

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

06.10 – МКР. 1998 “С” 2023.11.01 022 ПЗ

КОКОВІНА МАКСИМА ІГОРОВИЧА

2024 р.

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнології та екології

УДК 601.2:577.121:633:632.11

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету
захисту рослин, біотехнологій та
екології

_____ **Коломієць Ю.В.**
« ____ » _____ 2024 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
фізіології, біохімії рослин та
біоенергетики

_____ **Прилуцька С.В.**
« ____ » _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Регуляція стресостійкості рослин у сільськогосподарських культур вуглецевими наночастинками за вмістом вторинних метаболітів»

Спеціальність 162 «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

Керівник кваліфікаційної роботи

д.б.н., професор

Виконав

(підпис)

(підпис)

(підпис)

Лісовий М.М.

Прилуцька С.В.

Коковін М.І,

КИЇВ – 2024

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри фізіології, біохімії
рослин та біоенергетики**

_____ Прилуцька С.В.

“ _____ ” _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ**

_____ Коковін Максим Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 162 «Біотехнологія та біоінженерія»

(код і назва)

Освітня програма «Екологічна біотехнологія та біоенергетика»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Регуляція стресостійкості рослин у сільськогосподарських культур вуглецевими наночастинками за вмістом вторинних метаболітів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від “11” листопада 2024р. № 1998С

керівник роботи _____ д.б.н., проф. Прилуцька Світлана Володимирівна

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

2. Строк подання студентом роботи 20 травня 2024 року

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи _____

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз літературних даних про застосування вуглецевих наночастинок у сільському господарстві.

2. Провести аналіз літературних даних щодо фітотоксичності вуглецевих наночастинок.

3. Оцінити морфометричні показники *Triticum aestivum* після дії різних концентрацій фулерену C₆₀ та у комбінації з біопрепаратом Актоверм.

4. Оцінити вміст МДА у *Triticum aestivum* як маркеру оксидативного стресу після дії різних концентрацій фулерену C₆₀ та у комбінації з біопрепаратом Актоверм.

5. Оцінити вміст фенольних сполук у *Triticum aestivum* після дії різних концентрацій фулерену C₆₀ та у комбінації з біопрепаратом біопрепаратом Актоверм.

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання "1" вересня 2023р.

Завдання прийняв до виконанн _____ Коковін М.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Прилуцька С.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота «Регуляція стресостійкості рослин у сільськогосподарських культур вуглецевими наночастинками за вмістом вторинних метаболітів» виконана у навчально-науковій лабораторії «Біохімії та фітобіотехнології» кафедри фізіології, біохімії рослин та біоенергетики та представлена в обсязі 88 сторінок формату А4, містить 8 таблиць, 8 рисунків, 155 використаних джерел, і складається з таких розділів:

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

Актуальність теми: Вуглецеві наночастинки, а саме фулерени C_{60} та їх водорозчинні похідні, завдяки унікальній структурі, фізико-хімічним властивостям, нанорозмірності і гідрофобності молекули, а також широкого спектру біологічної дії, зокрема противірусної, протигрибкової, антибактеріальної та антиоксидантної тощо, демонструють широкий потенціал застосування у сільському господарстві. Перспективним напрямом досліджень у агробіотехнологіях є оцінка впливу вуглецевих наночастинок на синтез вторинних метаболітів у рослин. Оскільки вторинні метаболіти синтезуються рослинами у відповідь на стресові умови, їх вміст може бути не лише показником самого стресу, але і показником ефективності застосування вуглецевих наночастинок для зменшення або уникнення цього стресу. Зміни концентрацій вторинних метаболітів за дії вуглецевих наночастинок можуть вказувати на активність захисного механізму рослини та її здатність адаптуватися до нових умов. Такий підхід дозволяє глибше розуміти механізми взаємодії між наночастинками та рослиною і сприятиме розробці ефективних стратегій для підвищення стресостійкості та врожайності сільськогосподарських культур.

Мета роботи: використання фулерену C_{60} за концентрацій 0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл, 1 мкг/мл окремо та за комплексної дії з біопрепаратом Актоверм для регуляції стресостійкості пшениці озимої *Triticum aestivum* сорту

Актер і Патрас. Дослідити їх вплив на вміст фенольних сполук та малонового діальдегіду.

Об'єкт дослідження: регуляція внутрішньоклітинних механізмів стресостійкості зернових культур за використання вуглецевих наноматеріалів.

Предмет дослідження: фулерен C₆₀, біопрепаратом «Актоверм» виробництва «БТУ-Центр», пшениця озима *Triticum aestivum* сорту Актер і Патрас.

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

Проаналізовано вітчизняні і закордонні літературні дані про перспективність використання вуглецевих наноматеріалів у сільському господарстві.

Ключові слова: стресостійкість, фулерен C₆₀, фенольні сполуки, малоновий діальдегід, пшениця озима.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1 Характеристика, структура і властивості вуглецевих наноматеріалів.....	11
1.1.1. Фулерен	12
1.1.2. Вуглецеві нанотрубки	13
1.1.3. Графен.....	14
1.2 Використання ВНЧ у сільському господарстві	16
1.3 Механізми проникнення та внутрішньоклітинна локалізація вуглецевих наноматеріалів у рослинах.	19
1.4 Вторинні метаболіти рослин, класифікація, їх роль фізіологічних та біохімічних процесах у рослини.....	21
1.4.1. Алкалоїди	23
1.4.2. Ізопреноїди.....	25
1.4.3. Фенольні сполуки.....	25
1.5 Малоновий діальдегід як потенційний маркер оксидативного стресу в рослинах	30
Розділ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ	33
2.1 Реактиви та обладнання.....	33
2.2 Передпосівна обробка насіння.....	34
2.3 Оцінка морфометричних показників зразків пшениці сорту Актер та Патрас	37
2.4 Визначення загального вмісту фенольних сполук у <i>Triticum aestivum</i> спектрофотометричним методом.....	39
2.5 Визначення загального вмісту МДА у <i>Triticum aestivum</i> спектрофотометричним методом.....	41

2.6 Статистична обробка отриманих результатів.....	44
Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	45
3.1 Вплив фулерену C ₆₀ та його дії з біопрепаратом на морфометричні показники <i>Triticum aestivum</i>	45
3.2 Вміст МДА у <i>Triticum aestivum</i> після дії фулерену C ₆₀ та його комбінованої дії з біопрепаратом	52
3.3 Вміст фенольних сполук у <i>Triticum aestivum</i> після дії фулерену C ₆₀ та його комбінованої дії з біопрепаратом.....	57
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
РЕФЕРАТ	5
ЗМІСТ.....	7
ВСТУП	11
Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	13
1.1 Характеристика, структура і властивості вуглецевих наноматеріалів	13
1.1.1. Фулерен.....	14
1.1.2. Вуглецеві нанотрубки.....	15
1.1.3. Графен	16
1.2 Використання ВНЧ у сільському господарстві.....	18
1.3 Механізми проникнення та внутрішньоклітинна локалізація вуглецевих наноматеріалів у рослинах.	21
1.4 Вторинні метаболіти рослин, класифікація, їх роль фізіологічних та біохімічних процесах у рослини.....	23
1.4.1. Алкалоїди.....	25
1.4.2. Ізопреноїди	27

1.4.3. Фенольні сполуки	27
1.5 Малоновий діальдегід як потенційний маркер оксидативного стресу в рослинах	32
Розділ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ.....	35
2.1 Реактиви та обладнання	35
2.1.1. Характеристика біопрепарату на основі спиртового екстракту біомаси стрептоміцетів «Актоверм»	36
2.2 Передпосівна обробка насіння	36
2.3 Оцінка морфометричних показників зразків пшениці сорту Актер та Патрас	39
2.4 Визначення загального вмісту фенольних сполук у <i>Triticum aestivum</i> спектрофотометричним методом.....	41
2.5 Визначення загального вмісту МДА у <i>Triticum aestivum</i> спектрофотометричним методом.....	43
2.6 Статистична обробка отриманих результатів	46
Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	47
3.1 Вплив фулерену C ₆₀ та його дії з біопрепаратом на морфометричні показники <i>Triticum aestivum</i>	47
3.2 Вміст МДА у <i>Triticum aestivum</i> після дії фулерену C ₆₀ та його комбінованої дії з біопрепаратом.....	54
3.3 Вміст фенольних сполук у <i>Triticum aestivum</i> після дії фулерену C ₆₀ та його комбінованої дії з біопрепаратом	59
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69
ДОДАТКИ.....	85

ВСТУП

Під час вирощування сільськогосподарських культур рослини зазнають екологічних стресів, які можуть перешкоджати їхньому росту та продуктивності. До таких стресових факторів належать низькі температури, посуха, кислотність ґрунту, а також шкідники та хвороби. Кожен з цих факторів створює значні проблеми для рослин, що потенційно може призвести до зниження врожайності та погіршення якості продукції.

Вуглецеві наноматеріали (ВНМ), до яких належать фулерен, графен і вуглецеві нанотрубки (ВНТ), викликають значний інтерес у сільськогосподарських дослідженнях завдяки своїм унікальним хімічним і фізичним властивостям. Ці матеріали можуть взаємодіяти з рослинами, часто спричиняючи стресову реакцію. Така реакція призводить до утворення біосполук, які можуть мати потенційну користь для здоров'я людини. Біосполуки, такі як фенольні сполуки, вітаміни та антиоксиданти, необхідні для адаптації рослин до стресу, що підвищує їхню стійкість та потенційну врожайність [1]. Проте переваги використання ВНМ необхідно зважувати з потенційними ризиками для здоров'я рослин та екологічної стабільності [2].

ВНМ сприяють синтезу біосполук, переважно шляхом індукції утворення активних форм кисню (АФК) [3]. Утворення АФК викликає окислювальний стрес, що призводить до активації різних захисних механізмів рослин, зокрема глутатіон-аскорбатного циклу та фенілпропаноїдного шляху [4]. Ці шляхи критично важливі для синтезу антиоксидантів та інших захисних сполук, які допомагають рослинам адаптуватися до стресових умов. Дослідження показали, що ВНМ, такі як графен і ВНТ, можуть підвищувати активність ферментів, таких як каталаза (КАТ), супероксиддисмутаза (СОД) та аскорбатпероксидаза (АПХ), які беруть участь у пом'якшенні оксидативного стресу [5; 6].

Повідомляється, що фулерени в оптимальних концентраціях сприяють підвищенню рівня хлорофілу, каротиноїдів та інших важливих біосполук у таких культурах, як пшениця, кукурудза та огірок [7]. Наприклад, у пшениці низькі концентрації фулеренів збільшували накопичення флавоноїдів та фенольних

сполук в умовах сольового стресу [8]. Аналогічно, графен покращував вміст первинних метаболітів, таких як цукри та амінокислоти, у перці та баклажанах, тим самим підвищуючи їх загальний поживний профіль та стійкість [9].

Хоча ВНМ мають потенційні переваги, їх застосування супроводжується ризиками. Високі концентрації ВНМ асоціюються з надмірним утворенням АФК, що може призвести до клітинного пошкодження та пригнічення росту рослин [10]. При високих дозах ВНМ можуть спричиняти токсичність, пошкоджуючи клітинні структури, такі як мембрани, що призводить до накопичення токсичних сполук, таких як перекис водню (H_2O_2) та малоновий діальдегід (МДА) [11]. Крім того, ВНМ можуть потрапляти в ґрунтові та водні екосистеми, потенційно впливаючи на нецільові організми та викликаючи екологічний дисбаланс [12].

Попри ці виклики, здатність ВНМ стимулювати виробництво цінних біосполук відкриває перспективні можливості. ВНМ можуть бути особливо корисними у контрольованих сільськогосподарських середовищах, де можна ретельно контролювати їх концентрацію та методи застосування [13]. Крім того, дослідження з модифікації ВНМ для зменшення токсичності, наприклад, функціоналізація ВНМ для покращення їх біосумісності, може зробити їх безпечнішими для широкого використання в аграрному секторі [14].

Хоча ВНМ мають потенціал як індуктори біосполук, необхідно ретельно враховувати їх концентрації та можливий вплив на довкілля. Майбутні дослідження повинні зосередитися на довгостроковому впливі ВНМ на рослини та екосистеми, а також на розробці безпечніших альтернатив..

Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Характеристика, структура і властивості вуглецевих наноматеріалів

Понад три десятиліття тому було досягнуто значного прогресу в галузі наноматеріалів завдяки маніпуляціям з атомами вуглецю, що призвело до створення різноманітних форм з різною морфологією та електронною структурою [80]. Це призвело до появи їх надзвичайних властивостей. Відкриття нових структурних конфігурацій вуглецю, включаючи фулерени, нанотрубки, наноалмази та нановолокна, поряд з добре відомими кристалічними структурами графіту, карбіну та алмазу, викликало підвищений інтерес до вивчення їхніх унікальних характеристик [98].

Вуглець, як хімічний елемент, має особливе значення як основа життя. Його універсальність проявляється в здатності утворювати сполуки з широким спектром елементів і створювати молекули різного складу та структури [99]. Нещодавні відкриття різних форм вуглецю спонукали до переоцінки нашого розуміння фундаментальних процесів за участю вуглецю як у живих, так і в неживих системах [100].

Атом вуглецю демонструє міцні зв'язки завдяки sp , sp^2 та sp^3 гібридизації, утворюючи ковалентні зв'язки з органічними та металевими атомами [101]. Така універсальність дозволяє створювати широкий спектр структур, від невеликих молекул до довголанцюгових сполук [102]. Деякі з цих вуглецевих структур знайшли застосування в сільському господарстві, сприяючи покращенню сільськогосподарського виробництва [103].

Різнманітні наноматеріали на основі вуглецю, включаючи фулерени (C_{60}), вуглецеві нанотрубки, оксиди графену, вуглецеві нановолокна, вуглецеві наноточки та інші вуглецеві наноматеріали, застосовуються в сільському господарстві як стимулятори росту рослин, нанодобрива та засоби для боротьби зі шкідниками [104]. Крім того, ці матеріали були функціоналізовані з іншими наноматеріалами або хімічними речовинами, що використовуються в сільському господарстві, підвищуючи їхню ефективність та універсальність у сільськогосподарському застосуванні [105].

Загалом, дослідження вуглецевих наноструктур є переломним моментом у науковому пошуку, що має наслідки від фундаментальних досліджень до технологічних інновацій [98].

1.1.1. Фулерен

Фулерен C_{60} є одним із найцікавіших і найвідоміших наноматеріалів, виявлених в останні десятиліття. Вперше виявлений у 1985 році групою вчених під керівництвом Роберта Керла, Гарольда Крото і Річарда Смоллі, C_{60} , або бакібол, відомий своєю геометричною структурою, яка нагадує футбольний м'яч. Ця структура складається з 60 атомів вуглецю, розташованих у формі тридцяти двокутників (п'ятита шестикутників) [80]. За своє відкриття цих молекул, що стали першими ідентифікованими фулеренами, дослідники отримали Нобелівську премію з хімії у 1996 році [81].

Існує кілька методів синтезу фулерену C_{60} , серед яких найбільш популярним є метод випаровування графіту під дією дугового розряду в інертному середовищі [82]. Під час цього процесу атоми вуглецю утворюють кластери, серед яких значна кількість є молекулами C_{60} . Ще одним методом є лазерна абляція графіту, що дозволяє досягати високого виходу фулеренів [83]. Новітні методи включають хімічний синтез, що дозволяє контролювати формування фулеренових структур і сприяє функціоналізації молекули для подальших досліджень [84].

C_{60} має унікальні фізико-хімічні властивості. Завдяки високій симетрії та стабільності ці молекули здатні до різних модифікацій, зокрема функціоналізації гідроксильними, карбоксильними та іншими групами [85]. Молекули C_{60} відрізняються високою електронною мобільністю і можуть легко приймати до шести електронів, що робить їх ефективними акцепторами електронів [86]. Завдяки цій властивості C_{60} знайшов застосування у фотоніці та електроніці, зокрема у сонячних елементах та датчиках [87].

Фулерен C_{60} також привернув увагу вчених у сфері сільського господарства завдяки своїм біологічним властивостям. Наприклад, водорозчинні похідні C_{60} можуть сприяти поглинанню мікроелементів рослинами, що покращує їх ріст і

підвищує врожайність [88]. Дослідження показали, що фулеренові наноматеріали здатні захищати рослини від стресових факторів, таких як ультрафіолетове випромінювання і засухи, що робить їх корисними в умовах зміни клімату [89].

Крім того, фулерен C_{60} використовується у складі нанокомпозитів, які допомагають покращити ефективність фітореємедіації, тобто очищення ґрунтів від забруднюючих речовин за допомогою рослин [90]. Наприклад, його водорозчинні форми можуть сприяти біоаккумуляції важких металів у рослинах, що дозволяє ефективніше очищати забруднені території [91].

Фулерени також знайшли застосування в медицині, де вони використовуються як антиоксиданти, антивірусні та антимікробні агенти [92]. Їх унікальна здатність стабілізувати вільні радикали робить C_{60} перспективним для лікування хвороб, пов'язаних з окислювальним стресом [93]. В електроніці C_{60} використовується у виготовленні сонячних батарей, де він виконує роль акцептора електронів у полімерних сонячних елементах, що підвищує їх ефективність [94].

Попри численні перспективи, застосування фулерену C_{60} пов'язане з певними викликами. Одним із них є його низька розчинність у воді, що обмежує його біодоступність. Розв'язання цієї проблеми передбачає модифікацію молекули, що підвищує її розчинність у водних середовищах [95]. Існують також певні занепокоєння щодо потенційного токсичного впливу фулеренів на живі організми, що вимагає додаткових досліджень щодо їхнього впливу на навколишнє середовище та здоров'я [96].

1.1.2. Вуглецеві нанотрубки

Вуглецеві нанотрубки (CNT) — це наноструктури, що стали популярними завдяки своїм унікальним фізичним та хімічним властивостям. Вперше відкриті у 1991 році японським вченим Суміо Іїдзімою, вони складаються з вуглецевих атомів, що утворюють порожнисті трубки з діаметром на рівні нанометрів. Існують два основні типи: одностінні (SWCNT) та багатостінні (MWCNT), кожен з яких має свої специфічні властивості та методи застосування [70].

Існує кілька методів синтезу CNT, серед яких найпопулярнішими є методи дугового розряду, лазерної абляції та хімічного осадження з газової фази (CVD). Метод CVD дозволяє контролювати діаметр, довжину та якість нанотрубок, а також є одним з найбільш економічних та масштабованих методів [71]. Важливим фактором є вибір каталізаторів, які впливають на структуру та властивості отриманих CNT [72].

Завдяки високій міцності на розтягування, електропровідності та теплопровідності, CNT знаходять застосування у багатьох галузях, зокрема в електроніці, медицині та сільському господарстві [73]. У сільському господарстві нанотрубки використовуються для поліпшення поглинання води та іонів у рослинах, зокрема кукурудзі, що сприяє інтенсивному росту культур [74]. CNT також покращують біодоступність поживних речовин і можуть використовуватися як носії для доставляння пестицидів та добрив [75].

Останнім часом зростає увага до використання CNT у сільському господарстві для підвищення врожайності та зменшення негативного впливу на довкілля. CNT також мають антибактеріальні властивості, що підвищує стійкість культур до хвороб [76]. Вони широко застосовуються у фіторемерації, оскільки сприяють кращому поглинанню важких металів з ґрунту рослинами [77].

Однак використання вуглецевих нанотрубок пов'язане з певними викликами, зокрема з можливою токсичністю. Проводяться дослідження щодо оцінки екологічних ризиків та впливу CNT на здоров'я [78]. Для подолання цих проблем розробляються методи контролю синтезу та модифікації поверхні нанотрубок, що зменшує їхній потенційний негативний вплив на довкілля [93].

1.1.3. Графен

Оксид графену (GO) — це форма графену, яка має численні функціональні групи на поверхні, що відкриває широкі можливості для його використання в різних галузях, включаючи науку, промисловість, сільське господарство, медицину та екологію. Завдяки здатності до хімічної модифікації GO стає універсальним матеріалом для багатьох застосувань [60].

Перший синтез GO був проведений у середині ХХ століття шляхом окиснення графіту за допомогою сильних окисників. На сьогодні найпоширенішим методом отримання GO є модифікований метод Гаммерса, що включає використання калій перманганату та інших окисників [61]. Це дозволяє отримати GO, який добре розчиняється у воді та має великий потенціал для подальших модифікацій [62].

Останнім часом зростає інтерес до зелених методів синтезу GO, які використовують відновлювальні ресурси, такі як рослинні відходи. Ці методи є більш екологічними, оскільки знижують використання токсичних реагентів і зменшують негативний вплив на довкілля [63]. Зокрема, GO можна виготовляти з сільськогосподарських відходів, що робить цей процес економічно та екологічно вигідним [64].

Завдяки своїм відмінним адсорбційним властивостям GO широко використовують для очищення води та ґрунтів від важких металів і забруднювачів. Крім того, антибактеріальні властивості GO відкривають можливості для його застосування в медицині та сільському господарстві, зокрема для захисту рослин від шкідливих мікроорганізмів [65].

Однією з основних переваг GO є висока сумісність з іншими наноматеріалами, що дозволяє створювати нанокompозити з покращеними характеристиками. Ці композити використовуються для виробництва суперконденсаторів, сенсорів та у різних екологічних технологіях [66]. Крім того, GO допомагає підвищувати врожайність сільськогосподарських культур і захищати рослини від стресових факторів навколишнього середовища [67].

У сільському господарстві GO використовується для покращення стійкості рослин до стресів і підвищення їх здатності поглинати поживні речовини. Він також сприяє доставці добрив і пестицидів, допомагаючи краще розподіляти їх у рослинах і захищати від несприятливих умов [68]. Оксид графену посилює здатність рослин до фіторемедіації, допомагаючи їм ефективніше поглинати важкі метали з ґрунту [69].

Незважаючи на значний потенціал GO, є певне занепокоєння щодо його впливу на екосистеми та здоров'я людей. Вивчення можливих токсичних і екологічних наслідків GO залишається важливим напрямком досліджень [71]. З метою зниження екологічного впливу важливо розробляти безпечні методи синтезу та утилізації GO, що стане ключовим фактором для його широкого

GO продовжує привертати увагу завдяки унікальним властивостям і широким можливостям для застосування в різних галузях. Його здатність до хімічної модифікації та сумісність з іншими матеріалами роблять GO універсальним інструментом для вирішення завдань у сільському господарстві, медицині та екологічній інженерії. Завдяки зусиллям, спрямованим на розробку екологічних методів виробництва GO, цей матеріал має великий потенціал для сталого розвитку та вирішення глобальних проблем, таких як забруднення довкілля і зниження врожайності.

1.2 Використання ВНЧ у сільському господарстві

В умовах постійного зростання населення планети збільшення та оптимізація сільськогосподарського виробництва на обмежених орних землях з одночасною мінімізацією негативного впливу на навколишнє середовище є значним викликом. Сучасні нанотехнології пропонують потенційні розв'язування цих проблем:

- Підвищення продуктивності сільськогосподарських культур: Стимулятори росту рослин та добрива на основі наноматеріалів мають потенціал для підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.
- Покращений захист рослин: Продукти на основі наноматеріалів, включаючи пестициди та гербіциди, забезпечують покращений захист рослин.
- Зменшення використання агрохімікатів: Наноінкапсульовані засоби захисту рослин і добрива з повільним вивільненням можуть призвести до скорочення загального застосування агрохімікатів.

- Оптимізація точного землеробства: Нанотехнології можуть полегшити практику точного землеробства, дозволяючи проводити більш ефективну і цілеспрямовану сільськогосподарську діяльність.

Нановуглецеві матеріали мають екологічні характеристики та високе співвідношення поверхні до об'єму, що робить їх ефективними носіями поживних речовин у сільському господарстві. Ці матеріали, відомі як "розумні" нанодобрива, продемонстрували здатність утримувати воду та поживні речовини протягом тривалого часу, повільно вивільняючи їх за потреби. Такий цілеспрямований підхід призвів до зменшення залежності від синтетичних добрив, тим самим мінімізуючи надмірне вимивання хімічних речовин у навколишнє середовище і зменшуючи забруднення ґрунту та води [107].

