4ra10621k> (date of access: 07.11.2025).
63. Unveiling the combined effect of nano fertilizers and conventional fertilizers on crop productivity, profitability, and soil well-being / P. K. Upadhyay et al. Frontiers in sustainable food systems. 2023. Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1260178> (date of access: 29.10.2025).
64. Use of carbon nanoparticles to improve soil fertility, crop growth and nutrient uptake by corn (zea mays L.) / F. Zhao et al. Nanomaterials. 2021. Vol. 11, no. 10. P. 2717. URL: <https://doi.org/10.3390/nano11102717> (date of access: 29.10.2025).

65. Walton D. R. M. Fullerene | definition, properties, uses, & facts | britannica. Encyclopedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/fullerene> (date of access: 07.11.2025).
66. Wheat / G. A. Slafer et al. Crop physiology case histories for major crops. 2021. P. 98–163. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819194-1.00003-7> (date of access: 22.10.2025).
67. Wintermans J. F. G. M., De Mots A. Spectrophotometric characteristics of chlorophylls a and b and their phenophytins in ethanol. *Biochimica et biophysica acta (BBA) - biophysics including photosynthesis*. 1965. Vol. 109, no. 2. P. 448–453. URL: [https://doi.org/10.1016/0926-6585\(65\)90170-6](https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6) (date of access: 02.11.2025).