Дослідження показали, що різні типи вуглецевих наноматеріалів використовуються і досліджуються як добрива для різних культур [108]. Наприклад, водорозчинні вуглецеві наночастинки (wsCNPs), отримані шляхом хімічного окислення необроблених вуглецевих наночастинок (rCNPs) у біопаливі, показали позитивний вплив на рослини пшениці в певному діапазоні концентрацій [109]. У модельному експерименті було виявлено, що wsCNPs вивільняють поживні речовини контрольованим чином, посилюючи ріст рослин, причому оптимальна концентрація спостерігається при 50 мг/л. Аналогічно, багатостінні вуглецеві нанотрубки (MWCNT) сприяють проростанню коренів, пагонів та насіння у *Brassica juncea*, що свідчить про позитивний вплив на розвиток рослин [110].

Вуглецеві наноматеріали продемонстрували свою здатність впливати на різні фізіологічні та біохімічні процеси в рослинах, що призвело до значного прогресу в посиленні росту рослин [111, 112, 113]. Зокрема, вуглецеві нанотрубки та фулерен C₆₀ продемонстрували значний вплив на фізіологію рослин, збільшуючи здатність утримувати воду та стимулювати ріст рослин приблизно на 118% [114]. Крім того, було виявлено, що ці наноматеріали стимулюють вироблення біологічно активних сполук у рослинах, таких як шарантин,

кукурбітацин-В, інсулін та лікопін, що призводить до помітного збільшення врожайності насіння *Brassica juncea* [116].

Дослідження показали, що нановуглець, диспергований у воді, може поглинатися кореневими системами рослин і транспортуватися по судинних каналах ксилеми [115]. На поглинання і транспортування нановуглецю в рослинах впливають такі фактори, як розмір, тип, функціоналізація і розчинність нановуглецю, а також реакція рослин на нановуглець [117]. До того, дослідження проростання насіння, яке піддавалося впливу вуглецевих нанотрубок у різних концентраціях, показало покращення показників проростання у певних видів рослин, таких як *Lycopersicon esculentum* та *Allium cepa*, тоді як вплив на інші види, такі як *Brassica rapa*, був мінімальним [117].

Вплив вуглецевих наноматеріалів на рослини є змінним і залежить від таких факторів, як природа наноматеріалу, вид рослини, концентрація, ґрунтові умови та тривалість впливу. Крім того, заряд вуглецевих наноматеріалів також впливає на їх переміщення в рослинах. Нещодавні дослідження [118] висвітлили вплив багатостінних вуглецевих нанотрубок (MWCNTs) на систему фотосинтезу рослин, що призводить до збільшення швидкості транспорту електронів і фотохімічного квантового виходу фотосистеми II порівняно з контрольними рослинами. Крім того, було показано, що вплив МВНТ індукує білки, пов'язані з фотосинтезом, і пригнічує білки окислювального стресу в *Arabidopsis thaliana*.

Вуглецеві наноматеріали з'явилися як допоміжні засоби для рослин у стресових умовах, таких як посуха та сольовий стрес. Наприклад, було доведено, що фулеренол допомагає рослинам цукрових буряків впоратися зі стресом від посухи, проникаючи в коріння і листя, тим самим сприяючи додатковому надходженню води [119]. Дослідники помітили, що позакореневе застосування фулеренолу пригнічує активність ферментів, що викликають стрес у рослинах цукрових буряків [119]. Аналогічно, дослідження показали [120], що наноматеріали на основі вуглецю, такі як наночастинки сажі (CBN), полегшують токсичний вплив сольового стресу на сорго та світчграс. Встановлено, що CBN відновлює схожість насіння та сприяє розвитку молодих проростків, активуючи

експресію генів, пов'язаних з водними каналами, та індуючи вироблення білка аквапорину [121]. Аквапорини відіграють вирішальну роль у регулюванні взаємовідносин між рослиною та водою й експресуються за різних екологічних стресів, підтримуючи ріст рослин.

Крім того, дослідження показали, що вуглецеві наноматеріали можуть модулювати фізіологію рослин і склад ґрунтових бактерій. Застосування вуглецевих наноматеріалів, таких як фулерен С₆₀, відновлений оксид графену та MWCNT на рослинах рису, вирощених у суглинистому ґрунті, призвело до значного підвищення рівня фітогормонів, включаючи індолілоцтову кислоту, гіберелінову кислоту та брасиностероїди. Ці фітогормони відіграють важливу роль у регулюванні росту рослин та забезпеченні стійкості до стресів навколишнього середовища [122]. Крім того, після застосування вуглецевих наноматеріалів у коренях рослин підвищується активність антиоксидантних ферментів, що додатково сприяє стійкості до стресу.

Загалом, вуглецеві наноматеріали мають великі перспективи для покращення стійкості рослин до стресів навколишнього середовища та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.

1.3 Механізми проникнення та внутрішньоклітинна локалізація вуглецевих наноматеріалів у рослинах.

Механізми взаємодії вуглецевих наночастинок (ВНЧ) з рослинами залишаються недостатньо дослідженими. Відомо, що проникнення та внутрішньоклітинна локалізація ВНЧ у рослинах залежать від їхніх фізико-хімічних характеристик, зокрема розміру. Дослідження показали, що фулерени та фулероли можуть бути поглинуті проростками рису (*O. sativa*), вирощеними в гідропонній системі, і переміщуються з кореня до стебел і листя [44]. Зокрема, С₇₀ фулерен накопичувався у судинних тканинах, навколишніх клітинах та міжклітинних просторах, тоді як С₆₀ фулерен був знайдений у кореневих системах сої (*G. max*), томатів (*S. lycopersicum*) та кабачків (*C. pepo*) [45]. Крім того, накопичення С₆₀ фулерену було зафіксоване у тканинах редиски (*Raphanus*

sativus), вирощеної в піщаному субстраті та гідропоніці протягом двох тижнів [46].

Використовуючи раманівську спектроскопію, було виявлено накопичення ВНЧ у репродуктивних органах томатів та квітках [47]. Відомо, що ВНЧ можуть проникати через корені рослин і розподілятися у надземних частинах, а також імовірно транспортуються завдяки капілярному руху [48]. Було виявлено, що багатостінні вуглецеві нанотрубки (БВНТ) здатні проникати через насінневі оболонки ячменю, сої та кукурудзи [49]. БВНТ проникали через оболонки насіння томатів і локалізувалися в ендоспермі. Це проникнення підтверджено за допомогою електронної мікроскопії та раманівської спектроскопії [50].

Накопичення БВНТ спостерігалось в зародковій тканині та поглинальній частині живців насіння сої, без видимих пошкоджень насінневої оболонки [51]. БВНТ переважно локалізувалися в клітинах каліптрогену та верхівки кореня, а також поблизу меристеми й в клітинах плероми центрального циліндра [52]. Ці наночастинки утворювали гранульовані агрегати, які заповнювали клітинний вміст, але в невеликих кількостях взаємодіяли з клітинними стінками [53].

Інші дослідження показали здатність ОВНЧ проникати як через клітинну стінку, так і через мембрану клітин тютюну та *Catharanthus* [58]. За допомогою конфокальної мікроскопії було виявлено локалізацію ОВНТ, мічених FITC, у вакуолях [58]. Також за допомогою електронної мікроскопії було показано, що БВНТ можуть накопичуватися в субклітинних органелах рослинних клітин, таких як пластида, вакуолі та ядро [60].

Відомо, що ВНЧ можуть накопичуватися в тканинах рослин і брати участь у синтезі вуглецевмісних біоорганічних сполук. Встановлено, що великі частинки вуглецю не здатні проникати в клітини рослин і залишаються лише на їхній поверхні [54]. Однак занадто дрібні частинки можуть проходити крізь клітинні стінки шляхом дифузії [55]. Було показано, що окиснені вуглецеві нанотрубки (ОВНТ), мічені флуоресцеїном ізотіоціанатом (FITC), можуть проникати через клітинну стінку і поглинатися клітинами тютюну (*Nicotiana tabacum L.cv.*) шляхом ендоситозу рідинної фази [56, 57].

Одне з досліджень показало, що заряджені окиснені вуглецеві нанотрубки (ОУНТ) сильніше взаємодіють з ліпідами клітинних мембран через електростатичні взаємодії, що послаблює мембрану і дозволяє наноматеріалам проникати в клітину [45]. Інші дослідження вказують на те, що ВНЧ можуть проникати в органели через іонні та водні канали, ендоцитоз, транспортні білки або навіть створювати нові пори [80]. Важливо, що реактивність і доля ВНЧ у клітинах залежать від їхніх поверхневих зарядів [94]. Наприклад, дослідження показало, що листкове внесення амінофункціоналізованих (позитивно заряджених) квантових точок графену (GR) мало вище спорідненість до негативно заряджених клітинних стінок порівняно з графеновими квантовими точками з гідроксильними групами, по-різному впливаючи на фізіологічну реакцію рослин [101].

У цілому, контакт між вуглецевими наноматеріалами (ВНЧ) і клітинами рослин сприймається клітинними рецепторами, що запускає ланцюг подій, включаючи сприйняття, сигналізацію, трансляцію та зміну експресії генів і метаболізму рослин [89]. Незалежно від типу ВНЧ та їхньої дії, характерний розмір (≤ 100 нм) і унікальні властивості, такі як каталізаторні, електричні, механічні та оптичні, дозволяють їм долати захисні бар'єри клітин і переміщуватися всередині них [79, 76]. Залежно від розміру та типу ВНЧ, вони можуть проникати в клітинну стінку, мембрану, хлоропласти, міжклітинні простори, цитоплазму, мітохондрії, вакуолі та ядро [75].

1.4 Вторинні метаболіти рослин, класифікація, їх роль фізіологічних та біохімічних процесах у рослини

Дослідження впливу різних антропогенних та біотичних факторів на рослини набувають все більшого значення через їх зростаючий вплив на рослинні організми. Такі фактори, як важкі метали, забруднювачі повітря, органічні ксенобіотики, радіація, комахи-шкідники, фітопатогени та фітогельмінти створюють значні проблеми для рослин, що зумовлює необхідність дослідження їхньої реакції на стресові умови [34].

Рослини синтезують низькомолекулярні біохімічні продукти шляхом вторинного синтезу, які відіграють вирішальну роль у їхній адаптації до стресу [35]. Ці вторинні метаболіти тісно пов'язані з факторами транскрипції через складні регуляторні мережі, посилюючи епігенетичний контроль над рослинними організмами в несприятливих умовах [36]. Гормональні стимули регулюють процеси росту і розвитку рослин, тоді як розподіл і транспорт фітогормонів контролюються вторинними метаболітами, такими як флавоноїди та інші фенольні сполуки [37].

Сучасні молекулярно-біологічні та екофізіологічні дослідження зосереджені на розумінні широкого спектру та біологічної багатофункціональності вторинних метаболітів, що дає змогу зрозуміти функціонування рослинних організмів на різних стадіях розвитку [38]. Оцінка потенційної стійкості інтродуцентів до несприятливих факторів, патогенів та шкідників передбачає врахування умов середовища існування, прогнозування поширення інвазійних видів та оцінку здоров'я рослин в умовах антропогенної трансформації лісових та паркових екосистем [39].

Однак вивчення ролі вторинних метаболітів на організмовому та екосистемному рівнях є складним завданням через видоспецифічний якісний склад, динаміку синтезу та біохімічних перетворень, поліфункціональність та значну фізіологічну активність цих сполук [40]. Тим не менш, сучасні дослідження спрямовані на розгадку складних процесів, пов'язаних із вторинними метаболітами, та їхнього значення в адаптації рослин і функціонуванні екосистем [41].

У 1891 році професор Альбрехт Коссель ввів терміни "вторинний метаболізм" і "вторинні метаболіти" під час лекції про склад клітини на засіданні Фізіологічного товариства в Берліні. Він запропонував розділити складові рослинної клітини на первинні та вторинні речовини [42]. Первинні метаболіти - це основні компоненти, які містяться у всіх рослинних клітинах, здатних до поділу, тоді як вторинні метаболіти - це несуттєві речовини, що трапляються в

клітинах спорадично. Коссель винайшов термін "вторинні метаболіти", щоб позначити їхню побічну, несуттєву природу [43].

Наразі відомі численні групи вторинних сполук [36], що налічують від кількох десятків до кількох тисяч індивідуальних сполук у кожній групі. Фенольні сполуки та ізопреноїди поширені серед усіх видів рослин, тоді як інші, такі як ацетогеніни або тіофени, зустрічаються лише в декількох видах. Найбільш вивченими групами є фенольні сполуки, ізопреноїди (терпеноїди) та алкалоїди, кожна з яких складається з декількох тисяч вторинних сполук, розділених на різні підгрупи. Крім того, існує близько десятка менш численних груп вторинних метаболітів, таких як небілкові амінокислоти, рослинні аміни, глюкозинолати, ціаногенні глікозиди, беталаїни, поліацетилени, тіофени, алкіламіди тощо, кількість сполук у кожній з яких коливається від декількох до декількох сотень.

1.4.1. Алкалоїди

Алкалоїди, азотовмісні органічні сполуки, що походять переважно з рослин, демонструють надзвичайну різноманітність і складність своєї молекулярної структури. У молекулах алкалоїдів азот зазвичай включений у гетероциклічні кільця, хоча він також може міститися в бічних ланцюгах. Класифікація алкалоїдів базується на структурі їхніх гетероциклів або їхніх біогенетичних попередників, які зазвичай походять від амінокислот.

При приголомшливій кількості, що перевищує 10 000 відомих алкалоїдів, ці сполуки демонструють значну фармакологічну активність. Незважаючи на їхню силу, концентрація алкалоїдів у рослинній сировині, як правило, залишається низькою і коливається в межах кількох відсотків. Однак у виняткових випадках, наприклад, у хінному дереві, концентрація алкалоїдів у корі може сягати 15-20%.

Алкалоїди розподіляються по різних тканинах і органах рослин, часто накопичуючись у місцях, відмінних від тих, де вони синтезуються. Наприклад, нікотин, відомий алкалоїд, синтезується в коренях тютюнових рослин, але накопичується переважно в листі.

Кілька знакових алкалоїдів були виділені з конкретних рослинних джерел. Папаверин, кодеїн і морфін, відомі своїми знеболюючими властивостями, були вперше виявлені в капсулах опійного маку (*Papaver somniferum*). Екстракти беладони (*Atropa belladonna*), що містять алкалоїди, відомі як "снодійні", є невід'ємними компонентами багатьох лікарських засобів, зокрема солутану, бесалолу, беллатаміну та беллалгіну.

У сучасній онкології алкалоїди відіграють вирішальну роль, а такі сполуки, як вінкрисин і вінбластин з барвінку (*Catharanthus roseus*) та аймалін і резерпін з раувольфії зміїної (*Rauvolfia serpentina*) широко застосовуються. Ці алкалоїди використовуються для лікування раку, зниження кров'яного тиску та психотропних ефектів.

Різноманітність алкалоїдів охоплює різні хімічні групи, включаючи піридин, піролідин, індол та інші, кожен з яких має відмінні фармакологічні профілі та біологічну активність. Незважаючи на свою структурну різноманітність, алкалоїди в сукупності являють собою багате джерело сполук зі значним терапевтичним потенціалом і продовжують залишатися предметом широких досліджень і розвідок в галузі хімії природних продуктів і фармакології.

Роль алкалоїдів наразі розуміють з двох основних точок зору [126]: їхні функції в організмі, який їх продукує, та їхні ефекти за межами цього організму. Хоча дослідження зовнішніх функцій алкалоїдів набули значного розвитку, особливо з акцентом на їхню потенційну захисну роль у взаємодії з іншими організмами, цей погляд може спрощувати складність функціональності алкалоїдів. Хоча докази підтверджують захисну функцію алкалоїдів, залишається незрозумілим, чи є це їхньою основною роллю в організмах-продуцентах.

Альтернативна точка зору припускає, що алкалоїди в першу чергу регулюють метаболізм через експресію генів, що вказує на глибший зв'язок з фундаментальними клітинними процесами [126]. Наприклад, дослідження хінолізидинових алкалоїдів виявили їхню незамінність, оскільки повне видалення цих сполук шляхом генетичних маніпуляцій призводить до загибелі

рослин, що підкреслює їхню важливу роль у клітинній активності та експресії генів.

1.4.2. Ізопреноїди

Ізопреноїди — група природних сполук з регулярною будовою вуглецевого скелета, який містить ізопентанові ланки (насичені або ненасичені C5 -одиниці).

Ізопреноїди виділяються як найрізноманітніший клас вторинних метаболітів, що налічує понад 23 тисячі ідентифікованих сполук [127]. Серед них деякі ізопреноїди мають унікальні фізіологічні властивості, як, наприклад, таксол, що видобувається з кори тиса [128], відомий своїми потужними протираковими ефектами. Ця сполука є перспективною для лікування онкологічних захворювань завдяки своїй чудовій цитостатичній активності проти ракових клітин [129].

Ізопреноїди також мають значний фармакологічний потенціал, багато з них відомі як серцеві глікозиди та карденоліди. Зокрема, близько 50 карденолідів, включаючи дигітоксин, було виділено з таких видів, як наперстянка пурпурова та наперстянка лантанна. Дигітоксин, природний глікозид, є важливим засобом невідкладної допомоги при серцевих захворюваннях, який швидко діє протягом 1-3 хвилин після внутрішньовенного введення. Його отримують з насіння ліани *Strophanthus kombe*, що росте в африканських тропічних лісах, і здавна використовувалася місцевими жителями як отрута для стріл під час мисливських експедицій [129].

Крім того, травнева конвалія (*Convallaria majalis*) містить серцеві глікозиди, які, як відомо, мають вищу активність порівняно з іншими варіантами, такими як дигітоксин. Ці дані підкреслюють різноманітні та потужні фармакологічні властивості ізопреноїдів, що відкривають потенційні шляхи для терапевтичних втручань при різних захворюваннях [130].

1.4.3. Фенольні сполуки

Фенольні сполуки (ФС) є ключовими речовинами, що утворюються в результаті вторинного метаболізму рослин. Вони забезпечують пігментацію, терпкість, захист від ультрафіолетового випромінювання, а також захист від паразитів та комах [131, 132]. Вони в основному синтезуються з коричної

кислоти, яка сама по собі утворюється з фенілаланіну завдяки активності L-фенілаланін амоніак-ліази (PAL, EC 4.3.1.5), ферменту, який діє як ключовий перехід між первинним метаболізмом (шикіматний шлях) та вторинним метаболізмом (фенілпропаноїдний шлях). Цей шлях є надзвичайно важливим, оскільки він направляє близько 20% вуглецю, закріпленого рослинами за нормальних умов росту [132].

За хімічною будовою фенольні сполуки складаються з одного або кількох ароматичних кілець з приєднаними гідроксильними групами та поділяються на:

1. Фенольні кислоти: Це найпростіші ФС, які мають одне фенольне кільце та карбонову кислоту. Вони поділяються на гідроксибензойні кислоти (C6-C1), похідні бензойної кислоти, та гідроксикоричні кислоти (C6-C3), похідні коричної кислоти, з прикладами, такими як кавова та ферулова кислоти, які зустрічаються у фруктах та овочах [132, 134].

2. Флавоноїди: Флавоноїди є найпоширенішими ФС, з понад 8 000 відомих сполук [132, 135]. Вони мають структуру, що складається з 15 атомів вуглецю (C6-C3-C6), які утворюють два бензольних кільця, з'єднані піроновим кільцем. Флавоноїди поділяються на шість підгруп: флавоноли, флавони, флаванони, флаваноли, ізофлавоноїди та антоціани, причому їхні антиоксидантні властивості залежать від конфігурації та кількості гідроксильних груп [132, 135].

3. Флавоноли: Характеризуються подвійним зв'язком між C2 та C3, гідроксильною групою в положенні C3 та карбоксильною групою в положенні C4, флавоноли (наприклад, кемпферол, мірицетин та кверцетин) поширені в їстівних та лікарських рослинах та мають різноманітні біоактивні властивості [132, 135].

4. Флавони: Флавони мають схожу структуру з флавонолами, але без гідроксильної групи в положенні C3 [132, 135]. Найпоширеніші флавони - лютеолін і апігенін, а їхні антиоксидантні властивості обумовлені наявністю вільних гідроксильних груп у кільцях [132, 135].

5. Флаванони: Вони містять карбоксильну групу в положенні 4 без подвійного зв'язку між C2 та C3, флаванони (наприклад, нарингенін та гесперидин)

переважно присутні в цитрусових фруктах і служать попередниками для інших флавоноїдів [132, 135].

6. Флаванолі (Флаван-3-олі): Ця підгрупа характеризується наявністю гідроксильної групи в положенні 3, з катехіном та епікатехіном як основними представниками [132, 135]. Їх можна знайти в різних рослинах, особливо в зеленому чаї, який пов'язаний зі зниженням ризику серцево-судинних захворювань [131, 132].

7. Ізофлавоноїди: Вони є унікальними завдяки бензоїдному заміснику в положенні 3, що надає їм схожість із ендogenous естрогенами та здатність взаємодіяти з естрогеновими рецепторами [132, 135]. Ізофлавонони є найвідомішими серед ізофлавоноїдів [132].

8. Антоціани: Антоціани походять від флавонолів, мають гідроксильну групу в положенні 3, два подвійні зв'язки та не мають кетонів в положенні 4 [132, 135]. Вони відповідають за червоно-фіолетове забарвлення багатьох фруктів та овочів і широко використовуються як натуральні барвники в харчовій промисловості [131].

Фенольні сполуки відіграють різноманітні ролі в фізіології рослин, а їх синтез часто посилюється у відповідь на різні екологічні стресори та умови [136, 138]. Наприклад, виробництво ізофлавононів та деяких інших флавоноїдів збільшується, коли рослини піддаються інфекції, фізичному пошкодженню [137, 139], низьким температурам або дефіциту поживних речовин [140, 139], демонструючи їх антимікробні властивості.

Рослини також накопичують флавоноїди, що поглинають УФ-випромінювання, та інші фенольні сполуки в вакуолях епідермальних клітин, щоб захиститися від шкідливого УФ-В випромінювання, запобігаючи його проникненню в глибші тканини [139]. У бобових рослин флавоноїди, секретовані з коренів, відіграють роль у активації генів у бактеріях корневих бульбочок [138]. У відповідь на стрес важких металів спостерігається індукція біосинтезу фенольних сполук; наприклад, пшениця накопичує феноли при впливі токсичності нікелю [136], а кукурудза - у відповідь на вплив алюмінію [138].

Аналогічно, *Phaseolus vulgaris*, виявлений до кадмію (Cd^{2+}), накопичує як розчинні, так і нерозчинні феноли, а листя *Phyllanthus tenellus* демонструють підвищений вміст фенолів після обробки сульфатом міді [136].

Це збільшення вмісту фенолів часто пов'язано з підвищеною активністю ферментів, які беруть участь у фенольному метаболізмі, що свідчить про де ново синтез у відповідь на стрес важких металів. Однак деякі дані свідчать про те, що накопичення флавоноїдів відбувається в основному за рахунок гідролізу кон'югатів, а не нового синтезу [141]. Крім того, збільшення розчинних фенолів, таких як проміжні продукти біосинтезу лігніну, може бути пов'язано з типовими змінами анатомії, викликаними стресом, включаючи посилення міцності клітинної стінки та утворення фізичних бар'єрів для захисту від важких металів [136]. Нещодавно зростає інтерес до антиоксидантних властивостей фенольних сполук завдяки їх потенційним перевагам для здоров'я та ролі в захисті рослин.

Концепція фенольних сполук як антиоксидантів у рослин є добре встановленою [142]. Важливим механізмом, що лежить в основі фенольних антиоксидантів, є їх здатність інгібувати переокиснення ліпідів. Іони металів можуть розщеплювати ліпідні гідропероксида, створюючи ліпідні алкоксильні радикали, які запускають ланцюг окислювальних реакцій. Фенольні антиоксиданти здатні нейтралізувати ці ліпідні радикали, тим самим зупиняючи процес переокиснення. Ефективність цієї активності залежить від структури фенольної молекули та положення та кількості гідроксильних груп [143]. Дослідження Arora et al. [144] показують, що феноли, особливо флавоноїди, можуть змінювати кінетику переокиснення ліпідів, впливаючи на порядок упаковки ліпідів, тим самим стабілізуючи мембрани та зменшуючи їх текучість, що інгібує дифузію вільних радикалів та переокислювальні реакції [144]. Крім того, флавоноїди та проціанідини можуть зв'язуватися з фосфоліпідами мембрани за допомогою водневих зв'язків, накопичуючись на поверхнях мембрани та захищаючи їх цілісність, запобігаючи доступу шкідливих молекул до гідрофобної області бішару [145].

Крім того, *in vitro* дослідження показали, що флавоноїди можуть безпосередньо нейтралізувати різні активні форми кисню (АФК), такі як супероксид ($\cdot\text{O}^{2-}$), пероксид водню (H_2O_2), гідроксильні радикали ($\cdot\text{OH}$), синглетний кисень ($^1\text{O}_2$) та пероксильні радикали, віддаючи електрони або атоми водню [136, 145]. Структурна хімія поліфенолів ідеально підходить для цієї активності, часто виявляючись більш ефективною *in vitro*, ніж вітаміни Е і С [147]. За словами Борса та ін. [142], три структурні особливості значно впливають на антиоксидантний потенціал флавоноїдів: (а) орто 3',4'-дигідрокси структура в кільці В (виявлена в катехін, кверцетин), (b) 2,3-подвійний зв'язок з 4-оксо групою в кільці С (що дозволяє делокалізацію електронів між кільцями А і В) та (c) наявність 3-ОН групи в кільці С та 5-ОН групи в кільці А. Група 3-ОН є найважливішою для віддачі електронів. Глікозильовані флавоноїди, однак, мають тенденцію втрачати свою антиоксидантну активність порівняно з агліконами [146].

Спостерігалось окислення флавонолів, залежне від пероксиду водню, у рослинних тканинах, таких як *Vicia faba* [148], *Tradescantia virginiana* [149] та в мезофільних клітинах *V. faba* [148]. Рослини мають два основних типи пероксидаз: аскорбатпероксидазу (АРХ), яка використовує аскорбат (ASC) як донор електронів, та інші пероксидази, які використовують феноли. АРХ переважно зустрічається в хлоропластах, цитозолі та пероксисомах, де він функціонує для детоксикації H_2O_2 [150]. У цих компартментах аскорбат окислюється до монодегідроаскорбату (MDA) радикала за допомогою АРХ, який потім відновлюється глутатіон-залежною DHAR (дегідроаскорбат редуктазою) [151]. MDA радикал також може бути відновлений назад до аскорбату через неферментні реакції, що включають ферредоксин (Fd) або NAD (P)-залежну ферментативну активність MDAR (монодегідроаскорбат редуктази) [150]. Варто зазначити, що високі концентрації важких металів можуть інгібувати активність АРХ [145].

Пероксидази, які використовують феноли, можна класифікувати як розчинні або зв'язані зі стінкою клітини, апопластичні та вакуолярні пероксидази.

Пероксидази, зв'язані зі стінкою клітини, беруть участь в окисленні мономера лігніну, сприяючи утворенню лігніну та різним фізіологічним процесам [136, 137]. Як запропонували Rai et al. [152], пероксидази, які беруть участь у біосинтезі лігніну, мають вирішальне значення для формування фізичних бар'єрів проти токсичності важких металів, поранень та реакції на патогени, особливо при стресі кадмієм. Розчинні, апопластичні пероксидази можуть працювати з фенолами та аскорбатом для очищення H_2O_2 [137]. Фітофеноли, особливо флавоноли та фенілпропаноїди, присутні у вакуолях та апопласті, можуть детоксикувати H_2O_2 , слугуючи донорами електронів для фенольних пероксидаз, що призводить до утворення фенокисільних радикалів [137].

1.5 Малоновий діальдегід як потенційний маркер оксидативного стресу в рослинах

Найпоширеніші АФК включають супероксидні радикали ($O_2^{\cdot-}$), пероксид водню (H_2O_2) та гідроксильні радикали (OH^{\cdot}) [21]. Ці молекули постійно утворюються як побічні продукти нормальних клітинних процесів, але можуть надмірно вироблятися під впливом стресів навколишнього середовища, таких як високотемпературний стрес, що спричиняє пошкодження клітинних мембран та перекисне окислення ліпідів [22].

Малоновий діальдегід є продуктом перекисного окислення поліненасичених жирних кислот і широко використовується як окислювальний маркер у рослинах. Це особливо корисно, оскільки він відображає рівень перекисного окислення ліпідів і подальшого пошкодження клітинних мембран. Вміст МДА зазвичай зростає в рослинних тканинах у періоди екологічного стресу, наприклад, під впливом дуже високих або дуже низьких температур; отже, він вважається хорошим індикатором рівня окислювального стресу, якого зазнала рослина в звичайних умовах [23].

Роль МДА у реакції на тепловий стрес Високотемпературний стрес спричиняє окислювальний стрес у рослин. Внаслідок цього збільшується утворення АФК, що призводить до пероксидного окислення ліпідів, а отже, до підвищення рівня МДА [24]. Це один з добре вивчених окислювальних процесів

у багатьох видів, що зазнають теплового стресу; відповідно, значне збільшення МДА пов'язане зі ступенем пошкодження клітинних мембран [25]. Таким чином, МДА виявився одним із важливих маркерів для розрізнення рослин, які є відносно толерантними або чутливими до теплового стресу [26].

Наприклад, експерименти з високорослими сортами костриці та кукурудзи показали, що тепловий шок асоціюється з різким підвищенням рівня МДА, що відображає посилення окислювального пошкодження. Така ж тенденція спостерігалася і для проростків пшениці, де накопичення МДА за високої температури було використано для кількісної оцінки ступеня пошкодження мембран. Крім того, вміст МДА тісно пов'язаний з експресією HSPs та іншими антиоксидантними механізмами захисту, які рослини використовують для пом'якшення наслідків теплового оксидативного стресу [29].

Крім того, що МДА використовується для індикації теплового стресу, його також застосовують для оцінки реакції рослин на стрес, спричинений засоленням. Повідомлялося, що рівень МДА корелює з рівнем толерантності до засолення як у *Chloris gayana*, так і у *Cenchrus ciliaris* [30].

У *C. ciliaris* вміст МДА вимірювали після різних часових інтервалів теплового стресу, а саме через 0, 24, 48 і 72 год. Результати вказують на те, що МДА може бути одним з біохімічних маркерів для оцінки стійкості різних генотипів до теплового та сольового стресу. Застосування МДА як окислювального індикатора вже вийшло за межі двох так званих параметрів, якими є температурний та сольовий стрес. Застосування МДА вже розширилося до посухи, впливу важких металів та інших екологічних викликів, які індукують окислювальний стрес. У всіх випадках МДА залишається надійним індикатором пошкодження клітин та ефективності антиоксидантної відповіді в рослинах [31].

Незважаючи на те, що МДА є маркером оксидативного стресу, його вимірювання не позбавлене певних труднощів. Найпоширенішим методом є аналіз на тіобарбітурову кислоту (TBARS), яка реагує з МДА з утворенням забарвленого комплексу, що вимірюється за допомогою спектрофотометрії [33]. Однак цей метод має свої обмеження, оскільки інші альдегіди, що утворюються

в результаті перекисного окислення ліпідів, також можуть реагувати з тіобарбітуровою кислотою і призводити до завищення рівня МДА [34].

Малоновий діальдегід є важливим маркером оксидативного стресу в рослинах за умов абіотичних стресів, таких як висока температура та засолення. Будучи індикатором ступеня перекисного окислення ліпідів, він є дуже корисним інструментом у польових дослідженнях з фізіології рослин, які дозволяють ідентифікувати стресостійкі генотипи та перевіряти механізми антиоксидантного захисту, що дозволяє йому добре служити цій меті. Подальша робота може бути спрямована на вдосконалення методів визначення МДА для підвищення точності та пошуку його застосування в умовах різноманітних екологічних стресів.

Розділ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

2.1 Реактиви та обладнання

У хімічній лабораторії Інституту біотехнології й Технічного університету м. Ільменау (Німеччина), було синтезовано та охарактеризовано водні колоїдні розчини фулерену C_{60} та проведено дослідження їхньої стабільності та структури. Водний колоїдний розчин для дослідження був підготовлений і наданий професором Уве Ріттером. У рамках цього дослідження використовували стабільний колоїдний розчин фулерену C_{60} в чотирьох різних концентраціях: 0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл та 1 мкг/мл. Для попередньої обробки та дезінфекції перед посівом використовували кілька розчинів:

- розчин борної кислоти 0,06 г/л
- 3% розчин перекису водню
- Біопрепарат на основі спиртового екстракту біомаси стрептоміцетів «Актоверм» виробництва «БТУ-Центр», Україна, у концентрації 200 мкл/мл

Для проведення біохімічних аналізів на ферментативну активність, кількість малонового діальдегіду та фенольних сполук використовували наступні реактиви:

- 0,03% розчин H_2O_2 (КОН)
- 4% розчин молібдату амонію
- Дистильована вода
- 1М фосфатно-сольовий буфер
- 0,1% трихлороцтової кислоти
- 20% трихлороцтової кислоти
- 0,5% тіобарбітурової кислоти
- реактив Фоліна-Чокальтеу
- 96% етанол
- 7,5 % Na_2CO_3

Сертифіковане насіння сортів озимої пшениці Актера та Патрас було отримано від офіційного дистриб'ютора DSV (Німеччина) в Україні. Загальна кількість модифікованих зразків становила 20.

У дослідженнях використовували наступне обладнання:

- Центрифуга CM-3M MICROmed
- УФ-спектрофотометр Shimadzu UVmini-1240
- аналітичні ваги TBE 015-0.001-a
- рН-метр ADWA AD1030
- Водяна баня BN-06.2

2.1.1. Характеристика біопрепарату на основі спиртового екстракту біомаси стрептоміцетів «Актоверм»

Актоверм – це біопрепарат, активною речовиною якого є комплекс природних аверсектинів, зокрема Аверсектин С (0,2 %), що синтезується штамом *Streptomyces avermitilis*. Він має сильну інсектицидну та акарицидну дію. Біологічна активність препарату ґрунтується на токсичності Аверсектину С – природного нейротоксину, який незворотно впливає на нервову систему шкідників, викликаючи параліч, після чого вони гинуть. Перед використанням препарат потрібно добре збовтати. Норму препарату слід ретельно розчинити у воді температурою від 15 до 25 °С. Готовий розчин необхідно застосувати одразу або зберігати не більше 5–6 годин у темному місці. Оптимальна температура для обробки – від 18 до 35 °С.

2.2 Передпосівна обробка насіння

Передпосівна обробка насіння проводилася за наступною схемою: спершу насіння стерилізували 3% розчином H_2O_2 протягом 7 хвилин, після чого три рази промивали дистильованою водою. Далі насіння замочували у розчині H_3BO_3 (концентрація 0,6 г/л) на 20 хвилин (Рис. 2.1).

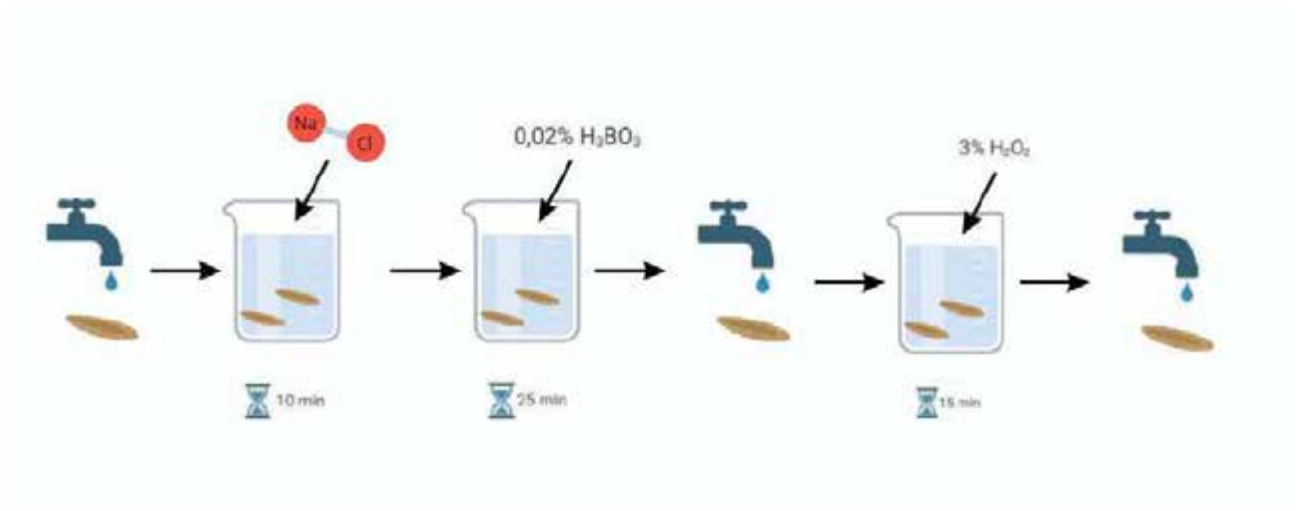


Рис. 2.1 Графічна схема передпосівної обробки насіння

Після цього насіння обробляли протягом 3 годин різними розчинами, зокрема:

- колоїдний водний розчин фулерену C_{60} в діапазоні концентрацій 0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл, 1 мкг/мл;
- біопрепарат «Актоверм» з аверсектином з концентрацією 200 мкл/мл;
- комбінованій обробці вуглецевими наночастинками в діапазоні концентрацій 0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл, 1 мкг/мл; та біопрепаратом з концентрацією 200 мкл/мл;
- Контрольні рослини (без внесення сполук) обробляли дистильованою водою



Рис. 2.2 Процес обробки насіння

Перед висаджуванням у ґрунт, насіння розміщували в чашки Петрі з вологим фільтрувальним папером (Рис. 2.2) і залишали проростати в темряві при температурі $+17^{\circ}\text{C}$ протягом двох діб. Після проростання насіння переносили на світло, висаджували в зволожений ґрунт і вирощували при температурі $+20^{\circ}\text{C}$ та 15-годинному фотоперіоді (Рис. 2.3).



Рис. 2.3 Посадка насіння у ґрунтосуміш

2.3 Оцінка морфометричних показників зразків пшениці сорту Актер та Патрас

На чотирнадцятий день після проростання було ретельно відібрано по п'ять індивідуальних проростків з кожного сорту озимої пшениці, а саме Актора і Патрас, щоб задовольнити вимогу мінімального розміру вибірки. Цей відбір був зроблений для того, щоб забезпечити достатню кількість зразків для попереднього вимірювання різних морфометричних параметрів, які включали, але не обмежувалися довжиною пагона, довжиною кореня, загальною довжиною проростків та їхньою відповідною сирою масою. Ці саджанці були сфотографовані (Рис. 2.4. Знімки зразків пшениці сорту Актер та Патрас контрольної проби на 14 добу після пророщення), щоб слугувати візуальним звітом, який документує стан і зовнішній вигляд саджанців під час дослідження.

Потім саджанці акуратно виймали з ґрунту, приділяючи особливу увагу тому, щоб не пошкодити кореневу систему. Будь-який ґрунт, що залишився на коренях після вилучення, акуратно видалявся вручну, щоб забезпечити чистоту

вимірювань. Для процесу вимірювання довжини пагонів кожен саджанець обережно поклали на гладку, рівну поверхню. Стандартна лінійка, з точністю до міліметра, використовувалася для вимірювання відстані від самої основи пагона до кінчика пагона. Цей метод був послідовно застосований до всіх саджанців.



Рис. 2.4. Знімки зразків пшениці сорту Актер та Патрас контрольної проби на 14 добу після пророщення

У випадку з сортами м'якої пшениці, досліджуваними в цьому дослідженні, було помічено, що кожен проросток давав три зародкових корінці, які були відносно однаково розвинені. Ці корені проростали з насінневого зародка і разом утворювали, так звану, первинну кореневу систему рослини. Серед цих первинних коренів відбирали найдовший для вимірювання довжини кореня. Довжину кореня також вимірювали за допомогою стандартної лінійки, починаючи від основи кореня до самого його кінчика, щоб забезпечити послідовність процесу вимірювання.

Для визначення загальної висоти кожного саджанця було проведено окреме вимірювання. Вимірювання починалося з кінчика найдовшого первинного кореня і продовжувалося до кінчика першого листка. Для цього знову

використовували стандартну лінійку, і всі вимірювання проводили з точністю до 1 міліметра, щоб забезпечити точність.

Після того, як всі вимірювання довжини були завершені, увага переключилася на визначення вологої ваги кожного саджанця. Це було зроблено за допомогою аналітичних ваг, які забезпечили високий рівень точності, з точністю до 0,001 грама. Кожен саджанець ретельно зважувався на вагах окремо, а між кожним вимірюванням ваги ретельно очищалися, щоб запобігти будь-якому забрудненню або неточностям, які можуть виникнути через залишки матеріалу, що залишилися від попереднього саджанця.

2.4 Визначення загального вмісту фенольних сполук у *Triticum aestivum* спектрофотометричним методом

Для визначення загального вмісту фенольних сполук у рослинних зразках використовували модифікований метод Фоліна-Чокальтеу, що базується на спектрофотометричному аналізі [154]. Детальний біохімічний аналіз проводили спеціально для кількісного визначення фенольних сполук у досліджуваних зразках на 14-й день експерименту. Відбір та підготовку рослинного матеріалу проводили з дотриманням стандартних процедур пробопідготовки, загальноприйнятих у біохімічних дослідженнях.

Фенольні сполуки відіграють ключову роль у захисті клітин від окислювального стресу завдяки своїм антиоксидантним властивостям. Вони окиснюються реактивом Фоліна-Чокальтеу, до складу якого входить суміш фосфорно-вольфрамової ($H_2PW_{12}O_{40}$) та фосфорно-молібденової ($H_3PMo_{12}O_{40}$) кислот. Ці кислоти відновлюються до оксидів вольфраму (W_8O_{23}) блакитно-синього кольору та оксидів молібдену (Mo_8O_{23}). Адсорбція отриманого розчину при довжині хвилі 765 нм пропорційна вмісту фенольних сполук [66].

Експериментальна процедура включала спочатку приготування екстракту з рослинного матеріалу. Для цього ретельно відбирали 25–50 мг повітряно-сухої рослинної сировини (чай чорний, зелений, білий) та розтирали її у порцеляновій ступці зі скляним порошком для отримання однорідного зразка. Розтертий

матеріал переносили у пробірки, додавали 1 мл 96% етанолу, після чого пробірки закривали корками та залишали у холодильнику для екстракції речовин протягом 24 годин.

Після екстракції відбирали 0,2 мл надосадової рідини та додавали 1,8 мл етанолу, досягаючи розведення 1:10. Суміш у пробірці ретельно перемішували. Відібрали 0,2 мл цієї суміші, додали 2 мл робочого розчину реактиву Фоліна-Чокальтеу (розведеного у співвідношенні 1:10) та 2 мл 7,5% розчину Na_2CO_3 . Пробірки експонували протягом 1 години для повного розвитку кольорової реакції (Рис. 2.5).

Для оптичного контролю готували розчин, додаючи до 0,2 мл етанолу 2 мл робочого розчину реактиву Фоліна-Чокальтеу та 2 мл розчину Na_2CO_3 . Цей контроль дозволяв виміряти фонове поглинання реагентів без присутності фенольних сполук.

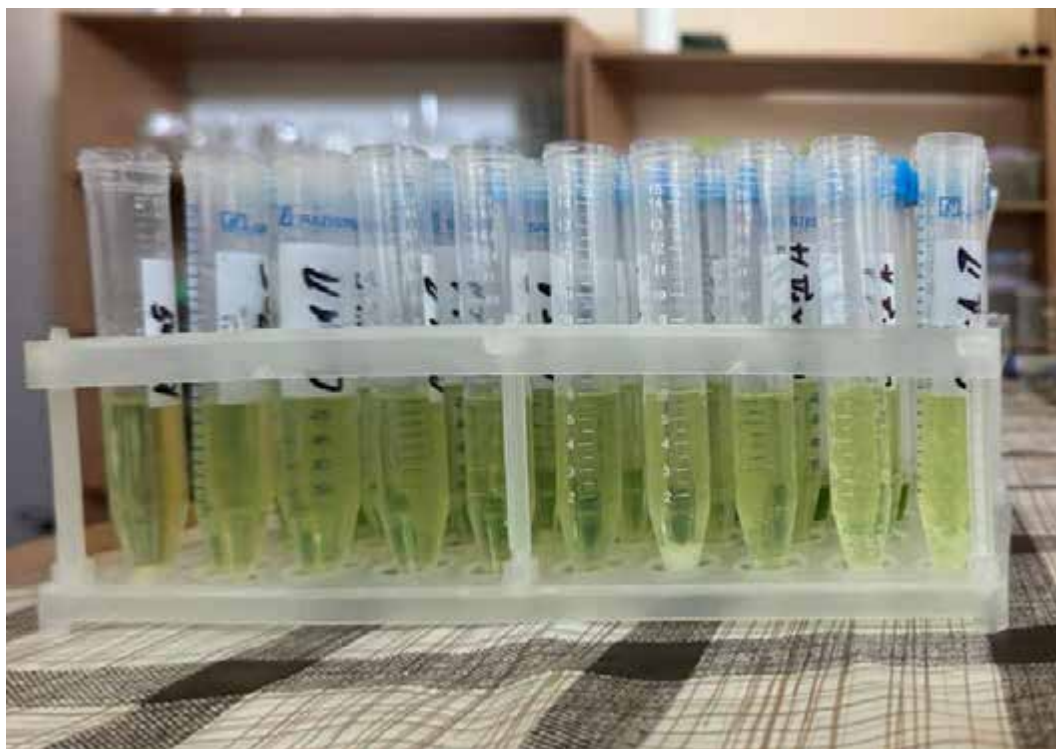


Рис. 2.5 Пробірки з сумішшю після годинного експонування

Після експозиції вимірювали оптичну густина дослідних розчинів відносно оптичного контролю при довжині хвилі 765 нм за допомогою

спектрофотометра. Цей прилад дозволяє точно вимірювати оптичну густина, що дає змогу кількісно визначити вміст фенольних сполук у зразках.

Загальний вміст фенольних сполук у досліджуваних зразках обчислювали за формулою:

$$C = \frac{A k \times 100 \times 25 \times 100}{m \times 540 \times (100 - W)}; \quad (2.1)$$

де:

- A – абсорбція дослідного розчину;
- m – маса наважки сировини, г;
- 540 – коефіцієнт питомого поглинання розчину кислоти при довжині хвилі 765 нм;
- W – втрата в масі при висушуванні сировини, %.

Ця формула враховує поглинання світла, виключно спричинене реакцією фенольних сполук з реактивом Фоліна-Чокальтеу, та дозволяє коректно розрахувати їхній вміст у зразках.

2.5 Визначення загального вмісту МДА у *Triticum aestivum* спектрофотометричним методом

Для визначення малонового діальдегіду (МДА) у рослинних зразках використовували метод тіобарбітурової кислоти (ТБК), який базується на спектрофотометричному аналізі та є загальноприйнятим у біохімічних дослідженнях для оцінки рівня перекисного окислення ліпідів [155]. Детальний біохімічний аналіз проводили спеціально для кількісного визначення МДА у досліджуваних зразках на 14-й день експерименту. Відбір та підготовку рослинного матеріалу здійснювали з дотриманням стандартних процедур пробопідготовки, що гарантувало точність та відтворюваність результатів.

Малоновий діальдегід є одним з кінцевих продуктів перекисного окислення ліпідів і використовується як важливий маркер окислювального стресу в клітинах [23]. Підвищені рівні МДА свідчать про інтенсивне ушкодження клітинних мембран внаслідок дії активних форм кисню [22]. Він

реагує з тіобарбітуровою кислотою, утворюючи кольоровий комплекс (МДА-ТБК аддукт), інтенсивність забарвлення якого можна виміряти спектрофотометрично при довжині хвилі 532 нм.

Експериментальна процедура включала кілька ключових етапів, виконаних у послідовності без використання списків для кращого розуміння процесу. Спочатку відбирали 0,5 г зразків свіжого листя, які ретельно розтирали з 3 мл 0,1% (мас./об.) трихлороцтової кислоти (ТХК) у порцеляновій ступці. Цей етап забезпечував ефективне вивільнення МДА з клітинних структур рослинного матеріалу завдяки подрібненню та екстракції в присутності ТХК, яка осаджує білки та запобігає подальшому окисленню.

Отриману суміш переносили у пробірки та центрифугували при 5000 g протягом 15 хвилин. Центрифугування дозволяло відокремити рідку фазу (супернатант), що містить розчинений МДА, від твердих залишків рослинного матеріалу. Після цього відбирали 0,5 мл супернатанту та переносили його у чисту пробірку для подальшої реакції з тіобарбітуровою кислотою.

До відібраного супернатанту додавали 3 мл 20% розчину ТХК, що містить 0,5% тіобарбітурової кислоти. Суміш ретельно перемішували, забезпечуючи повну взаємодію МДА з ТБК. Пробірки з реакційною сумішшю нагрівали на водяній бані при температурі 95°C протягом 30 хвилин. Нагрівання сприяло утворенню МДА-ТБК комплексу з характерним рожевим забарвленням, яке є пропорційним до кількості МДА в зразку.

Після інкубації пробірки швидко охолоджували на водяній бані з льодом до кімнатної температури, щоб зупинити реакцію та стабілізувати утворений комплекс. Для видалення осаду суміш знову центрифугували при 5000 g протягом 10 хвилин.

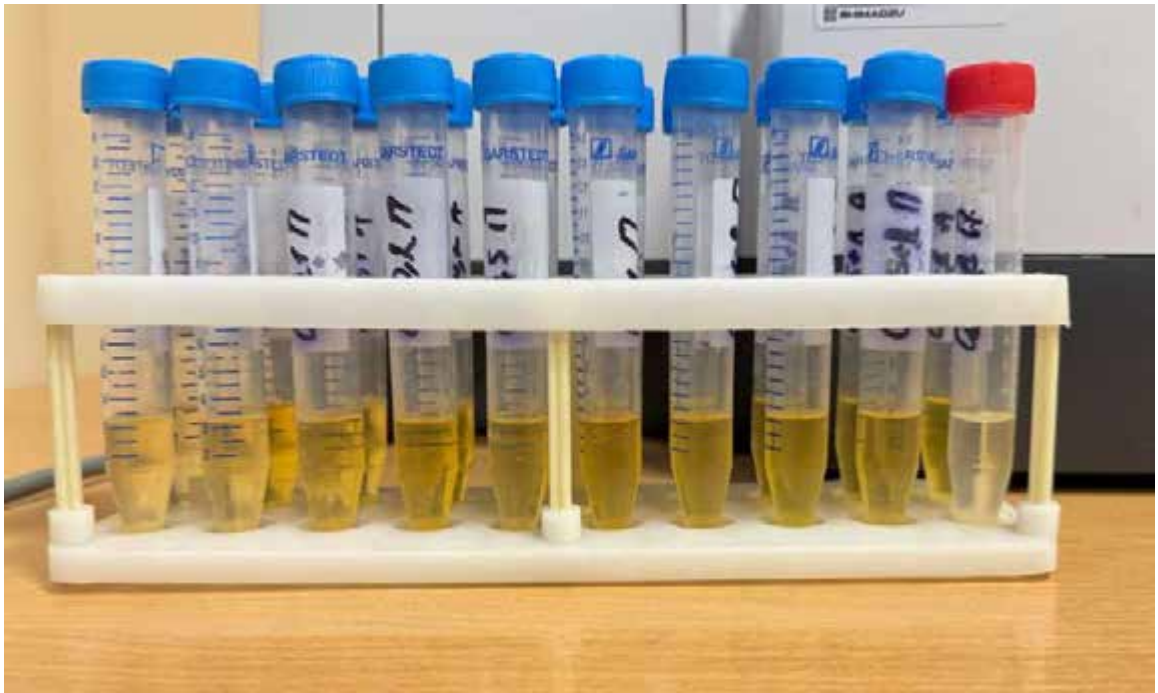


Рис. 2.6 Готові пробірки з сумішшю для оптичного вимірювання

Оптичну густину прозорого надосадового розчину вимірювали за допомогою спектрофотометра при довжинах хвиль 532 нм та 600 нм. Вимірювання при 532 нм відповідає максимальному поглинанню МДА-ТБК комплексу, тоді як значення при 600 нм використовували для корекції можливого фоново розсіяння світла та впливу інтерферуючих речовин. Концентрацію МДА у досліджуваних зразках обчислювали за формулою:

$$C = \frac{(A_{532} - A_{600})}{\epsilon \times l} \times \frac{V}{m}; \quad (2.2)$$

де:

- A_{532} та A_{600} — оптичні густини при довжинах хвиль 532 нм і 600 нм відповідно;
- ϵ — молярний коефіцієнт екстинкції МДА-ТБК комплексу (становить $155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$);
- l — довжина оптичного шляху кювети (звичайно 1 см);
- V — загальний об'єм реакційної суміші (мл);
- m — маса зразка (г).

2.6 Статистична обробка отриманих результатів

Отримані результати морфометричної оцінки, визначення загального вмісту фенольних сполук та рівнів малонового діальдегіду (МДА), та активності каталази проводили за допомогою «ANOVA» та програми Excel 2024. Обраховували коефіцієнт кореляції Пірсона, однофакторний та багатофакторний дисперсійний аналіз, стандартну похибку та відхилення.

Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Вплив фулерену C₆₀ та його дії з біопрепаратом на морфометричні показники *Triticum aestivum*

Через чотирнадцять днів після пророщування пшениці ми провели морфометричний аналіз сіянців сортів Актер та Патрас, щоб оцінити вплив фулерену C₆₀ в діапазоні концентрацій 0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл, 1 мкг/мл та його комбінації з біопрепаратом з концентрацією 200 мкл/мл на ріст і розвиток рослин. Ми розраховували середні значення довжини пагонів, коренів, загальної висоти та сирої маси для кожного зразка (див. Таблиці 3.1 та 3.2). На основі цих даних були побудовані графіки, які ілюструють зміни параметрів росту на 14-й день після пророщування для кожного сорту (Рис. 3.1–3.4).

Таблиця 3.1

Довжина пагонів, коріння, загальна висота та сира маса паростків сорту Актер у контролі та після обробки C₆₀ фулерену і біопрепарату на 14 день після посіву

№	Проба	Довж. пагонів, мм	Довж. коріння, мм	Заг. висота, мм	Сира маса, г
1	Контроль	30,36±3,93	57,96±4,23	108,8±2,07	0,22±0,01
2	Біопрепарат	27,37±3,48	78,37±1,62	68,95±3,56	0,19±0,04
3	C ₆₀ 0,1	31,66±5,53	62,26±5,61	114,3±3,63	0,23±0,10
4	C ₆₀ 0,2	38,75±2,81	74,15±0,91	131,55±3,41	0,25±0,03
5	C ₆₀ 0,5	38,87±3,42	40,47±4,02	134,35±4,56	0,25±0,06
6	C ₆₀ 1	38,8±2,29	57,8±3,43	109,7±1,79	0,24±0,05
7	C ₆₀ 0,1 + Б	32,02±2,49	66,22±1,99	82±0,53	0,2±0,08
8	C ₆₀ 0,2 + Б	34±2,54	69,8±0,58	109±3,42	0,24±0,05
9	C ₆₀ 0,5 + Б	44±2,24	69,2±3,12	113,4±4,06	0,28±0,03
10	C ₆₀ 1 + Б	35,46±2,37	46,66±4,19	103,2±2,73	0,23±0,05

У пшениці сорту Актер встановлено, що обробка фулереном C₆₀ та його комбінації з додатковим біопрепаратом впливають на ріст і розвиток рослин залежно від концентрації. Середня довжина пагонів при використанні фулерену C₆₀ коливалася в межах від 31,66 мм до 38,8 мм, що є дещо вищим показником порівняно з контролем (30,36 мм). Комбіноване застосування C₆₀ з біопрепаратом

також забезпечило оптимальні показники росту пагонів, особливо при концентрації 0,5 мкг/мл, де середня довжина досягла 44 мм.

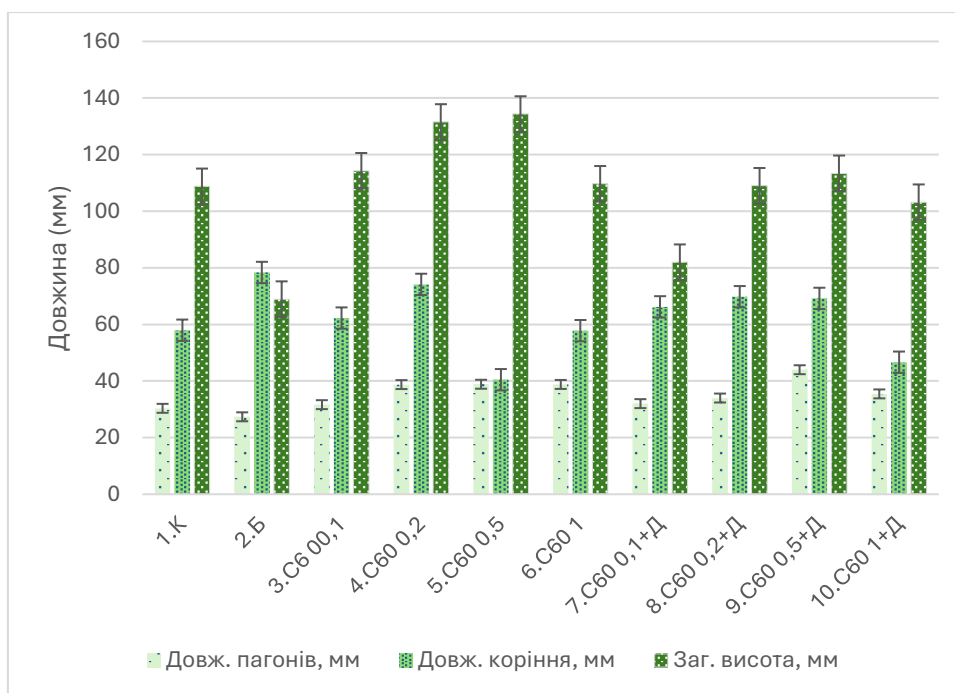


Рис. 3.1 Морфометричні показники (Довжина пагонів, довжина коріння і загальна висота рослин) пшениці сорту Актер у контролі та після обробки С60 фулерену і біопрепарату на 14 день після посіву

При обробці лише біопрепаратом спостерігалось помітне скорочення довжини пагонів до 27,37 мм, що може свідчити про можливий стресовий вплив на сорт Актер. Фулерен С₆₀ у концентраціях 0,1 та 1 мкг/мл не виявив суттєвого впливу на довжину пагонів, коренів та загальну висоту рослин у порівнянні з контрольною групою. Найбільш виражений стимулюючий ефект на ріст надземної маси спостерігався при концентрації 0,2 мкг/мл, де загальна висота рослин склала 131,55 мм, що значно вище порівняно з контрольними зразками.

При концентрації фулерену 0,5 мкг/мл відзначено зменшення довжини коренів до 40,47 мм, що може вказувати на негативний вплив фулерену на розвиток кореневої системи.

Комбінована обробка фулереном С₆₀ з біопрепаратом сорту Актер продемонструвало цікаві результати щодо впливу на ріст і розвиток рослин, забезпечуючи збалансований ефект на довжину пагонів і коренів. Наприклад, при

концентрації фулерену C_{60} 0,1 мкг/мл у поєднанні з біопрепаратом середня довжина пагонів склала 32,02 мм, що є трохи вищим, ніж у контрольній групі (30,36 мм). Довжина коренів при цьому була 66,22 мм, що також перевищує контрольний показник у 57,96 мм, демонструючи сприятливий вплив комбінованої обробки на розвиток кореневої системи.

Найбільший ефект комбінована обробка фулерену C_{60} з біопрепаратом показало при концентрації 0,5 мкг/мл, де довжина пагонів досягала 44 мм, а коренів — 62,9 мм, що є значним покращенням у порівнянні з контрольними зразками. Загальна висота рослин при такому поєднанні становила 114,13 мм, що свідчить про гармонійний ріст рослин.

Водночас, при концентрації C_{60} 1 мкг/мл у поєднанні з біопрепаратом загальна висота рослин дещо знизилася до 106,3 мм порівняно з 108,8 мм у контролі, що може бути пов'язано з пригніченням активності росту надземної частини або потенційним зниженням фотосинтетичної ефективності на більш високих концентраціях.

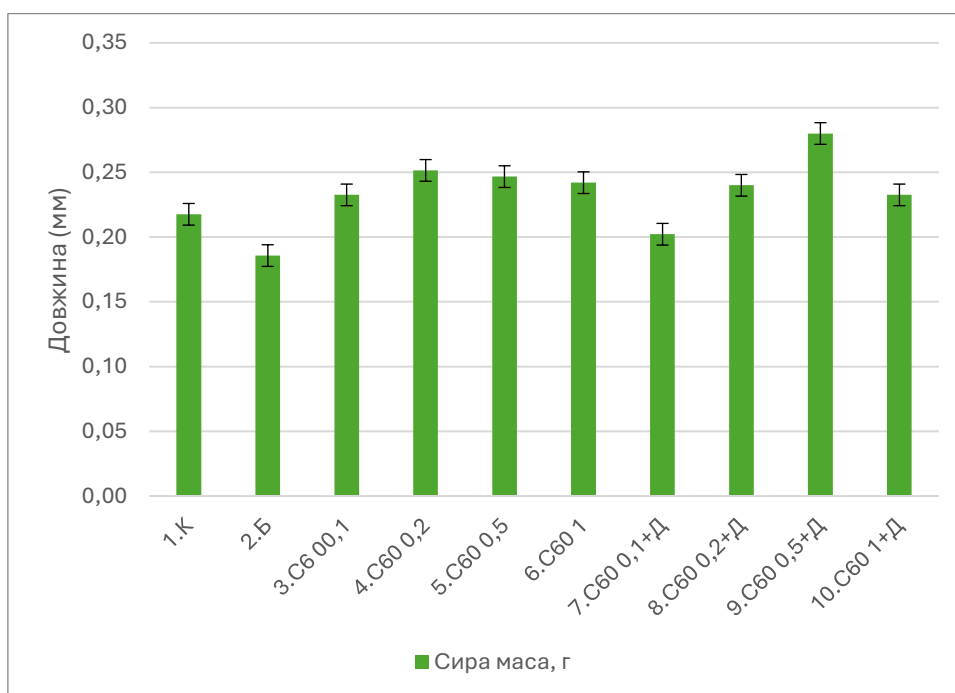


Рис. 3.2 Вага сирі маси пшениці сорту Актер у контролі та після обробки C_{60} фулерену і біопрепарату на 14 день після посіву

Щодо сирії маси, то обробка фулереном C₆₀ та його комбінація з біопрепаратом не спричинили значних змін у сорті Актер. Середні показники сирії маси залишалися на рівні контрольних значень (0,22 г). Лише у зразках проби пшениці з біопрепаратом та фулерену 0,1 наявне помірне зменшення сирії маси (0,170 ± 0,01 г)

Таблиця 3.2

Довжина пагонів, коріння, загальна висота та сира маса паростків пшениці сорту Патрас у контролі та після обробки C₆₀ фулерену і біопрепарату на 14 день після посіву

№	Проба	Довж. пагонів, мм	Довж. коріння, мм	Заг. висота, мм	Сира маса, г
1	Контроль	32,16±2,66	54,36±2,66	88±2,66	0,18±0,02
2	Біопрепарат	28,77±3,23	38,97±3,23	70,25±3,23	0,21±0,06
3	C ₆₀ 0,1	29,46±3,96	61,06±3,96	116,4±3,96	0,24±0,08
4	C ₆₀ 0,2	25,35±1,94	61,55±1,94	122,75±1,94	0,27±0,05
5	C ₆₀ 0,5	33,47±2,53	60,67±2,53	110,95±2,53	0,25±0,02
6	C ₆₀ 1	33±1,28	52,4±1,28	107,9±1,28	0,22±0,05
7	C ₆₀ 0,1 + Б	32,22±2,75	69,22±2,75	70,2±2,75	0,26±0,04
8	C ₆₀ 0,2 + Б	34,4±1,82	85±1,82	85,6±1,82	0,29±0,01
9	C ₆₀ 0,5 + Б	37,4±1,77	48,8±1,77	104,9±1,77	0,3±0,05
10	C ₆₀ 1 + Б	30,26±2,12	65,26±2,12	90,2±2,12	0,26±0,06

У сорті Патрас вплив фулерену C₆₀ та його комбінаціями з біопрепаратом демонструє різноманітні ефекти на ріст пагонів, коренів та загальну висоту рослин, залежно від концентрації. Контрольні рослини мали середню довжину пагонів 32,16 мм, довжину коренів 54,36 мм і загальну висоту 88 мм. Сира маса в контрольній групі становила 0,18 г, що є базовим показником для порівняння впливу інших обробок.

За окремої дії біопрепарату спостерігалось зменшення довжини пагонів (28,77 мм) і коренів (38,97 мм), що, ймовірно, пов'язано з недостатньою адаптацією рослин до передпосівної обробки насіння. Хоча загальна висота знизилася до 70,25 мм, сира маса збільшилася до 0,21 г, що свідчить про

зростання біомаси за рахунок збільшення водоутримуючої здатності тканин, але без покращення загального розвитку надземної та кореневої частин.

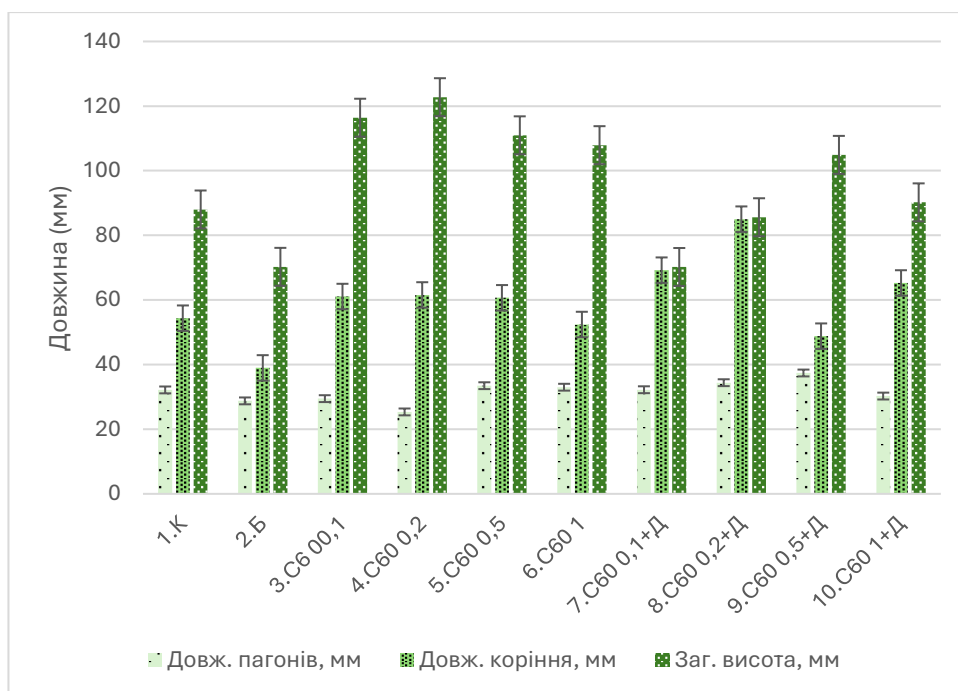


Рис. 3.3 Морфометричні показники (Довжина пагонів, довжина коріння і загальна висота рослини) у мм пшениці сорту Патрас у контролі та після обробки С60 фулерену і біопрепарату на 14 день після посіву

Після дії фулерену С₆₀ за концентрації 0,1 мкг/мл довжина пагонів та коренів становила 29,46 мм і 61,06 мм відповідно, що є меншим за контрольні показники. Проте загальна висота рослин значно зросла до 116,4 мм, що вказує на позитивний вплив цієї концентрації фулерену С₆₀ на ріст надземної частини. Сира маса при цьому залишалася на рівні 0,2 г, що є дещо вищим від контрольних показників.

При концентрації С₆₀ 0,2 мкг/мл спостерігалось деяке зниження довжини пагонів до 25,35 мм, що може свідчити про стресову реакцію рослин. Проте довжина коренів залишалася високою (61,65 мм), а загальна висота сягала 116,2 мм, що свідчить про покращення росту кореневої системи. Це підкреслює, що в даній концентрації фулерен С₆₀ може стимулювати ріст коренів, водночас пригнічуючи розвиток пагонів.

Найбільш сприятливим ефектом для сорту Патрас характеризувалася концентрація C_{60} у 0,5 мкг/мл. Довжина пагонів і коренів досягала 33,47 мм і 60,67 мм, що є оптимальними показниками для цього сорту. Загальна висота становила 110,95 мм, а сира маса досягала 0,25 г, що значно перевищує контрольні значення і свідчить про стимулюючий вплив цієї концентрації на ріст надземної частини та кореневої системи.

Комбіноване використання фулерену C_{60} з біопрепаратом також показало стабільні результати, але концентраційно залежного характеру. Наприклад, при концентрації 0,1 мкг/мл з біопрепаратом довжина пагонів становила 32,22 мм, а довжина коренів - 69,22 мм, що є покращенням у порівнянні з контрольними зразками. Загальна висота склала 101,74 мм, що трохи нижче, ніж при застосуванні лише фулерену, але все ж значно перевищує контрольні показники. Це свідчить про сприятливий ефект комбінованої обробки на розвиток рослин у помірних концентраціях.

При комбінації C_{60} з біопрепаратом у концентрації 0,2 мкг/мл довжина пагонів була найбільшою (34,4 мм), довжина коренів — 51,4 мм, а загальна висота досягала 85,6 мм, що свідчить про гармонійний розвиток обох частин рослини.

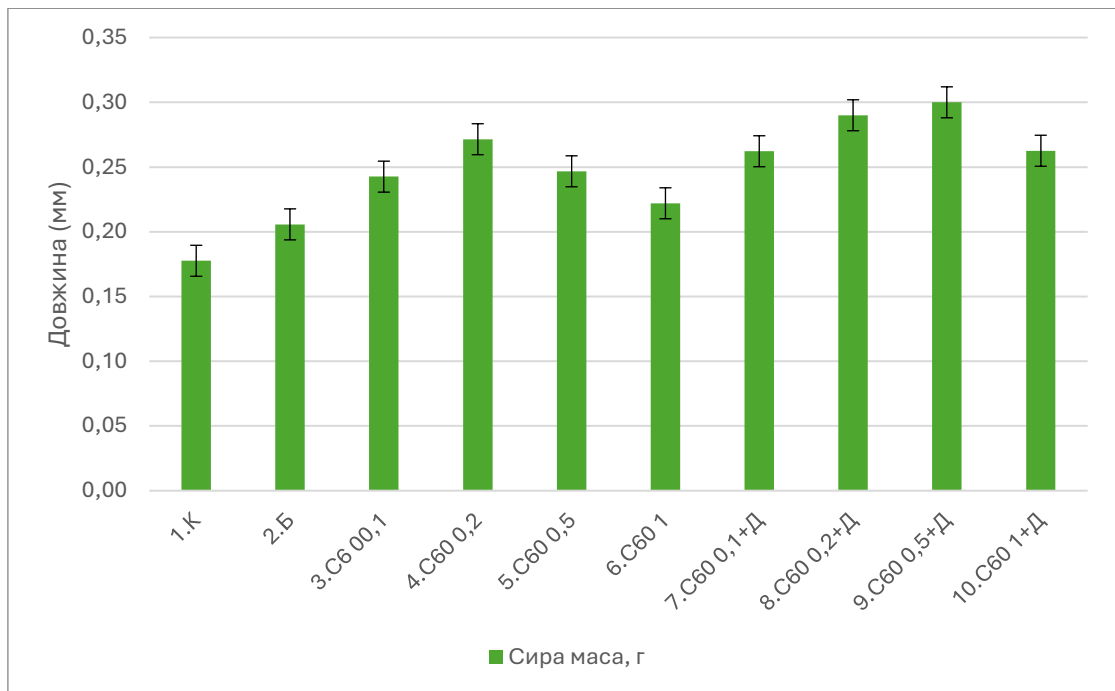


Рис. 3.4 Вага сирі́ї маси пшениці сорту Патрас у контролі та після обробки С60 фулерену і біопрепарату на 14 день після посіву

Щодо сирі́ї маси у сорті Патрас, при концентрації фулерену С₆₀ 0,1 мкг/мл у поєднанні з біопрепаратом сира маса рослин склала 0,26 г, що значно перевищує контрольне значення (0,18 г) і показник для рослин, оброблених лише фулереном на цій же концентрації (0,2 г). Це вказує на синергетичний ефект біопрепарату з фулереном, який сприяє накопиченню біомаси.

Комбінація фулерену С₆₀ з біопрепаратом при концентрації 0,2 мкг/мл сира маса склала 0,25 г, що є вищим порівняно з контролем (0,18 г) і пробою лише з біопрепаратом (0,21 г). Ця комбінація забезпечила оптимальне співвідношення між ростом пагонів і кореневої системи, що сприяло збільшенню загальної біомаси.

При вищих концентраціях, таких як 0,5 мкг/мл і 1 мкг/мл, у поєднанні з біопрепаратом, сира маса залишалася на рівні 0,24-0,26 г, що також перевищує контрольні показники. Таким чином, комбіноване застосування фулерену С₆₀ з біопрепаратом у всіх досліджуваних концентраціях позитивно вплинуло на сирій вміст маси рослин сорту Патрас, забезпечуючи збільшення біомаси і

стимулюючи ріст. Це вказує на те, що таке поєднання може бути ефективним методом для підвищення продуктивності цього сорту.

У сорту Актер найкращі результати по довжині пагонів і загальній висоті рослин спостерігалися при концентрації фулерену C_{60} 0,2 мкг/мл, тоді як у сорту Патрас оптимальні показники спостерігалися при концентрації 0,5 мкг/мл. Це свідчить про те, що сорт Патрас краще реагує на вищі концентрації фулерену, тоді як Актер демонструє позитивні ефекти при менших дозах.

Крім того, в обох сортах комбіноване використання фулерену C_{60} з біопрепаратом показало позитивний вплив на розвиток рослин, але сорт Патрас виявився більш чутливим до комбінованої обробки, що видно з показників загальної висоти і довжини коренів, особливо при концентраціях 0,1 та 0,2 мкг/мл.

Обидва сорти позитивно реагують на комбіновану обробку фулереном C_{60} з біопрепаратом, що сприяє гармонійному розвитку надземної і підземної частин рослин. Це свідчить про потенціал використання фулерену як стимулятора росту у сільському господарстві, зокрема для підвищення біомаси та покращення розвитку кореневої системи.

3.2 Вміст МДА у *Triticum aestivum* після дії фулерену C_{60} та його комбінованої дії з біопрепаратом

Малоновий діальдегід (МДА) є важливим показником рівня перекисного окислення ліпідів у клітинах, що виникає внаслідок дії активних форм кисню (АФК) на мембрани клітин. Накопичення МДА зазвичай вказує на підвищення оксидативного стресу, який може призводити до пошкодження клітинних структур та впливати на життєдіяльність рослин.

На основі результатів аналізу вмісту МДА для сорту Актер (Табл. 3.2) та сорту Патрас (Табл. 3.3) можна оцінити рівень окислювального стресу в клітинах та адаптацію пшениці на дію фулерену C_{60} та його комбінованої дії з біопрепаратом. Вищий рівень МДА може свідчити про більшу чутливість рослин

до оксидативного стресу або про активні процеси захисної реакції, спрямованої на відновлення пошкоджених структур.

Таблиця 3.3

Вміст МДА (мкмоль/г) у зразках пшениці сорту Актер на 14 день експерименту після обробки фулереном C₆₀ та його комбінованої дії з біопрепаратом

№	Дослідна проба	C, мкмоль/г	Серед-ньокв. відх., σ
1	Контроль	3,24±0,01	0,11
2	Біопрепарат	4,27±0,17	0,41
3	C ₆₀ 0,1 мкг/мл	6,12±0,08	0,28
4	C ₆₀ 0,2 мкг/мл	5,69±0,02	0,15
5	C ₆₀ 0,5 мкг/мл	7,32±0,04	0,19
6	C ₆₀ 1 мкг/мл	6,55±0,17	0,41
7	C ₆₀ 0,1 мкг/мл + Б	4,57±0,02	0,15
8	C ₆₀ 0,2 мкг/мл + Б	5,22±0,17	0,41
9	C ₆₀ 0,5 мкг/мл + Б	4,83±0,04	0,19
10	C ₆₀ 1 мкг/мл + Б	6,74±0,42	0,64

За результатами спектрометричного вимірювання для пшениці сорту Актер (Табл. 3.3) у контрольній пробі вміст МДА був на рівні 3,24±0,01 мкмоль/г). В той же час у дослідній пробі за обробки біопрепаратом спостерігається збільшення концентрації МДА на 30% (4,27±0,17 мкмоль/г), що може вказувати на пошкодження клітинних мембран через активність вільних радикалів.

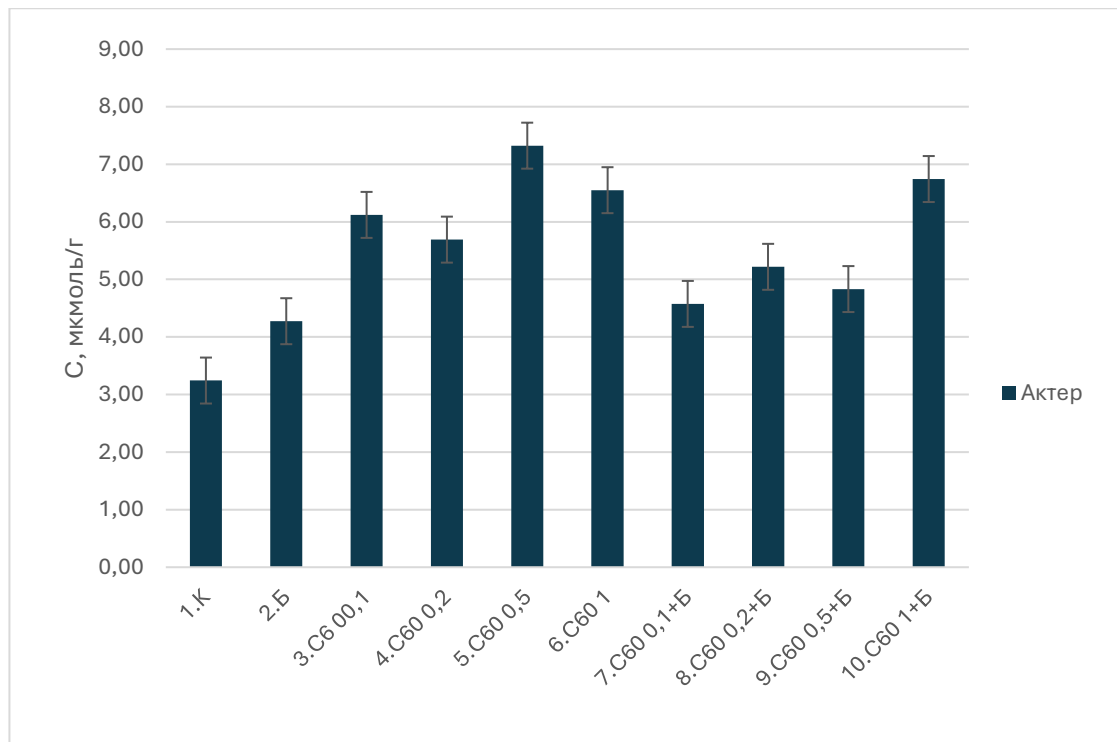


Рис. 3.5 Вміст МДА мкмоль/г у зразках пшениці сорту Актер на 14 день експерименту після обробки фулереном С60 та його комбінованої дії з біопрепаратом

Значне збільшення вмісту МДА спостерігалось у пробах № 3-6 з концентрацією фулерену С₆₀ 0,2-1 мкг/мл, що значно перевищує контрольні значення і може вказувати на викликання оксидативного стресу або індукцію захисних механізмів внаслідок впливу наночастинок. Максимальне значення МДА ($7,32 \pm 0,04$ мкмоль/г) спостерігається у пробі №5 за дії фулерену С₆₀ при концентрації 0,5 мкг/мл, що вказує на посилений оксидативний стрес у рослин. Дослідні проби з комбінованим впливом фулерену С₆₀ і біопрепарату (№7–10) демонструють загалом нижчі рівні МДА порівняно з пробами, де використовувався лише фулерен. Так, у пробі №7 (концентрація 0,1 мкг/мл + біопрепарат) рівень МДА знижується до $4,57 \pm 0,02$ мкмоль/г, що свідчить про можливий антиоксидантний ефект комплексного впливу, який зменшує оксидативний стрес.

У пробах №8 і №9 (концентрації 0,2 та 0,5 мкг/мл з біопрепаратом відповідно) рівень МДА також є нижчим, ніж у відповідних пробах без біопрепарату, спостерігається тенденція до зниження рівня МДА при комбінованому використанні біопрепарату та фулерену. Найвищий рівень МДА в групі з комбінованою дією ($6,74 \pm 0,42$ мкмоль/г) спостерігається у пробі №10 з концентрацією фулерену 1 мкг/мл, але навіть цей показник нижчий за рівень МДА у пробах з аналогічною концентрацією фулерену без додавання біопрепарату, що може бути причиною стабілізаційного впливу біопрепарату в комбінованій дії з фулереном на метаболічні процеси.

Таким чином, комбіноване використання фулерену C_{60} і біопрепарату сприяє зниженню рівня оксидативного стресу у пшениці порівняно з застосуванням лише фулерену, що може бути корисним для підвищення стійкості рослин до стресових факторів.

Таблиця 3.4

Результати обрахунку вмісту МДА (С) у зразках пшениці сорту Патрас на 14 день експерименту після обробки фулереном C_{60} та його комбінованої дії з біопрепаратом

№	Дослідна проба	С, мкмоль/г	Серед-ньокв. відх., σ
1	Контроль	$3,11 \pm 0,08$	0,28
2	Біопрепарат	$3,37 \pm 0,02$	0,15
3	C_{60} 0,1 мкг/мл	$5,18 \pm 0,02$	0,15
4	C_{60} 0,2 мкг/мл	$4,6 \pm 0,98$	0,99
5	C_{60} 0,5 мкг/мл	$5,58 \pm 0,03$	0,17
6	C_{60} 1 мкг/мл	$6,81 \pm 0,13$	0,37
7	C_{60} 0,1 мкг/мл + Б	$3,91 \pm 0,03$	0,17
8	C_{60} 0,2 мкг/мл + Б	$5,63 \pm 0,15$	0,39
9	C_{60} 0,5 мкг/мл + Б	$4,23 \pm 0,02$	0,15
10	C_{60} 1 мкг/мл + Б	$5,35 \pm 0,17$	0,41

За результатами спектрометричного аналізу вмісту малонового діальдегіду у дослідних зразках пшениці сорту Патрас (Табл. 3.4) виявлено цікаві

особливості у відповідях рослин на вплив різних концентрацій фулерену C₆₀ та комбінованого впливу з біопрепаратом.

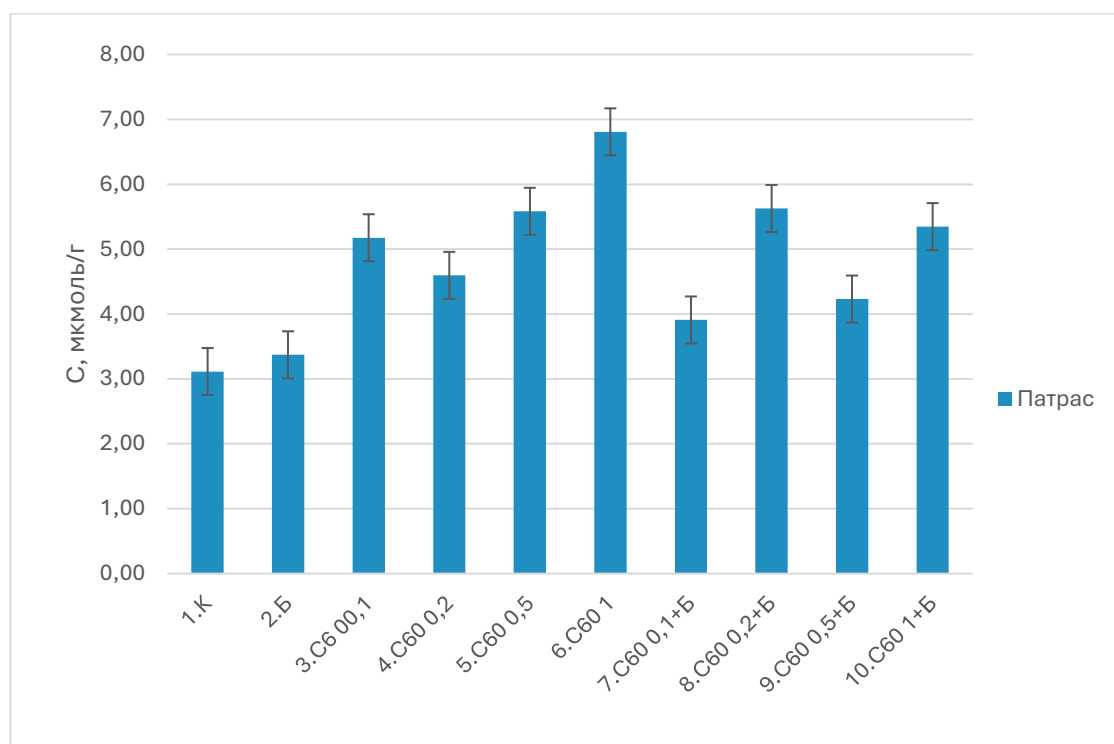


Рис. 3.6 Вміст МДА мкмоль/г у зразках пшениці сорту Патрас

Контрольна проба має рівень МДА $3,11 \pm 0,08$ мкмоль/г, який використовувався як база для порівняння з іншими експериментальними групами. У пробі №2 з біопрепаратом значення МДА підвищується до $3,37 \pm 0,02$ мкмоль/г, що свідчить про стимуляцію рослинного метаболізму без значного оксидативного стресу, на відміну від сорту Актер, де біопрепарат викликав більший стрес.

У пробах з низькою концентрацією фулерену (0,1 мкг/мл, проба №3) рівень МДА підвищується до $5,18 \pm 0,08$ мкмоль/г, що свідчить про активацію стресової реакції, однак, на відміну від сорту Актер, де відбувається сильний адаптаційний стрес, у сорту Патрас збільшення вмісту МДА є менш інтенсивним, що може бути пов'язане з кращою здатністю до адаптації. Підвищення концентрації фулерену до 0,2 мкг/мл (проба №4) призводить до подальшого збільшення рівня

МДА до $4,6 \pm 0,98$ мкмоль/г, що вказує на активацію захисних механізмів рослини.

Максимальний вміст МДА, для сорту Патрас був зафіксований у пробі №6 ($6,81 \pm 0,13$ мкмоль/г) при концентрації фулерену C_{60} 1 мкг/мл. Це значення суттєво перевищує контрольну пробу для даного сорту, що свідчить про розвиток значного окисного стресу в клітинах. Зменшення концентрації фулерену до 0,5 мкг/мл (проба №5) призвело до зниження рівня МДА до $5,58 \pm 0,03$ мкмоль/г, що вказує на послаблення окисного стресу. Це підвищення рівня МДА з ростом концентрації фулерену вказує на негативний вплив більш високих доз C_{60} на клітинні мембрани, що може бути наслідком активації процесів перекисного окиснення ліпідів.

Досліди з комбінованим впливом фулерену C_{60} і біопрепарату показують загалом нижчі значення МДА, що може свідчити про компенсаторний ефект. У пробі №7 (0,1 мкг/мл + біопрепарат) рівень МДА знижується до $3,91 \pm 0,03$ мкмоль/г, а в пробі №8 (0,2 мкг/мл + біопрепарат) спостерігається найбільше зниження рівня МДА до $5,63 \pm 0,15$ мкмоль/г, що може бути пов'язано з покращенням адаптивних можливостей рослин і зниженням оксидативного стресу внаслідок комбінованої дії.

Загалом, найбільш оптимальним є використання комбінованої дози фулерену C_{60} з біопрепаратом у концентрації 0,2 мкг/мл для підтримання стійкості та зниження оксидативного стресу у сорту Патрас, що підтверджується найнижчим рівнем МДА.

3.3 Вміст фенольних сполук у *Triticum aestivum* після дії фулерену C_{60} та його комбінованої дії з біопрепаратом

Фенольні сполуки є важливими антиоксидантами в рослинах і виконують низку функцій: вони беруть участь у захисті від оксидативного стресу, викликаного активними формами кисню, зокрема під впливом зовнішніх стресорів. [34]. Під впливом наноматеріалів рослина може змінювати активність антиоксидантних ферментів і синтез вторинних метаболітів, таких як фенольні

кислоти, що мають важливу роль у нейтралізації АФК та захисті клітин від окислювальних пошкоджень [20]. Наприклад, у разі стресу, викликаного високими концентраціями ВНМ, активується шлях фенілпропаноїдів, який є ключовим для синтезу біологічно активних фенолів, включаючи кверцетин та інші флавоноїди [37].

Антиоксидантні властивості фенольних сполук забезпечують захист клітинних мембран та білків від ушкоджень, які можуть бути спричинені оксидативним стресом, індукованим високими концентраціями ВНМ [36]. Окрім того, фенольні сполуки мають бактерицидні та фунгіцидні властивості, що підвищує стійкість рослин до патогенів і є корисним для поліпшення якості продуктів, отриманих з рослинних екстрактів. Виявлено, що механізми дії ВНМ залежать від розміру частинок, типу рослин та умов росту, що ускладнює прогнозування їх впливу. У медичних рослинах, як, наприклад, *Salvia verticillata*, під впливом нанотрубок суттєво зростає вміст фенольних кислот, що свідчить про можливість регуляції біосинтезу фармакологічно активних сполук [35].

Таблиця 3.5

Вміст фенольних сполук (мг/г) у зразках пшениці сорту Актер на 14 день експерименту після обробки фулереном C₆₀ та його комбінованої дії з біопрепаратом

№	Дослідна проба	C, мг/г	Серед-ньокв. відх., σ
1	Контроль	14,07±0,14	0,37
2	Біопрепарат	29,07±2,78	1,67
3	C ₆₀ 0,1 мкг/мл	23,33±0,86	0,93
4	C ₆₀ 0,2 мкг/мл	21,3±2,78	1,67
5	C ₆₀ 0,5 мкг/мл	30,93±0,86	0,93
6	C ₆₀ 1 мкг/мл	22,22±0,03	0,19
7	C ₆₀ 0,1 мкг/мл + Б	22,59±0,31	0,56
8	C ₆₀ 0,2 мкг/мл + Б	37,04±2,78	1,67
9	C ₆₀ 0,5 мкг/мл + Б	74,07±1,68	1,30
10	C ₆₀ 1 мкг/мл + Б	60,37±0,14	0,37

Відповідно до даних таблиці, вплив фулерену C_{60} на вміст фенольних сполук у зразках пшениці сорту Актер показує різноманітні реакції залежно від концентрації та комбінованого впливу з біопрепаратом.

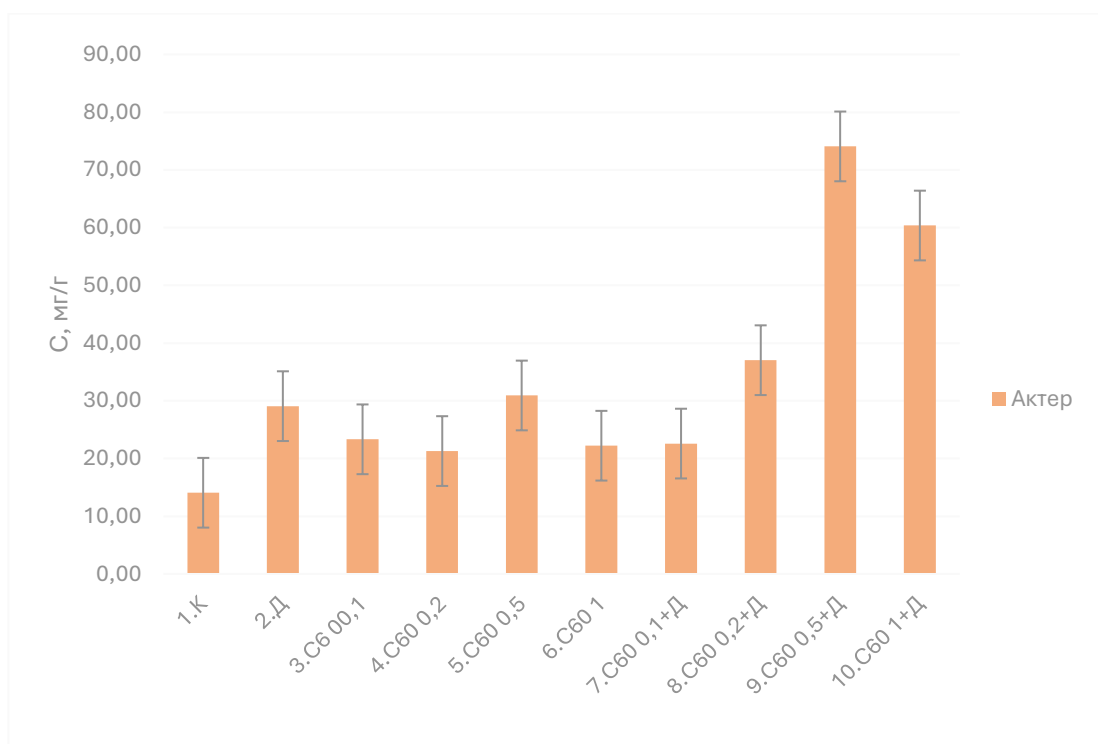


Рис. 3.7 Вміст фенольних сполук мг/г у зразках пшениці сорту Актер на 14 день експерименту після обробки фулереном C_{60} та його комбінованої дії з біопрепаратом

У контрольній пробі (№1) вміст фенольних сполук становить $14,07 \pm 0,14$ мг/г, що відображає базовий рівень без додаткових стимулюючих факторів. Додавання біопрепарату (проба №2) спричиняє зростання вмісту фенольних сполук до $29,07 \pm 2,78$ мг/г, що більш ніж удвічі перевищує контрольне значення. Це підвищення може бути пояснено активізацією метаболізму рослин у відповідь на стимуляцію біопрепаратом, що викликає збільшення антиоксидантного потенціалу.

При застосуванні фулерену C_{60} в низькій концентрації 0,1 мкг/мл (проба №3) рівень фенольних сполук підвищується до $23,33 \pm 0,86$ мг/г. Цей результат свідчить про те, що низькі концентрації фулерену можуть виконувати роль слабого стресора, що активує антиоксидантний захист, спричиняючи синтез

фенольних сполук. Фенольні сполуки нейтралізують активні форми кисню, які утворюються під впливом фулерену та відіграють роль сигнальних молекул у захисних реакціях.

При концентрації фулерену 0,2 мкг/мл (проба №4) спостерігається деяке зниження вмісту фенольних сполук до $21,3 \pm 2,78$ мг/г порівняно з пробєю №3.

Максимальний рівень фенольних сполук спостерігається у пробі №5 (0,5 мкг/мл), де вміст досягає $30,93 \pm 0,86$ мг/г. Це значення є найвищим серед усіх проб без біопрепарату і свідчить про інтенсивне накопичення фенольних сполук як захисної реакції на помірний стрес. Подібно до результатів, отриманих у дослідженнях з іншими вуглецевими наноматеріалами, такими як нанотрубки, помірні дози фулерену C_{60} можуть виступати як елісатори, що підвищують вміст фенолів у рослинах [1].

У пробі №6 (1 мкг/мл фулерену C_{60}) вміст фенольних сполук знижується до $22,22 \pm 0,03$ мг/г. Це зниження може вказувати на надмірний стрес або токсичну дію фулерену у високій концентрації, що пригнічує здатність рослини підтримувати високий рівень антиоксидантного захисту.

Комбіноване застосування фулерену C_{60} та біопрепарату в пробах №7–10 показує синергічний ефект, особливо при концентрації фулерену 0,5 мкг/мл. У пробі №7 (0,1 мкг/мл + біопрепарат) рівень фенольних сполук становить $22,59 \pm 0,31$ мг/г, що свідчить про стабілізацію антиоксидантного захисту за рахунок комбінації біопрепарату та фулерену.

У пробі №8 (0,2 мкг/мл + біопрепарат) вміст фенольних сполук підвищується до $37,04 \pm 2,78$ мг/г. Це свідчить про те, що комбінована дія фулерену з біопрепаратом стимулює накопичення фенольних сполук, забезпечуючи посилену антиоксидантну відповідь. У пробі №9 (0,5 мкг/мл + біопрепарат) рівень фенольних сполук досягає $74,07 \pm 1,68$ мг/г, що є максимальним значенням у цьому дослідженні. Такий високий вміст фенольних сполук свідчить про значний антиоксидантний захист і може бути зумовлений активацією ферментів, що беруть участь у синтезі фенолів.

У пробі №10 (1 мкг/мл + біопрепарат) рівень фенольних сполук знижується до $60,37 \pm 3,14$ мг/г, що є нижчим показником порівняно з пробою №9, але все ще значно перевищує контрольний рівень. Це вказує на те, що хоча високі концентрації фулерену можуть спричиняти токсичний ефект, біопрепарат частково компенсує цей вплив, дозволяючи рослинам зберігати високий рівень антиоксидантного захисту.

Таблиця 3.6

Результати обрахунку вмісту фенольних сполук (мг/г) у зразках пшениці сорту Патрас на 14 день експерименту після обробки фулереном C₆₀ та його комбінованої дії з біопрепаратом

№	Дослідна проба	C, мг/г	Серед-ньокв. відх., σ
1	Контроль	14,07±0,14	0,37
2	Біопрепарат	17,41±0,86	0,93
3	C ₆₀ 0,1 мкг/мл	13,15±0,86	0,93
4	C ₆₀ 0,2 мкг/мл	17,04±0	0,00
5	C ₆₀ 0,5 мкг/мл	29,44±0,03	0,19
6	C ₆₀ 1 мкг/мл	11,48±0,55	0,74
7	C ₆₀ 0,1 мкг/мл + Б	15,19±1,23	1,11
8	C ₆₀ 0,2 мкг/мл + Б	52,04±0,31	0,56
9	C ₆₀ 0,5 мкг/мл + Б	65,93±2,78	1,67
10	C ₆₀ 1 мкг/мл + Б	36,85±0,31	0,56

За результатами спектрометричного аналізу вмісту фенольних сполук у зразках пшениці сортів Патрас і Актер (Табл. 3.5 та Табл л. 3.6) спостерігаються цікаві відмінності в реакції цих сортів на вплив різних концентрацій фулерену C₆₀, а також на комбінований вплив фулерену з біопрепаратом.

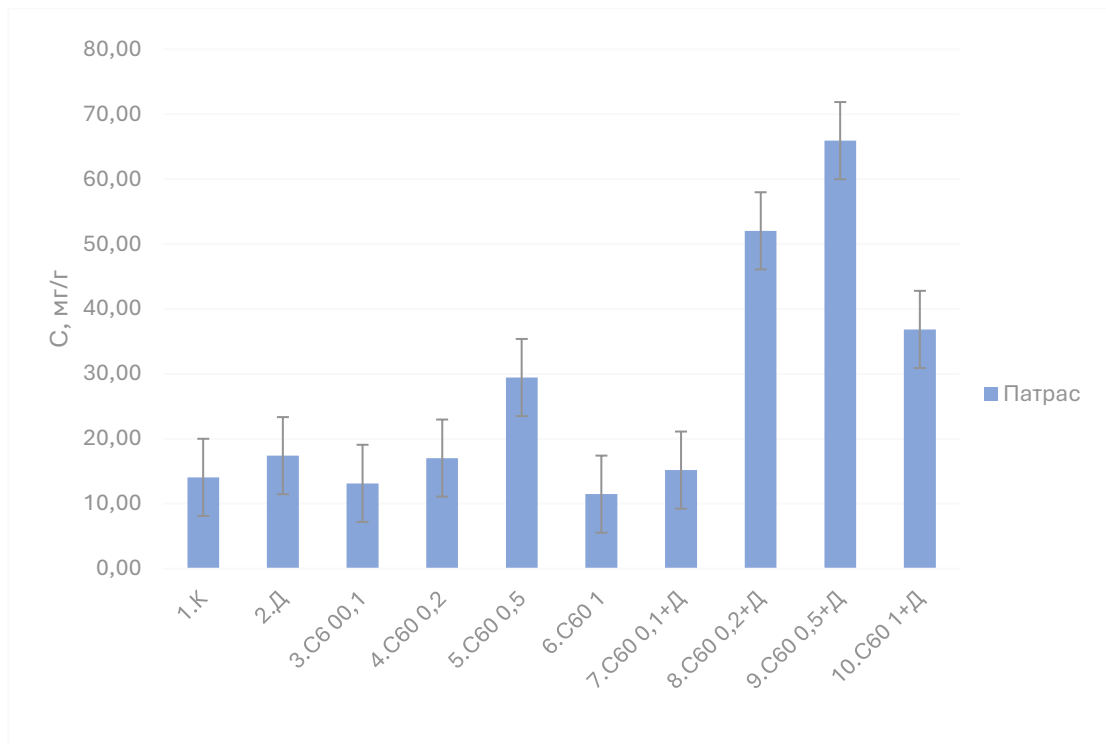


Рис. 3.8 Вміст фенольних сполук мг/г у зразках пшениці сорту Актер на 14 день експерименту після обробки фулереном С₆₀ та його комбінованої дії з біопрепаратом

У контрольній пробі для сорту Патрас рівень фенольних сполук становить $14,07 \pm 0,14$ мг/г, тоді як у сорту Актер контрольний рівень дещо вищий — $14,07 \pm 0,14$ мг/г. Це може свідчити про схожу базову антиоксидантну активність обох сортів за відсутності стресу.

У пробі з біопрепаратом (проба №2) для обох сортів спостерігається підвищення рівня фенольних сполук. У сорту Патрас вміст фенольних сполук зростає до $17,41 \pm 0,86$ мг/г, тоді як у сорту Актер цей показник досягає $29,07 \pm 2,78$ мг/г. Це свідчить про більш виражену реакцію сорту Актер на біопрепарат, можливо, через більшу чутливість до стимуляції метаболізму або оксидативного стресу.

При низькій концентрації фулерену С₆₀ (0,1 мкг/мл, проба №3) у сорту Патрас спостерігається зниження рівня фенольних сполук до $13,15 \pm 0,86$ мг/г, тоді як у сорту Актер аналогічна проба демонструє дещо вищий рівень — $23,33 \pm 0,86$ мг/г. Це вказує на різні адаптаційні можливості сортів, причому сорт

Актер, здається, краще відповідає на низькі дози фулерену, що може свідчити про його більшу стресостійкість.

При концентрації фулерену 0,2 мкг/мл (проба №4) рівень фенольних сполук у сорту Патрас підвищується до $17,04 \pm 0,6$ мг/г, що схоже на результат для біопрепарату, в той час як у сорту Актер рівень фенолів знову зростає до $21,3 \pm 2,78$ мг/г. Це свідчить про те, що сорт Актер має більш активну реакцію на середні концентрації фулерену, підвищуючи рівень антиоксидантів для захисту клітин.

Максимальний рівень фенольних сполук серед проб із тільки фулереном C_{60} спостерігається у пробі №5 з концентрацією 0,5 мкг/мл. Для сорту Патрас рівень фенольних сполук сягає $29,44 \pm 0,03$ мг/г, що є піковим значенням, вказуючи на значний оксидативний стрес і стимуляцію антиоксидантної системи. У сорту Актер при тій самій концентрації спостерігається дещо нижчий показник — $30,93 \pm 0,86$ мг/г, що може вказувати на граничну реакцію на фулерен C_{60} без значного стресу.

При високій концентрації фулерену (1 мкг/мл, проба №6) у сорту Патрас вміст фенольних сполук різко знижується до $11,48 \pm 0,55$ мг/г, що свідчить про токсичний ефект і надмірне навантаження на антиоксидантну систему. У сорту Актер аналогічна проба демонструє аналогічне зниження до $22,22 \pm 0,03$ мг/г, що вказує на кращу адаптивну реакцію сорту Актер на високі концентрації фулерену, навіть попри зниження рівня фенольних сполук.

Комбінований вплив фулерену та біопрепарату (проби №7–10) демонструє найбільш значні ефекти для обох сортів. Зокрема, при концентрації 0,2 мкг/мл + біопрепарат (проба №8) рівень фенольних сполук у сорту Патрас досягає $52,04 \pm 0,31$ мг/г, тоді як у сорту Актер він становить $37,04 \pm 2,78$ мг/г. Це вказує на синергічний ефект біопрепарату з фулереном, причому сорт Патрас виявляє більшу здатність до накопичення фенолів за цих умов.

Максимальний вміст фенольних сполук у цьому дослідженні спостерігається у пробі №9 (0,5 мкг/мл + біопрепарат). У сорту Патрас рівень фенолів досягає $65,93 \pm 2,78$ мг/г, тоді як у сорту Актер — $74,07 \pm 1,68$ мг/г. Це

свідчить про найбільшу антиоксидантну активність при середній концентрації фулерену та добриві для обох сортів, що підкреслює їхню здатність активно мобілізувати антиоксидантну систему.

Сорт Патрас показує найбільший вміст фенольних сполук при середній концентрації фулерену (0,5 мкг/мл) у комбінації з біопрепаратом, що підтверджує синергічний ефект цих компонентів. Однак, сорт Актер демонструє вищий загальний рівень фенольних сполук, що свідчить про його більшу стресостійкість і здатність до адаптації. Загалом, комбінація фулерену C₆₀ з біопрепаратом виявилася найефективнішою для обох сортів, особливо при концентрації 0,5 мкг/мл, забезпечуючи максимальну антиоксидантну реакцію та підвищуючи стійкість рослин до стресів.

З огляду на здатність ВНЧ стимулювати синтез фенольних сполук і підвищувати антиоксидантний потенціал рослин, вони мають великий потенціал для використання в агротехнологіях. Наприклад, їх можна застосовувати для обробки сільськогосподарських культур з метою збільшення вмісту корисних для здоров'я людини речовин і поліпшення якості продукції. Особливо перспективним є використання ВНЧ у боротьбі з хворобами рослин і покращенні стійкості до абіотичних стресових факторів.

Однак для широкомасштабного застосування потрібно провести подальші дослідження для визначення оптимальних доз і умов використання ВНЧ. Зокрема, важливо з'ясувати, які типи ВНЧ і в яких концентраціях найбільш ефективно сприяють підвищенню вмісту фенольних сполук без ризику для довкілля

ВИСНОВКИ

Було досліджено вплив фулерену C₆₀ у діапазоні концентрацій 0,1-1 мкг/мл та комбінованої дії з біопрепаратом яким «Актоверм» виробництва «БТУ-Центр», Україна, у концентрації 200 мкл/мл на морфометричні показники, вміст малонового діальдегіду (МДА) та фенольних сполук у проростках пшениці озимої сортів Актер та Патрас. Було показано, що фулерен C₆₀ у різних концентраціях з біопрепаратом та без біопрепарату суттєво впливає на морфометричні показники, рівень оксидативного стресу та вміст антиоксидантних сполук у проростках пшениці озимої сортів Актер і Патрас.

1. Максимальний стимулюючий ефект на ріст і розвиток сорту Актер фулереном у концентрації 0,2 мкг/мл, що призвело до значного збільшення довжини пагонів та загальної висоти рослин. Для сорту Патрас оптимальна концентрація фулерену становила 0,5 мкг/мл. Комбінована дія фулерену та біопрепарату продемонструвала синергічний ефект, забезпечивши найбільш збалансований ріст і розвиток обох сортів, особливо виражений у підвищенні біомаси сорту Патрас.

2. Збільшення концентрації фулерену призводило до підвищення рівня малонового діальдегіду, що свідчить про активацію антиоксидантного захисту рослин. Сорт Актер виявився більш чутливим до окисного стресу, індукованого фулереном, демонструючи максимальне накопичення МДА при концентрації 0,5 мкг/мл. Сорт Патрас виявив більшу стійкість до окисного стресу, проте при максимальній дослідженій концентрації фулерену (1 мкг/мл) також спостерігалось значне збільшення рівня МДА

3. Вміст фенольних сполук, природних антиоксидантів рослин, суттєво збільшувався під впливом фулерену та біопрепарату. Максимальне накопичення фенолів спостерігалось у сортів Актер та Патрас при концентрації фулерену 0,5 мкг/мл. Комбінація фулерену C₆₀ з біопрепаратом ще більше підсилювала цей ефект, особливо при концентраціях 0,2-0,5 мкг/мл, де синтез фенольних сполук досягав максимальних значень. Для сорту Патрас вміст фенолів при концентрації 0,5 мкг/мл із біопрепаратом був у декілька разів вищим, ніж у контрольних

зразках, що свідчить про значний антиоксидантний захист у таких умовах. Сорт Актер показав ще більший рівень фенольних сполук при аналогічній концентрації, що може вказувати на його кращу стресостійкість і здатність до адаптації.

У підсумку, фулерен C60 у помірних концентраціях у поєднанні з біопрепаратом ефективно стимулює ріст і розвиток пшениці озимої. З огляду на здатність ВНЧ стимулювати синтез фенольних сполук і підвищувати антиоксидантний потенціал рослин, вони мають великий потенціал для використання в агротехнологіях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sigala-Aguilar N. A., López M. G., Fernández-Luqueño F. Carbon-based nanomaterials as inducers of biocompounds in plants: Potential risks and perspectives. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2024. Vol. 212. P. 108753.
2. Liu F. et al. Facile and scalable fabrication engineering of fullereneol nanoparticles by improved alkaline-oxidation approach and its antioxidant potential in maize. *Journal of Nanoparticle Research*. 2016. Vol. 18, № 11.
3. Sharifi P. et al. Efficacy of multi-walled carbon nanotubes in regulating growth performance, total glutathione and redox state of *Calendula officinalis* L. cultivated on Pb and Cd polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Elsevier BV, 2021. Vol. 213. P. 112051–112051.
4. Xiong J.-L. et al. Fullerol improves seed germination, biomass accumulation, photosynthesis and antioxidant system in *Brassica napus* L. under water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2018. Vol. 129. P. 130–140.
5. Ali Shakouri Ganjavi et al. Glycine betaine functionalized graphene oxide as a new engineering nanoparticle lessens salt stress impacts in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*. Elsevier BV, 2021. Vol. 162. P. 14–26.
6. Sigala-Aguilar N.A., López M.G., Fernández-Luqueño F. Carbon-based nanomaterials as inducers of biocompounds in plants: Potential risks and perspectives. *Plant Physiology and Biochemistry*. Elsevier BV, 2024. Vol. 212. P. 108753.
7. Borišev M. et al. Drought Impact Is Alleviated in Sugar Beets (*Beta vulgaris* L.) by Foliar Application of Fullereneol Nanoparticles. *PLOS ONE* / ed. Ng C. 2016. Vol. 11, № 11. P. e0166248.
8. Shafiq F. et al. Fullereneol regulates oxidative stress and tissue ionic homeostasis in spring wheat to improve net-primary productivity under salt-stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 211. P. 111901.
9. Younes N.A., Dawood M.G., Wardany A.A. Biosafety assessment of graphene nanosheets on leaf ultrastructure, physiological and yield traits of *Capsicum annum*

L. and *Solanum melongena* L.. *Chemosphere. Elsevier BV*, 2019. Vol. 228. P. 318–327.

10. Samadi S. et al. Effect of carbon nanomaterials on cell toxicity, biomass production, nutritional and active compound accumulation in plants. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 21. P. 101323.

11. Hatami M., Hadian J., Ghorbanpour M. Mechanisms underlying toxicity and stimulatory role of single-walled carbon nanotubes in *Hyoscyamus niger* during drought stress simulated by polyethylene glycol. *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 324. P. 306–320.

12. Verma S.K. et al. Applications of carbon nanomaterials in the plant system: A perspective view on the pros and cons. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 667. P. 485–499.

13. McGehee D., Mahmood Alimohammadi, Mariya Khodakovskaya. Carbon-based nanomaterials as stimulators of production of pharmaceutically active alkaloids in cell culture of *Catharanthus roseus*. *Nanotechnology* . 2019. Vol. 30, № 27. P. 275102–275102.

14. Soraki R.K., Gerami M., Ramezani M. Effect of graphene / metal nanocomposites on the key genes involved in rosmarinic acid biosynthesis pathway and its accumulation in *Melissa officinalis*. *BMC Plant Biology. Springer Science and Business Media LLC*, 2021. Vol. 21, № 1. P. 306–320.

15. Sigala-Aguilar N.A., López M.G., Fernández-Luqueño F. Carbon-based nanomaterials as inducers of biocompounds in plants: Potential risks and perspectives. *Plant Physiology and Biochemistry. Elsevier BV*, 2024. Vol. 212. P. P. 27–38..

16. Rahmani, N., Radjabian, T., Soltani, B.M. Impacts of foliar exposure to multi-walled carbon nanotubes on physiological and molecular traits of *Salvia verticillata* L., as a medicinal plant. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2020. Vol. 150. P. 27–38.

17. Shafiq, F., Iqbal, M., Ali, M., Ashraf, M.A. "Fullerenol regulates oxidative stress and tissue ionic homeostasis in spring wheat to improve net-primary productivity under salt-stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 211. P. 68–72.

18. , L.M., Yaroshchuk, R.A., Kovalenko, I.M., Guz, O.I. Determination of the total content of phenolic compounds in the extract of leaves *Ginkgo biloba* L. *Scientific Works, Odessa National Academy of Food Technologies*. 2018. Vol. 82, Issue 2. P. 68–72.
19. Thazhenandayipurath, V.V., Mathew, J., Radhakrishnan, E.K. Nano-based biofertilizers for horticulture. *Environmental Technology and Innovation*. 2022. Vol. 23. P. 239–246
20. Blainski, A., Lopes, G., de Mello, J.C.P. Application and Analysis of the Folin Ciocalteu Method for the Determination of the Total Phenolic Content from *Limonium Brasiliense* L. *Molecules*. 2013. Vol. 18, № 6. P. 6852–6865.
21. I. Hussain, M.A. Ashraf, R. Rasheed. Heat shock increases oxidative stress to modulate growth and physico-chemical attributes in diverse maize cultivars. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2016. Vol. 30, № 4. P. 239–246.
22. M. Khoubnasabjafari, A. Jouyban. Challenges on determination of malondialdehyde in plant samples. *Archives of Crop Science*. 2020. Vol. 15, № 2. P. 102–112.
23. L. Hu, A. Bi, Z. Hu, E. Amombo, H. Li, J. Fu. Antioxidant metabolism, photosystem II, and fatty acid composition of two tall fescue genotypes with different heat tolerance under high temperature stress. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9, № 1242. P. 1–14.
24. E. Tommasino, S. Griffa, K. Grunberg. Malondialdehyde content as a potential biochemical indicator of tolerant *Cenchrus ciliaris* L. genotypes under heat stress treatment. *Grass and Forage Science*. 2012. Vol. 67, № 4. P. 110–120.
25. Y. Yamauchi, A. Furutera, K. Seki. Malondialdehyde generated from peroxidized linolenic acid causes protein modification in heat-stressed plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2008. Vol. 46, № 6. P. 720–728.
26. M. Hasanuzzaman, K. Nahar, M.M. Alam. Exogenous nitric oxide alleviates high temperature-induced oxidative stress in wheat seedlings by modulating the antioxidant defense. *Australian Journal of Crop Science*. 2012. Vol. 10, № 6. P. 503–512.

27. S. Narayanan, P.J. Tamura, M.R. Roth. Wheat leaf lipids during heat stress: I. High day and night temperatures result in major lipid alterations. *Plant, Cell & Environment*. 2016. Vol. 39, № 5. P. 1959–1970.
28. Z.Z. Xu, G.S. Zhou. Combined effects of water stress and high temperature on photosynthesis, nitrogen metabolism, and lipid peroxidation in *Leymus chinensis*. *Planta*. 2006. Vol. 224, № 3. P. 582–588.
29. A. Carneiro-Carvalho, R. Anjos, T. Pinto. Stress oxidative evaluation on SiK®-supplemented *Castanea sativa* Mill. plants growing under high temperature. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2021. Vol. 21, № 3. P. 175–182.
30. P. Suleman, A. Redha, M. Afzal. Temperature-induced changes of malondialdehyde, heat-shock proteins in relation to chlorophyll fluorescence and photosynthesis in *Conocarpus lancifolius*. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013. Vol. 35, № 5. P. 1545–1556.
31. G.J. Ahammed, W. Xu, A. Liu. Endogenous melatonin deficiency aggravates high temperature-induced oxidative stress in *Solanum lycopersicum* L. *Environmental and Experimental Botany*. 2019. Vol. 161, № 6. P. 44–53.
32. Ratzinger A. Development and application of LC-MS-based differential metabolic profiling in plant systems. *Citeseer*. 2008. Vol. 56. P. 389–400.
33. Luna, C.M., Pastori, G.M., Driscoll, S., Groten, K., Bernard, S., Foyer, C.H. "Drought controls on H₂O₂ accumulation, catalase (CAT) activity and CAT gene expression in wheat." *Journal of Experimental Botany*. 2005. Vol. 56, № 411. P. 417–423.
34. Lanza Castelli, M.E., Conti, G., Fagioli, V., Pinedo, M., González Antivilo, F., Agostini, E. Response of *Cenchrus ciliaris* to heat stress: Effects on antioxidant enzyme activities and oxidative damage. *Environmental and Experimental Botany*. 2010. Vol. 68, № 2. P. 218–226.
35. Chen D., Mubeen B., Hasnain A., Rizwan M. Role of promising secondary metabolites to confer resistance against environmental stresses in crop plants: Current scenario and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 881032.

36. Elhamouly N.A., Hewedy O.A., Zaitoon A. The hidden power of secondary metabolites in plant-fungi interactions and sustainable phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 1044896.
37. Muhammad M., Basit A., Wahab A., Li W.J. Response mechanism of plant stresses to secondary metabolites production. *Secondary Metabolites*. Elsevier. 2024. Vol. 32. P. 25–50.
38. Farouk S. Silicon-mediated modulations of genes and secondary metabolites in plants. *Silicon in Environmental Stress Management and Crop Productivity*. Elsevier. 2022. Vol. 45. P. 65–85.
39. Umar A., Darwish D.B.E., Albalwe F.M. Fungal secondary metabolites and their role in stress management. *Fungal Secondary Metabolites*. 2024. Vol. 11. P. 177–202.
40. Sansinenea E., Ortiz A. Secondary metabolites of soil *Bacillus* spp. *Biotechnology Letters*. 2011. Vol. 33, № 7. P. 1515–1523.
41. Rivero Bravo J. Metabolic reprogramming in arbuscular mycorrhiza symbiosis for enhanced resistance and tolerance against stresses. *Digibug*. 2019. Vol. 16. P. 215–240.
42. Bodade R., Lonkar K. Antifungal activity of microbial secondary metabolites. *Nanohybrid Fungicides*. 2024. Vol. 9. P. 320–345.
43. Abd-Elsalam K.A., Mohamed H.I. Fungal Secondary Metabolites: Synthesis and Applications in Agroecosystem. Elsevier. 2023. Vol. 12. P. 89–105.
44. 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, № 4. P. 389–400.
45. Zhao Q., Ma C., White J.C., Dhankher O.P., Zhang X. Quantitative evaluation of multi-wall carbon nanotube uptake by terrestrial plants. *Carbon*. 2017. Vol. 124. P. 598–607.
46. Shweta, Vishwakarma K., Sharma S. Plants and carbon nanotubes (CNTs) interface: present status and future prospects. *Nanotechnology: Food Security and Water Purification*. 2017. P. 413–428.

47. Husen A. Carbon-based nanomaterials and their interactions with agricultural crops. *Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications*. 2020. P. 225–246.
48. Shukla P.K., Misra P., Kole C. Uptake, translocation, accumulation, transformation, and generational transmission of nanoparticles in plants. *Plant Nanotechnology: Principles and Practices*. 2016. P. 193–215.
49. Gopalakrishnan Nair P.M. Toxicological impact of carbon nanomaterials on plants. *Nanotechnology, Food Security, and Water Purification*. 2018. P. 177–202.
50. Joshi A., Kaur S., Singh P., Dharamvir K., Nayyar H. Tracking multi-walled carbon nanotubes inside oat (*Avena sativa* L.) plants and assessing their effect on growth, yield, and mammalian (human) cell viability. *Applied Nanoscience*. 2018. Vol. 8, № 5. P. 625–641.
51. Hermes P.H., Gabriela M.P., Ileana V.R., Fusaro C. Carbon nanotubes as plant growth regulators: prospects. *Green Nanoparticles and Nanostructures for Phytomedicine*. 2020. P. 91–112.
52. Miralles P., Church T.L., Harris A.T. Toxicity, uptake, and translocation of engineered nanomaterials in vascular plants. *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46, № 17. P. 9224–9239.
53. Singh A., Bhati A., Gunture, Tripathi K.M. Nanocarbons in agricultural plants: can be a potential nanofertilizer? *Nanotechnology in Agriculture*. 2018. P. 155–176.
54. Vithanage M., Seneviratne M., Ahmad M. Contrasting effects of engineered carbon nanotubes on plants: a review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2017. Vol. 39, № 1. P. 97–120.
55. Tan X., Lin C., Fugetsu B. Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on suspension rice cells. *Carbon*. 2009. Vol. 47, № 15. P. 3479–3487.
56. Hao Y., Yu F., Lv R., Ma C., Zhang Z., Rui Y., Liu L. Carbon nanotubes filled with different ferromagnetic alloys affect the growth and development of rice seedlings. *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11, № 6. e0157264.
57. Lahiani M.H., Nima Z.A., Villagarcia H. Assessment of effects of the long-term exposure of agricultural crops to carbon nanotubes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. Vol. 65, № 24. P. 5072–5082.

58. Zhang P., Ma Y., Zhang Z., He X., Zhang J., Guo Z., Tai R., Zhao Y., Chai Z. Biotransformation of ceria nanoparticles in cucumber plants. *Chemosphere*. 2019. Vol. 222. P. 132–139.
59. Serag M.F., Kaji N., Tokeshi M., Baba Y. Carbon nanotubes and modern nanoagriculture. *Nanotechnology and Plant Sciences*. 2015. P. 183–207.
60. Singh S., Hasan M.R., Sharma P., Narang J. Graphene nanomaterials: The wondering material from synthesis to applications. *Sensors International*. 2022. Vol. 3. P. 35–52.
61. Abbas Q., Shinde P.A., Abdelkareem M.A., Alami A.H. Graphene synthesis techniques and environmental applications. *Materials*. 2022. Vol. 15, № 21. P. 7804.
62. Al-Ahmed A. Graphene from Natural Sources: Synthesis, Characterization, and Applications. *Elsevier*. 2022. P. 295–310.
63. Pendolino F., Armata N. Graphene oxide in environmental remediation process. *Springer*. 2017. P. 89–101.
64. Dimiev A.M., Eigler S. Graphene oxide: fundamentals and applications. *Elsevier*. 2016. P. 55–75.
65. Mousavi S.S., Karami A. Graphene Oxide from Natural Products and Its Applications in the Agriculture and Food Industry. *Taylor & Francis*. 2022. Vol. 15, № 21. P. 134–147.
66. Mohan A.N., Panicker S. Facile synthesis of graphene-tin oxide nanocomposite derived from agricultural waste for enhanced antibacterial activity. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9, № 40916.
67. Lim J.Y., Mubarak N.M., Abdullah E.C. Recent trends in the synthesis of graphene and graphene oxide based nanomaterials for removal of heavy metals—A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2018. Vol. 56. P. 1–10.
68. Tamilselvi R., Ramesh M., Lekshmi G.S., Bazaka O. Graphene oxide–Based supercapacitors from agricultural wastes. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 370–379.

69. Singh P.M., Tiwari A., Maity D. Recent progress of nanomaterials in sustainable agricultural applications. *Journal of Materials Science*. 2022. Vol. 57, № 12. P. 23–30.

70.

Mukherjee A., Majumdar S., Servin A.D. Carbon nanomaterials in agriculture: a critical review. *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. P. 172.

71. Hermes P.H., Gabriela M.P., Ileana V.R. Carbon nanotubes as plant growth regulators: prospects. *Advances in Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2020. Vol. 4. P. 46–68.

72. Chandel M., Kaur K., Sahu B.K. Promise of nano-carbon to the next generation sustainable agriculture. *Carbon*. 2022. Vol. 182. P. 56–68.

73. Mohamed M.A., Hashim A.F., Alghuthaymi M.A. Nano-carbon: plant growth promotion and protection. *Agricultural Applications of Carbon Nanotubes*. 2018. Vol. 8. P. 115–130.

74. Tiwari D.K., Dasgupta-Schubert N. Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water, and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Applied Nanoscience*. 2014. Vol. 4, № 1. P. 81–86.

75. Zaytseva O., Neumann G. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Agriculture and Environmental Applications*. 2016. Vol. 7. P. 10–15.

76. Vithanage M., Seneviratne M., Ahmad M. Contrasting effects of engineered carbon nanotubes on plants: a review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2017. Vol. 39, № 1. P. 97–120.

77. De La Torre-Roche R., Hawthorne J. Multiwalled Carbon Nanotubes and C₆₀ Fullerenes Differentially Impact the Accumulation of Weathered Pesticides in Four Agricultural Plants. *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, № 1. P. 79–85.

78. Singh P.M., Tiwari A., Maity D. Recent progress of nanomaterials in sustainable agricultural applications. *Journal of Materials Science*. 2022. Vol. 57, № 12. P. 23–30.
79. Thomas E. Carbon Nanotubes in the Agricultural Sector. *Nanotubes for Energy and Environmental Applications*. 2022. Vol. 9. P. 95–104.
80. Khamitova K.K., Kayupov B.A. The use of fullerenes as a biologically active molecule. *International Journal of Nanotechnology*. 2019. Vol. 16, № 3. P. 345–360.
81. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E. C₆₀: Buckminsterfullerene. *Nature*. 1985. Vol. 318. P. 162–163.
82. Iijima S., Ichihashi T. Synthesis of carbon nanotubes and fullerene C₆₀ using arc-discharge technique. *Nature*. 1993. Vol. 363. P. 603–605.
83. Kratschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Huffman D.R. Solid C₆₀: A New Form of Carbon. *Nature*. 1990. Vol. 347. P. 354–358.
84. Taylor R., Walton D.R. The Chemistry of Fullerenes. *Nature*. 1993. Vol. 363. P. 685–693.
85. Semenov K.N., Andrusenko E.V., Charykov N.A. Carboxylated fullerenes: physico-chemical properties and potential applications. *Progress in Solid State Chemistry*. 2017. Vol. 46, № 2. P. 111–145.
86. Diederich F., Thilgen C. Covalent fullerene chemistry. *Science*. 1996. Vol. 271. P. 317–323.
87. Iwamoto T., Mizorogi N., Tsuchiya T., Guo J.D., Nagase S. Fullerene derivatives for organic photovoltaics. *Accounts of Chemical Research*. 2010. Vol. 43. P. 1437–1448.
88. Panova G.G., Semenov K.N., Zhuravleva A.S. Obtaining vegetable production enriched with minor micronutrients using fullerene derivatives. *Horticulturae*. 2023. Vol. 9, № 7. P. 828.
89. Yamskova O.V., Kurilov D.V., Zavarzin I.V. Effects of the Impact of Water-Soluble Forms of Fullerenes and Their Derivatives on Metabolism of Plants and Yield of Agricultural Crops. *Biology Bulletin Reviews*. 2023. Vol. 13, № 4. P. 511–525.

90. Kulenova N.A., Charykov N.A., Keskinov V.A., Gur'eva A.A. Research and Possible Agronomic Applications of C₆₀(OH)₂₄ Adducts with Heavy Metals for Crop Treatment. *Processes*. 2023. Vol. 11, № 12. P. 3354.
91. Liang C., Xiao H., Hu Z., Zhang X., Hu J. Uptake, transportation, and accumulation of C₆₀ fullerene and heavy metal ions (Cd, Cu, and Pb) in rice plants grown in an agricultural soil. *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 234. P. 422–431.
92. Foley S., Crowley C., Smaih M. Cellular uptake and cytotoxicity of fullerenes. *Chemistry & Biology*. 2002. Vol. 9, № 6. P. 765–774.
93. Montellano A., Da Ros T., Bianco A., Prato M. Fullerene C₆₀: Chemistry and biological implications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2011. Vol. 11, № 1. P. 189–210.
94. Wei X., Yang X., Ma A., Zhang J., Peng P. Fullerene C₆₀/Eucommia ulmoides rubber nanocomposite films with excellent UV-blocking performance for controlling wheat scab fungus. *Industrial Crops and Products*. 2021. Vol. 167. P. 113–129.
95. Wang L., Li J., Pan H. Enhanced solubility and cellular uptake of C₆₀ derivatives. *Nanoscale*. 2012. Vol. 4. P. 6363–6374.
96. Sayes C.M., Gobin A.M., Ausman K.D. The differential cytotoxicity of fullerenes and other carbon nanomaterials. *Toxicological Sciences*. 2004. Vol. 80. P. 33–39.
97. Cao X., Zhang J., Wang Y. Opportunities for graphene, single-walled and multi-walled carbon nanotube applications in agriculture: A review. *Crop and Environment*. 2022. Vol. 1, № 1. P. 100006.
98. Zhu Y., Li C., Wu X. Carbon-based nanomaterials for sustainable agriculture: their application as light converters, nanosensors, and delivery tools. *Plants*. 2022. Vol. 11, № 4. P. 511.
99. Abd-Elsalam K.A. Carbon Nanomaterials for Agri-food and Environmental Applications. *Academic Press*, 2019. Vol. 11, № 4. 652 p.
100. Aacharya R., Chhipa H. Nanocarbon fertilizers: Implications of carbon nanomaterials in sustainable agriculture production. *In: Carbon Nanomaterials for Agri-food and Environmental Applications*. *Academic Press*, 2020. P. 411-433.

101. Patel S., Rathod D., Desai H. Carbon nanotubes-based nanomaterials and their agricultural and biotechnological applications. . 2020. Vol. 13, № 7. P. 1679.
102. Safdar M., Khan S., Shams S. Engineering plants with carbon nanotubes: a sustainable agriculture approach. *ACS Nano*. 2022. Vol. 16, № 6. P. 7921–7928.
103. Rezaei Cherati R., Shabani L., Masomi B. Comprehensive risk assessment of carbon nanotubes used for agricultural applications. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022. Vol. 20, № 1. P. 100.
104. Zaytseva O., Neumann G. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Agriculture & Food Security*. 2016. Vol. 5, № 1. P. 16.
105. González-García Y., Morsella M., Cirillo M.C. Impact of carbon nanomaterials on the antioxidant system of tomato seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, № 23. P. 5858.
106. Zaytseva O., Neumann G. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2016. Vol. 3, № 1.
107. Ruchi Aacharya, Hemraj Chhipa. Nanocarbon fertilizers: Implications of carbon nanomaterials in sustainable agriculture production. *Elsevier eBooks*. 2020. Vol. 1, № 1. P. 297–321.
108. Zhu L. et al. Carbon-Based Nanomaterials for Sustainable Agriculture: Their Application as Light Converters, Nanosensors, and Delivery Tools. *Plants*. 2022. Vol. 11, № 4. P. 511.
109. Saxena M., Maity S., Sarkar S. Carbon nanoparticles in “biochar” boost wheat (*Triticum aestivum*) plant growth. *RSC Adv*. 2014. Vol. 4, № 75. P. 39948.
110. Martínez-Ballesta M.C. et al. Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *Journal of Nanobiotechnology*. 2016. Vol. 14, № 1.
111. Lin S. et al. Uptake, Translocation, and Transmission of Carbon Nanomaterials in Rice Plants. *Small*. 2009. Vol. 5, № 10. P. 1128–1132.

112. Vithanage M. et al. Contrasting effects of engineered carbon nanotubes on plants: a review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2017. Vol. 39, № 6. P. 1421–1439.
113. Sun L. et al. Physiological, Metabolic, and Transcriptomic Analyses Reveal the Responses of Arabidopsis Seedlings to Carbon Nanohorns. *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society, 2020. Vol. 54, № 7. P. 4409–4420.
114. De La Torre-Roche R. et al. Multiwalled Carbon Nanotubes and C₆₀ Fullerenes Differentially Impact the Accumulation of Weathered Pesticides in Four Agricultural Plants. *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, № 21. P. 12539–12547.
115. Schwab F. et al. Barriers, pathways and processes for uptake, translocation and accumulation of nanomaterials in plants – Critical review. *Nanotoxicology*. 2015. Vol. 10. P. 1–22.
116. Mondal A. et al. Beneficial role of carbon nanotubes on mustard plant growth: an agricultural prospect. *Journal of Nanoparticle Research*. 2011. Vol. 13, № 10. P. 4519–4528.
117. Husen A., Siddiqi K. Carbon and fullerene nanomaterials in plant system. *Journal of Nanobiotechnology*. 2014. Vol. 12, № 1. P. 16.
118. Fan X. et al. Multiwall carbon nanotubes modulate paraquat toxicity in Arabidopsis thaliana. 2018. Vol. 233. P. 633–641.
119. Blokhina O. Antioxidants, Oxidative Damage and Oxygen Deprivation Stress: a Review. *Annals of Botany*. 2003. Vol. 91, № 2. P. 179–194.
120. Tessia Rakgotho et al. Green-Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles Mitigate Salt Stress in Sorghum bicolor. *Agriculture. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022. Vol. 12, № 5. P. 597–597.
121. Lahiani M.H. et al. Comparative study of plant responses to carbon-based nanomaterials with different morphologies. *Nanotechnology*. 2016. Vol. 27, № 26. P. 265102.
122. Hao Y. et al. Carbon nanomaterials alter plant physiology and soil bacterial community composition in a rice-soil-bacterial ecosystem. *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 232. P. 123–136.

123. Mojica M., Alonso J.A., Méndez F. Synthesis of fullerenes. *Journal of Physical Organic Chemistry*. 2013. Vol. 26, № 7. P. 526–539.
124. Aguilar Z.P. Types of Nanomaterials and Corresponding Methods of Synthesis. *Nanomaterials for Medical Applications*. 2013. P. 33–82.
125. Мельничук М. та ін. Вторинні метаболіти та їх роль у системах адаптації і захисту рослин. Вінниця: ТОВ “Друк,” 2022. С. 1–193.
126. (Levy) von Linné C. Biological Significance of Alkaloids. *Alkaloids - Secrets of Life*. 2007. P. 141–180.
127. Eva V. et al. Structure and Dynamics of the Isoprenoid Pathway Network. *Molecular Plant*. 2012. Vol. 5, № 2. P. 318–333.
128. Stierle A., Strobel G., Stierle D. Taxol and taxane production by *Taxomyces andreanae*, an endophytic fungus of Pacific yew. *Science*. 1993. Vol. 260, № 5105. P. 214–216.
129. Qiao W. et al. Enhancing taxol production in a novel endophytic fungus, *Aspergillus aculeatinus* Tax-6, isolated from *Taxus chinensis* var . *mairei*. *Fungal Biology*. 2017. Vol. 121, № 12. P. 1037–1044.
130. Welsh K.J. et al. Rapid Detection of the Active Cardiac Glycoside Convallatoxin of Lily of the Valley Using LOCI Digoxin Assay. *American Journal of Clinical Pathology*. 2014. Vol. 142, № 3. P. 307–312.
131. Caleja C. et al. Phenolic Compounds as Nutraceuticals or Functional Food Ingredients. *Current Pharmaceutical Design*. 2017. Vol. 23, № 19. P. 2787–2806.
132. Durazzo A. et al. Polyphenols: A concise overview on the chemistry, occurrence, and human health. *Phytotherapy research: PTR*. 2019. Vol. 33, № 9. P. 2221–2243.
133. Soto M.L., Falqué E., Domínguez H. Relevance of Natural Phenolics from Grape and Derivative Products in the Formulation of Cosmetics. *Cosmetics*. 2015. Vol. 2, № 3. P. 259–276.
134. Çam M., İçyer N.C., Erdoğan F. Pomegranate peel phenolics: Microencapsulation, storage stability and potential ingredient for functional food development. *LWT - Food Science and Technology*. 2014. Vol. 55, № 1. P. 117–123.

135. Mark R. et al. Sustainable production of natural phenolics for functional food applications. *Journal of Functional Foods*. 2019. Vol. 57. P. 233–254.

136. Díaz J. et al. Induction of shikimate dehydrogenase and peroxidase in pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings in response to copper stress and its relation to lignification. *Plant Science*. 2001. Vol. 161, № 1. P. 179–188.

137. Takahama U., Oniki T. Flavonoids and Some Other Phenolics as Substrates of Peroxidase: Physiological Significance of the Redox Reactions. *Journal of Plant Research*. 2000. Vol. 113, no. 3. P. 301–309.

138. Vermeir W., Nicholson R. Phenolic Compound Biochemistry. *Springer Science & Business Media*, 2007.

139. Kondo N., Kawashima M. Enhancement of the Tolerance to Oxidative Stress in Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Seedlings by UV-B Irradiation: Possible Involvement of Phenolic Compounds and Antioxidative Enzymes. *Journal of Plant Research*. 2000. Vol. 113, № 3. P. 311–317.

140. Sakihama Y., Yamasaki H. Lipid Peroxidation Induced by Phenolics in Conjunction with Aluminum Ions. *Biologia plantarum*. 2002. Vol. 45, № 2. P. 249–254.

141. Parry A.D., Tiller S.A., Edwards R. The Effects of Heavy Metals and Root Immersion on Isoflavonoid Metabolism in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant Physiology*. 1994. Vol. 106, № 1. P. 195–202.

142. Bors W. et al. Flavonoids as antioxidants: Determination of radical-scavenging efficiencies. *Oxygen Radicals in Biological Systems Part B: Oxygen Radicals and Antioxidants*. 1990. Vol. 186. P. 343–355.

143. Milić B.L., Djilas S.M., Čanadanović-Brunet J.M. Antioxidative activity of phenolic compounds on the metal-ion breakdown of lipid peroxidation system. *Food Chemistry*. 1998. Vol. 61, № 4. P. 443–447.

144. Arora A. et al. Modulation of Liposomal Membrane Fluidity by Flavonoids and Isoflavonoids. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2000. Vol. 373, № 1. P. 102–109.

145. Verstraeten S.V. et al. Flavan-3-ols and procyanidins protect liposomes against lipid oxidation and disruption of the bilayer structure. *Free Radical Biology and Medicine*. 2003. Vol. 34, № 1. P. 84–92.
146. Sakihama Y. et al. Reduction of Phenoxyl Radicals Mediated by Monodehydroascorbate Reductase. Biochemical and Biophysical Research Communications. *Elsevier BV*, 2000. Vol. 279, № 3. P. 949–954.
147. Rice-Evans C., Miller N., Paganga G. Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Science*. 1997. Vol. 2, № 4. P. 152–159.
148. Takahama U. Oxidation of Flavonols by Hydrogen Peroxide in Epidermal and Guard Cells of *Vicia faba* L.. *Plant and Cell Physiology*. 1988. Vol. 29, № 3.
149. Takahama U. Hydrogen Peroxide-Dependent Oxidation of Flavonoids and Hydroxycinnamic Acid Derivatives in Epidermal and Guard Cells of *Tradescantia virginiana* L.. *Plant and Cell Physiology*. 1988. Vol. 29, № 3.
150. Noctor G., Foyer C.H. ASCORBATE AND GLUTATHIONE: Keeping Active Oxygen Under Control. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1998. Vol. 49, № 1. P. 249–279.
151. Sakihama Y. Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants. *Toxicology*. 2002. Vol. 177, № 1. P. 67–80.
152. Rai V. et al. Effect of chromium accumulation on photosynthetic pigments, oxidative stress defense system, nitrate reduction, proline level and eugenol content of *Ocimum tenuiflorum* L.. *Plant Science*. 2004. Vol. 167, № 5. P. 1159–1169.
153. Cao, X., Zhang, J., Wang, Y. Opportunities for graphene, single-walled and multi-walled carbon nanotube applications in agriculture: A review [Електронний ресурс] / X. Cao, J. Zhang, Y. Wang. *Crop and Environment*. – 2022. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.100006>.
154. Yastreba, T., Kovalenko, I., Butkova, T., Mazur, V. Fiziologija vtorynnoho metabolizmu roslyn (Plant Secondary Metabolism Physiology). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2014. P. 1–275.

155. Cakmak I., Horst W.J. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiologia Plantarum*. 1991. Vol. 83, № 3. P. 463–468.

ДОДАТКИ

Додаток А

Апробація результатів роботи у Х Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Біотехнологія: звершення та надії»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ФАКУЛЬТЕТ ЗАХИСТУ РОСЛИН, БІОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКОЛОГІЇ
КАФЕДРА ЕКОБІОТЕХНОЛОГІЇ ТА БІОРІЗНОМАНІТТЯ

Х ВСЕУКРАЇНЬСКА НАУКОВО-
ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ
ВЧЕНИХ «БІОТЕХНОЛОГІЯ:
ЗВЕРШЕННЯ ТА НАДІЇ»

2-3 травня 2024 р.
м.Київ

ЗМІСТ

Voronets D.S., Taran O.P. Application of surface plasmon resonance (SPR) method for diagnosing bean common mosaic virus (BCMV).....	3
Dovhii V.V., Taran O.P. Obtaining recombinant protein P150 of cytomegalovirus for antibody detection in its diagnosis.....	8
Khudiy O.O., Cheban I.M., Khuda L.V., Kovalchuk B.V. The effect of feed additives based on <i>Chlorella vulgaris</i> and trimethylglycine on the ratio of proteins and lipids in the hepatopancreas of <i>Carassius gibelio</i>	9
Levkivskiy I.V., Vishnevska O.V. Investigation of the genetic stability of potato samples in in vitro culture using nickel nanoparticles.....	10
Yarmolenko V. E., Taran O. P. Optimization of sample preparation for immunological studies of potato seed material.....	12
Бевнюк Д.С., Класко О.Ю. Фітотремедиція кадмію рослинами гірчичі салатної <i>Brassica juncea</i> L.....	13
Білушка Д.С., Нестерова Н.Г. Дослідження впливу забруднювачів антропогенного реєстру на водні екосистеми методом цитостатичної реакції культури дафнії (<i>Daphnia pulex / magna</i>).....	14
Буняк В.О., Гнатюк Т.Т. Ефективність використання мікродобрив проти фітопатогенних бактерій та мікроміцетів.....	15
Вільховий С.П., Лобова О.В. Фармацевтичний потенціал рослини Aloe Vitro.....	16
Вовсодська К.М., Субін О.В. Особливості молекулярно-генетичної діагностики роду <i>Potyvirus</i>	17
Войтко М.В., Лісовий М.М. Біотехнологічні аспекти створення шалашних брикетів на основі рослинної сировини.....	18
Герасименко А.С., Придлуцька С.В. Біосинтез коліцину М у рослинах: нові перспективи для боротьби з бактеріальними інфекціями.....	20
Голованець М.О., Помагайбог С.О. Обґрунтування елементів ресурсоощадних технологій захисту плодів культур від комплексу шкідливих організмів у Лісостепу України.....	21
Горіславський Б.В., Субін О.В. Застосування ферментних препаратів для інтенсифікації процесу затирання у виробництві пива.....	22

матеріал зберігали в лабораторних пробірках при температурі 0-4°C. Через 6 місяців зберігання проводили перевірку збереження вірусу у дефіцитному матеріалі.

Процедура ІФА. У дві лунки планшету для ІФА додали по 200 мкл рослинного екстракту, два негативних контролю з екстракту здорової рослини та два позитивних контролю з антигеном. Інкубували при температурі 4°C протягом ночі. Промивали планшету проводили 3 рази PBS-Tween. Додали по 200 мкл блокуючого буфера в кожну досліджувану лунку і інкубували при 37 ° С протягом 1 год. Відповідне розведення специфічних антитіл, додали до кожної лунки по 200 мкл і витримали 2 год при температурі 37°C та повторно промили. Підготували кон'югат та додали по 200 мкл у кожну лунку, інкубували 1 год при температурі 37°C та промили. Свіжо приготовлений розчин 1 мг мл⁻¹ ферменту додали у кожну лунку по 200 мкл. Інкубували в інкубаторі при 37 °С і зчитували абсорбцію при 405 нм через рівні проміжки часу протягом 120 хв (EPPO, 2015).

Результати досліджень. Наші дослідження збереження антигена вірусу у ліофілізованих зразках після 6 місяців пресервації при +4 °С показали добре зберігання антигенних властивостей вірусу. Вміст антигена становив 0,714 O.D., що відповідало рівню стандартного комерційного позитивного контролю. Оптимізована технологія створення позитивних контроль для діагностування вірусу методом ІФА дозволяє зберігати вірус тривалий час, а подальші дослідження будуть зосереджені на вивченні збереження антигенних властивостей вірусомісного матеріалу в ліофілізованих зразках протягом більш тривалих часових термінів, та на перевірці збереження вірулентності зразків щодо рослин-хазяїв.

УДК 63:581.19:547.9

Коківин М.І., Галузієвський М.О., Прищупська С.В.
РЕГУЛЯЦІЯ СТРЕСОСТІЙКОСТІ У СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР
ВУГЛЕЦЕВИМИ ЧАСТИНКАМИ ЗА ВМІСТОМ ВТОРИННИХ МЕТАБОЛІТІВ
Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна
e-mail: maxim.kokovin@gmail.com

Під час вирощування сільськогосподарських культур рослини зазнають екологічних стресів, які можуть перешкодити їхньому росту та продуктивності. До таких стресових факторів належать низькі температури, посуха, кислотність ґрунту, а також шкідливі та хвороби. Кожен з цих факторів створює значні проблеми для рослин, що потенційно може призвести до зниження врожайності та погіршення якості продукції.

Дефіцит води в рослинах викликає різні зміни на клітинному, фізіологічному та молекулярному рівнях, впливаючи на такі важливі аспекти, як фотосинтетична активність, біомасу та утворення активних форм кисню (АФК). Надмірне утворення АФК призводить до пошкодження ДНК, білків та клітинних мембран. Важливим є регулювання процесів вільнорадикального окиснення і підтримування стабільних концентрацій АФК. Вуглецеві наноматеріали (ВНМ), фуллерен C₆₀ та його водорозчинні похідні, є перспективними для використання у агротехнології з метою захисту і попередження розвитку абіотичного стресу у рослин.

Показано, що за оптимальних доз фуллерол, водорозчинне похідне фуллерену C₆₀, попереджає шкідливий вплив осмотичного стресу [Аль-Абдулла та ін., 2017]. Унікальна сферична форма молекули та наявність π-кон'югованих зв'язків фуллерену дозволяє йому ефективно вловлювати АФК, що є особливо важливим для підвищення стійкості рослин до посухового стресу [Вей та Ван, 2013]. Крім того, доведено антиоксидантну роль фуллерену та його водорозчинних похідних, що додатково підтверджує їхню роль у розвитку механізмів стійкості до абіотичного стресу у рослин [Ахтар та ін., 2017].

Показано, що фуллерен та його водорозчинні похідні, залежно від концентрації (від 70 нмоль/л до 700 нмоль/л) [Борішен та ін., 2013], знижували окислювальний вплив посухового стресу у насінні пшаврових буряків (*Beta vulgaris L.*). Крім того, було показано, що протрупування насіння *Vicia sativa L.* фуллереном значно покращувало проростання насіння в умовах посухи у концентраціях 10 і 100 мг/л. Обробка проростків *V. sativa* фуллереном також призводила до збільшення надземної сухої маси та активувала фотосинтез, особливо в умовах посухового стресу [Сюй та ін., 2017]. Ці результати підкреслюють потенціал наноматеріалів на основі фуллерену в підвищенні стійкості рослин до дефіциту води та інших абіотичних стресів.

Перспективним напрямом досліджень у агротехнологіях є оцінка впливу вуглецевих наночастинок на синтез вторинних метаболітів у рослин. Оскільки вторинні метаболіти синтезуються рослинами у відповідь на стресові умови, їх вміст може бути не лише показником самого стресу, але і показником ефективності застосування вуглецевих наночастинок для зменшення або уникнення цього стресу. Зміни концентрацій вторинних метаболітів за дії вуглецевих наночастинок можуть вказувати на активність захисного механізму рослин та її здатність адаптуватися до нових умов. Такий підхід дозволяє глибше розуміти механізми взаємодії між наночастинами та рослинами і сприятиме розробці ефективних стратегій для підвищення стресостійкості та врожайності сільськогосподарських культур.

УДК632.3.01/08

Кондратюк Л.О., Кваско О.Ю.
БАКТЕРІОЗИ РОСЛИН КАРТОПЛІ *SOLANUM TUBEROSUM L.*
Національний університет біоресурсів і природокористування України вул. Героїв
Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна
e-mail: diana.kondrat.13@gmail.com

Обсяг виробництва картоплі у Україні має найвищий показник серед овочевих культур. Відсоток вирощеної культури йде на зовнішній ринок і складає близько 5% за 2022 рік [4, 2]. Із збільшенням відсотку виробництва збільшується відсоток продукції, що буде уражена різними фітопатогенами, до яких належать і бактерії. Заради мінімізації збитків важливим є вчасне виявлення та діагностика хвороб картоплі.

До найбільш поширених і шкідливих бактеріозів відносять жовту (м'яку) гниль або черну гниль, збудниками яких є грамнегативні бактерії родини *Enterobacteriaceae*, що руйнують пектин, завдяки чому відбувається процес гниття як стебел так і бульби картоплі. До найбільш розповсюджених представників, що викликають таку гниль, відносять родин *Pectobacterium* та *Dickeya*. Вони локалізуються в судинній тканині картоплі, чим спричиняють її закупорювання. В процесі метаболізму бактерій виділяють токсини, що призводять до отруєння сусідніх тканин, початку процесу гниття. Початковим місцем загнивання є область з'єднання бульби зі столоном, звідси гниль поширюється у глибину бульби. У процесі розвитку хвороби гниль починає набувати характерний запах [1, 3].

Бурую гниллю картоплі називають судинну хворобу, що провокує пом'якшення та побуління судинного кільця. Цю хворобу викликає грамотригативна бактерія *Ralstonia solanacearum*. Особливостями патогенезу є освітлення судинних тканин, їх загнивання та зміна кольору на темно-бурий. В Україні *R. solanacearum* вважається відсутньою і є в переліку регульованих шкідливих організмів списку А-1 [1, 3, 5].

Clavibacter michiganensis subsp. sepedonicum належить до регульованих некартинних бактерій списку А-2, що є обмежено поширеними [5]. Викликає судинну хворобу – кільцеву гниль картоплі. Симптоматика протікає наступним чином: спочатку спостерігається в'янення кільцевих стебел, при зрілі з яких виділяється білий ескудат з провідних пучків. У процесі розвитку хвороби провідна тканина стає кремово-жовтою,

Апробація результатів роботи у IV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія – виклики сучасності»



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ФАКУЛЬТЕТ ЗАХИСТУ РОСЛИН, БІОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКОЛОГІЇ

ЗБІРНИК

матеріалів доповідей

IV ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ І
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ



«ЕКОЛОГІЯ - ВИКЛИКИ СУЧАСНОСТІ»

26-27 вересня 2024 р.

Київ – 2024

ЗМІСТ

<i>Балтук Д.О., Сербенюк Г.А.</i> ЗНАЧЕННЯ ПИРЯТИНСЬКОГО ННПІ У СТРУКТУРІ ПЗФ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ	5
<i>Березовий В.Р.</i> МОР РИБИ У НИЖНЬОМУ Б'ЄФІ ВОГУСЛАВСЬКОЇ ГЕС: ПРИЧИНИ, НАСЛІДКИ, ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ	7
<i>Бєтєнєва С.Р., Боголюбов В.М.</i> КОРЕЛЯЦІЯ МОНИТОРИНГОВИХ СТАНЦІЙ ТА ФІТОІНДИКАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ	9
<i>Бондарчук І.М., Сафіна О.В.</i> ЗЕЛЕНІ ОХОРОНЦІ: КОРИСТЬ ВЕЛИКИХ ДЕРЕВ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ	11
<i>Голік В.Р., Паламарчук С.П.</i> СВІТОВИЙ ТА ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ДОСВІД ПРОВЕДЕННЯ ОВД	13
<i>Гончаренко Н.С., Бондарь В.І.</i> ВПЛИВ ВОСННИХ ДІЙ НА ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ҐРУНТІВ УКРАЇНИ	15
<i>Гуденко С.В., Клетко А.В.</i> ЕКОЛОГІЧНА ОСВІТА ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗБЕРЕЖЕННЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ	17
<i>Гуржий А.С.</i> ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ КОБАЛЬТУ НА РОСЛИНИ	19
<i>Заєрталюк О.В.</i> ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ В УКРАЇНІ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНОЇ КРИЗИ	20
<i>Зітевич А.О., Боголюбов В.М.</i> РОЛЬ ГРОМАДСЬКОГО МОНИТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ	22
<i>Капітон А.М., Погорілий К.Р., Писаренко М.Ю.</i> ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ДИНАМІЧНОГО П'РОВОГО НАРАТИВУ ТА ІНТЕРАКТИВНИХ ПЕРСОНАЖІВ	25
<i>Клиш М.М., Сербенюк Г.А.</i> ЗМІНИ БІОРИЗОМАНІТІТА ПІСЛЯ ВОСННИХ ДІЙ НА ТЕРИТОРІЇ ПЗФ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ	26
<i>Коваль Т.Р., Сербенюк Г.А.</i> БІОМАСА В БІОЕНЕРГЕТИЦІ: ТЕНДЕНЦІ ВИКОРИСТАННЯ ТА ВИКЛИК ДЛЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	28
<i>Ковалів М.І., Прилуцька С.В.</i> РЕГУЛЯЦІЯ СТРЕСОСТІЙКОСТІ У СЛІВСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ВУГЛЕЦЕВИМИ ЧАСТИНКАМИ ЗА ВМІСТОМ ВТОРИННИХ МЕТАБОЛІТІВ	30
	1

використовується для перевезення. Це може вплинути на навколишнє середовище як вторинний аспект у контексті виробництва енергії з біомаси, що є значущим аспектом.

Отже біомаса в біоенергетиці відіграє значну роль у сучасному світі, сприяючи зменшенню використання вуглеводнів та зниженню викидів парникових газів. Проте її використання пов'язане з важливими викликами для навколишнього середовища, такими як вплив на біорізноманіття, на водні ресурси та зміни використання земель. Ефективне і стале використання біомаси потребує ретельного управління ресурсами та розробки екологічно безпечних технологій.

Література:

1. Перспективи розвитку ринку біомаси в ЄС і в Україні. Вплив використання біомаси на зміну клімату. URL: <https://uspp.ua/assets/doc/uspp-biomass.pdf> (дата звернення 20.09.2024).
2. Біомаса. URL: <https://energy.com.ua/baza-znan/biomasa/> (дата звернення 20.09.2024).

УДК 63:581.19:547.9

РЕГУЛЯЦІЯ СТРЕСОСТІЙКОСТІ У СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ВУГЛЕЦЕВИМИ ЧАСТИНКАМИ ЗА ВМІСТОМ ВТОРИННИХ МЕТАБОЛІТІВ

Кочовін М.Л., студент І курсу магістратури, факультету захисту рослин, біотехнологій та екології

Прилуцька С.В., д.б.н., професор, завідувач кафедри фізіології, біохімії рослин та біоенергетики

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Під час вирощування сільськогосподарських культур рослини зазнають екологічних стресів, які можуть перешкодити їхньому росту та продуктивності. До таких стресових факторів належать низькі температури, посуха, кислотність ґрунту, а також шкідники та хвороби. Кожен з цих факторів створює значні проблеми для рослин, що потенційно може призвести до зниження врожайності та погіршення якості продукції.

Дефіцит води в рослинах викликає різні зміни на клітинному, фізіологічному та молекулярному рівнях, впливаючи на такі важливі аспекти, як фотосинтетична активність, біомасу та утворення активних форм кисню (АФК). Надмірне утворення АФК призводить до пошкодження ДНК, білків та клітинних мембран. Важливим є регулювання процесів вільнорадикального окиснення і підтримування стабільних концентрацій АФК. Вуглецеві наноматеріали (ВНМ), фуллерен C₆₀ та його водорозчинні похідні, є перспективними для використання у агробіотехнології з метою захисту і попередження розвитку абіотичного стресу у рослин.

Показано, що за оптимальних доз фуллерен, водорозчинне похідне фуллерену C₆₀, попереджав шкідливий вплив осмотичного стресу [0]. Унікальна сферична форма молекули та наявність π-кон'югованих зв'язів фуллерену дозволяє йому ефективно вловлювати АФК, що є особливо важливим для підвищення стійкості рослин до посухового стресу [0]. Крім того, доведено антиоксидантну роль фуллерену та його водорозчинних похідних, що додатково підтверджує їхню роль у розвитку механізмів стійкості до абіотичного стресу у рослин [0].

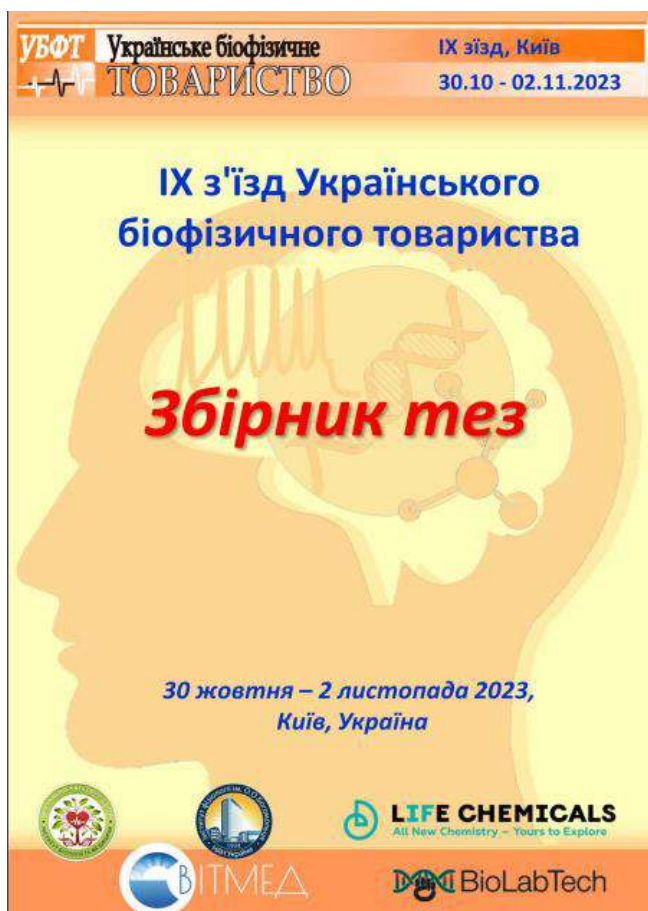
Показано, що фуллерен та його водорозчинне похідне, залежно від концентрації (від 70 мкмоль/л до 700 мкмоль/л) [0], знижували окислювальний вплив посухового стресу у насінні цукрових буряків (*Beta vulgaris L.*). Крім того, було показано, що протруювання насіння *Brassica napus L.* фуллереном значно покращувало проростання насіння в умовах посухи у концентраціях 10 і 100 мг/л. Обробка проростків *B. napus* фуллереном також призводила до збільшення надземної сухої маси та активізувала фотосинтез, особливо в умовах посухового ґрунту [0]. Ці результати підкреслюють потенціал наноматеріалів на основі фуллерену в підвищенні стійкості рослин до дефіциту води та інших абіотичних стресів.

Перспективним напрямом досліджень у агробіотехнологіях є оцінка впливу вуглецевих наночастинок на синтез вторинних метаболітів у рослин. Оскільки вторинні метаболіти синтезуються рослинами у відповідь на стресові умови, їх вміст може бути не лише показником самого стресу, але і показником ефективності застосування вуглецевих наночастинок для зменшення або уникнення цього стресу. Зміни концентрацій вторинних метаболітів за дії вуглецевих наночастинок можуть вказувати на активність захисного механізму рослин та її здатність адаптуватися до нових умов. Такий підхід дозволяє глибше розуміти механізми взаємодії між наночастинами та рослиною і сприяє розробці ефективних стратегій для підвищення стресостійкості та врожайності сільськогосподарських культур.

Література:

1. Borišev M. et al. Drought Impact Is Alleviated in Sugar Beets (*Beta vulgaris L.*) by Foliar Application of Fullerene Nanoparticles. *PLOS ONE / ed. Ng C.* 2016. Vol. 11, № 11. P. 234-235.
2. De La Torre-Roche R. et al. Multiwalled Carbon Nanotubes and C60 Fullerenes Differentially Impact the Accumulation of Weathered Pesticides in Four Agricultural Plants. *Environmental Science & Technology.* 2013. Vol. 47, № 21. P. 12539-12547.
3. Mishra N. et al. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science. Frontiers Media,* 2023. Vol. 14. P. 257-258.
4. Ruchi Acharya, Hemraj Chhipa. Nanocarbon fertilizers: Implications of carbon nanomaterials in sustainable agriculture production. *Elsevier eBooks.* 2020. Vol. 1. P. 297-321.

Апробація результатів роботи у о ІХ з'їзді Українського біофізичного товариства



61. Polycation signalling in neutrophils: implications for acute and chronic pro-inflammatory lung disease. P.L. Yarova, F.S. Telizhkin, I.P. Starukhin, D. Riccardi, A.J. Simpson	114
62. Аналіз інтерналізаційної здатності нанотіла 7D12 на прикладі рецептора епідермального фактора росту клітин ліній епідермоїдної карциноми A431. Шевчук О.І., Бірюк П.О., Островська Г.В.	116
63. Вплив кулаєвих наночастинок на продукування супероксидних аніонних радикалів у безклітинній системі. Гинкул К.О., Козачук М.І., Дашко А.В., Прилуцька С.В.	117
64. Біологічна активність рослинного алкалоїду мелізоїну та підсилення його дії за використання наноматеріалів. Дмитровська Л.О., Прилуцька С.В.	119
65. Біофізичні механізми впливу повільних електронів на біоструктури Суховія М.І., Шафранюк М.І., Мартишук М.О., Киричук М.М., Чаварка М.М., Шафранюк І.І.	122
66. Спонтанна скоротлива активність тонкої кишки іншій пригнічується внаслідок дії загального анестетика пропофолу Савчук О.С., Сука І.А., Мельник М.І., Дриш Д.О., Дівова Д.О., Жалас О.В.	124
67. The role of thrombin in early-onset seizures. Savochenko A.V., Shynshyna M.S., Klumenska M.U., Izars D.S.	127
68. The influence of dantrolene on hippocampal neurons in conditions of cultivation with amyloid- β Hanzha V.V., Rozanova N.M., Sibirskiy V.M., Lalyanets O.O.	128
69. Регстрація розподілу еритроцитів за електрофоретичною рухливістю. Дівова Д.А., Берест В.П.	130
70. Мікроциркуляція як можливий механізм впливу на еритроцити людини ліпосомних комплексів антимікробного пептиду. Волобуєв Д.О., Берест В.П.	132
71. Біоінформатика проти бур'янів. Ниларко О.Ю.	134
72. Хімічний канцерогенез в умовах військового часу Ковалівська А.О.	136
73. Навчальна та виробнича практики у світлі розв'язання актуальних проблем сучасного навчання Цейслер Ю.В., Певчук Ю.М., Шербана М.І., Зубрівська А.М.	137

ВПЛИВ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОЧАСТИНОК НА ПРОДУКУВАННЯ СУПЕРОКСИДНИХ АНІОН РАДИКАЛІВ У БЕЗКЛІТІННІЙ СИСТЕМІ

Гінчул К.О., Кокочін М.І., Дашенко А.В., Пригуцька С.В.

Національний університет біоресурсів і природоохорони України, Київ, Україна

Оксидативний стрес розвивається внаслідок порушення балансу між рівнем вільних радикалів та антиоксидантами у живих організмах. В результаті чого, утворюється надлишок вільних радикалів, які призводять до окислення клітини, пошкодження її структури і як наслідок, це може призвести до її загибелі.

Активні форми кисню - це взаємперетворюючі та відносно реакційно-здатні форми кисню, що виникають в результаті його електронного збудження або окисно-відновних перетворень: супероксидний аніон радикал (O_2^-) гідроксильний радикал (HO^\bullet), перекис водню (H_2O_2), синглетний кисень та ін.

Супероксидний аніон-радикал (O_2^-) оточений молекулами води, тому не здатний вільно дифундувати крізь клітинні мембрани, що відрізняє його від кисню. Цей радикал здатен індукувати процеси пероксидного окиснення ліпідів, а також є джерелом інших форм АФК.

Вуглецеві наночастинки є нанорозмірними структурами, зокрема C_{60} фулерен, однієї з багатоступінчатих нанотрубок, графен і оксид графену, які характеризуються унікальними хімічними та фізичними властивостями, що відкриває перспективність їх використання у різних галузях промисловості, а саме нанотехнологіях, наноелектроніці, біомедицині тощо.

Завдяки унікальній будові та наявності системи п-кон'югованих подвійних зв'язків молекула C_{60} фулерену може виявляти як антиоксидантні (зловловити вільні радикали), так і прооксидантні (після опромінення в УФ-видимому діапазоні продукувати АФК) властивості. Актуальність даної роботи полягає у використанні вуглецевих наночастинок для регуляції рівня утворених супероксидних аніон радикалів.

Метою роботи було оцінити вміст супероксидних аніон радикалів у безклітинній системі за реакцією з нітросним тетразолем (НСТ).

Матеріали і методи. Вміст супероксидних аніон радикалів визначали спектрофотометричним методом, який базується на здатності НСТ відновлюватись у присутності супероксидних аніонів, які утворюються внаслідок аеробної взаємодії відновлених форм нікотинаміддинуклеотиду (НАДН⁺Н) та феназіметасульфату (ФМС). Внаслідок чого НСТ відновлюється з утворенням гідразинтетразолію. Як індуктор окисного стресу нами було використано 5% H_2O_2 .

Результати та їх обговорення. Нами було використано модельну донор – акцепторну систему НАДН-ФМС, де НАДН був донором електронів. Продуктом аеробної взаємодії між відновленою формою НАДН та ФМС є супероксидний аніон, швидкість утворення якого оцінювали після додавання у середовище інкубації НАДН за ступенем відновлення НСТ до гідразинтетразолію, що поглинає при 540 нм.

Для цього нами було досліджено динаміку відновлення НСТ у модельній безклітинній системі за дії C_{60} фулерену (60 мкг/мл), оксиду графену (6 мкг/мл) та одностінних вуглецевих нанотрубок (6 мкг/мл).

Було вказано, що за внесення вуглецевих наночастинок (ВНЧ): C_{60} фулерену, оксиду графену та одностінних вуглецевих нанотрубок вміст супероксидних аніонів у динаміці упродовж 180 с зростає незначно. Після додавання 5% H_2O_2 спостерігалось посилення продукування супероксидних аніонів. Однак за умови одночасного внесення

ВНЧ та 5% H_2O_2 продукування O_2^- знижувалося, порівняно з окремою дією перексиду водню.

Отже, ВНЧ виявляли антиоксидантні властивості, про що свідчило зниження вмісту O_2^- індуковане перексидом водню. Таким чином, взаємодія ВНЧ з супероксид-аніоном може сприяти зниженню рівня окислювального стресу та попереджати пошкодження клітинних структур.

Ключові слова: оксидативний стрес, супероксидний аніон радикал, вуглецеві наночастинки.

Література:

1. Пригуцька С.В., Ротко Д.М., Правуцькай Ю.І., Рибальченко В.К. Токсичність вуглецевих наноструктур у системах in vitro та in vivo. Суч. Пробл. токсикол. 2012; 3-4: 49-57.
2. Тимочко М. Ф. Вільнорадикальні реакції та їх метаболічна роль. Медична хімія. 1999; 1(1): 19-25.
3. Дубиніна О. Ю. Окислювальний стрес і окислювальна модифікація білків. Мед. хім. 2001; 3(2): 5-12.
4. Матішевська О.П., Пригуцька С.В., Гринюк І.І. Фулерени C_{60} – біологічно активні молекули. 1. Фізико-хімічні властивості та біодоступність. Біотехнологія. 2010; 3(1): 18-26.