

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
фізіології, біохімії рослин та
біоенергетики

_____ Світлана ПРИЛУЦЬКА
«___» _____ 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Регуляція водного дефіциту у сільськогосподарських рослин за використання вуглецевих наночастинок»

Спеціальність: 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Гарант освітньої програми

Кандидат біологічних наук,
доцент кафедри
екобіотехнології
та біорізноманіття

_____ Олена КВАСКО
(підпис)

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

Доктор біологічних наук,
професор кафедри фізіології,
біохімії рослин та біоенергетики

_____ Світлана ПРИЛУЦЬКА
(підпис)

Виконала

_____ Богдана ЦАРЕНОК
(підпис)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
фізіології, біохімії рослин та
біоенергетики
_____Світлана ПРИЛУЦЬКА
“ ____ ” _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи студенту**

Царенок Богдані Миколаївні

1. Тема роботи «Регуляція водного дефіциту у сільськогосподарських рослин за використання вуглецевих наночастинок»

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

2. Строк подання студентом роботи 20 травня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: літературні джерела, інформація про характеристику ячменю озимого сорту «Достойний», загальноприйняті методики біологічних досліджень.

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

4.1. Проаналізувати літературні дані щодо впливу вуглецевих наноматеріалів на регуляцію водного дефіциту у сільськогосподарських рослин.

4.2. Проаналізувати літературні дані щодо впливу посухи на фізіологію сільськогосподарських рослин.

4.3. Оцінити фізіологічні показники ячменю озимого сорту «Достойний» за дії посухи та оксиду графена.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Прилуцька С.В., завідувач кафедри фізіології, біохімії рослин та біоенергетики		
2	Прилуцька С.В., завідувач кафедри фізіології, біохімії рослин та біоенергетики		
3	Прилуцька С.В., завідувач кафедри фізіології, біохімії рослин та біоенергетики		

6. Дата видачі завдання 1 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних даних щодо впливу вуглецевих наноматеріалів на регуляцію водного дефіциту у сільськогосподарських рослин.	Вересень-жовтень	
2	Оцінка фізіологічних показників ячменю озимого сорту «Достойний» за дії оксиду графена.	Листопад-грудень	
3	Оцінка фізіологічних показників ячменю озимого сорту «Достойний» за умов водного дефіциту.	Лютий-березень	
4	Оцінка впливу оксиду графена на фізіологічні показники ячменю озимого сорту «Достойний» спричинені посухою.	Квітень-травень	

Завдання прийняв до виконання
(підпис)

Богдана ЦАРЕНОК (підпис)

Керівник
кваліфікаційної роботи

Світлана ПРИЛУЦЬКА (підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Регуляція водного дефіциту у сільськогосподарських рослин за використання вуглецевих наночастинок» с.59, табл.12, рис.20, літературних джерел 48.

Мета даного дослідження – вивчити вплив оксиду графену на фізіологічний і біохімічний стан ячменю озимого сорту «Достойний» за умов водного дефіциту.

Об’єкт дослідження – регуляція вуглецевими наночастинками водного дефіциту у сільськогосподарських рослин.

Предмет дослідження – ячмінь озимий сорту «Достойний», морфологічні, фізіологічні та біохімічні показники у рослин ячменю озимого сорту «Достойний» за регулярного поливу, дії посухи та оксиду графену.

Методи дослідження: морфологічні, фізіологічні, біохімічні і статистичні методи, спектрофотометричний метод.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	10
1.1 Поняття про вуглецеві наноматеріали.....	10
1.2 Класифікація ВНЧ та їх вплив на рослину	13
1.2.1 Фулерени	13
1.2.2 Вуглецеві нанотрубки	15
1.2.3 Наноалмази	17
1.2.4 Графен.....	18
1.2.5 Оксид графену	19
1.3 Вплив водного дефіциту на сільськогосподарські рослини	22
1.3.1 Механізми уникнення стресу у рослин за умов посухи	23
1.4 Загальна характеристика ячменю озимого (<i>Hordeum vulgare</i> L.)....	24
1.4.1 Характеристика озимого ячменю сорт «Достойний»	25
1.4.2 Окультурення рослини	25
1.4.3 Особливості росту і розвитку ячменю озимого в умовах водного дефіциту	26
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	28
2.1 Об'єкт дослідження.....	28
2.2 Передпосівна обробка насіння.....	28
2.3 Визначення вмісту пігментів	29
2.4 Оцінка активності каталази	31
2.5. Статистичні методи обробки отриманих результатів.....	32
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
3.1 Морфометричні показники за умов регулярного поливу і водного дефіциту і дії оксиду графену	33
3.2 Вміст пігментів у озимому ячмені сорту «Достойний» за умов регулярного поливу і водного дефіциту і дії оксиду графену	44
3.3 Активність каталази в рослинах озимого ячменю сорту «Достойний» за умов регулярного поливу і водного дефіциту і дії оксиду графену	48

ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ВНЧ – вуглецеві наночастинки;

ВНМ – вуглецеві наноматеріали;

ОГ – оксид графену;

ВНТ – вуглецеві нанотрубки;

ОВНТ – одношарові вуглецеві нанотрубки;

ДВНТ – двошарові вуглецеві нанотрубки;

БВНТ – багатошарові вуглецеві нанотрубки;

CND – наноалмази.

ВСТУП

Актуальність: В умовах зміни клімату все більше сільськогосподарських рослин потерпає через нестачу води. З кожним роком опадів стає все менше, а середня температура повітря зростає, тому дослідження впливу водного дефіциту на ріст сільськогосподарських культур є важливою складовою у вирішенні даної глобальної проблеми.

Вирощування сільськогосподарських культур є головним напрямком діяльності України. Саме Україна є найбільшим експортером зерна у світі, що відіграє значну роль у формуванні економічної складової держави. Але за нинішніх умов вирощування сільськогосподарських культур стає все важче, а втрати – більшими. Тому застосування наноматеріалів це перспектива у біотехнології рослинництва, оскільки використання вуглецевих наночастинок допомагає адаптувати рослини до стресових умов завдяки своїм фізико-хімічним властивостям. ВНЧ сприяють ефективному розподілу води по всій рослині, допомагають ґрунту довше утримувати вологу, знижуючи ефект водного дефіциту. Важливо зазначити те, що за використання ВНЧ добрива знаходяться в ґрунті довший термін. Наночастинки стимулюють антиоксидантні властивості рослини, що допомагає боротися з окиснювальним стресом, який спричинений посухою.

Застосування вуглецевих наноматеріалів покращує морфометричні показники рослин, що означає одержання більш продуктивних сільськогосподарських культур.

Дія ВНМ, таких як фулерен (C_{60}) та оксид графену підвищують процес фотосинтезу, особливо за водного дефіциту.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Поняття про вуглецеві наноматеріали

Вуглецеві наночастинки (фулерени, нанотрубки, графен) активно вивчаються як перспективні сполуки для в медичній та фармакологічній галузях. Вони можуть здійснювати доставку лікарських засобів, зокрема протипухлинних, відновлювати пошкоджені клітини та структури, такі як синапси, нейрони та колагенові волокна. Дія ВНЧ на рослини досліджена менш детально, хоча деякі з них свідчать, що фізичні характеристики наночастинок, такі як розмір, форма, розчинність, доза, а також фактори, пов'язані з рослиною (її вид, вік, генотип), визначають результат їхнього впливу. Важливу роль відіграють способи внесення вуглецевих наноматеріалів, властивості ґрунту та живильного середовища [10].

Вуглецеві наноматеріали – це група спеціально розроблених наноматеріалів, використання яких швидко зростає завдяки їх унікальним оптичним, електричним, механічним та тепловим характеристикам. Синтез ВНЧ значно розвинувся за останні 20 років. Після відкриття фулеренів Бакмінстера (C_{60}) у 1985 році, у 1991 році були виявлені вуглецеві нанотрубки, а у 2004 році – графени, які й досі залишаються провідними матеріалами для багатьох застосувань [1].

Вуглець є одним з небагатьох хімічних елементів, що може полімеризуватися на атомному рівні, утворюючи довгі вуглецеві ланцюги. Завдяки чотирьом електронам на зовнішньому електронному рівні (Рис. 1.1), атоми вуглецю мають валентність чотири та здатні утворювати одно-, дво- або потрійні ковалентні зв'язки, а також з'єднуватися з іншими елементами. Ці властивості атомів вуглецю зумовлені їх особливою електронною структурою та меншим розміром у порівнянні з іншими елементами IV групи. Через наведені вище причини, вуглець існує в різних молекулярних формах, які складаються з одного типу атомів, проте мають різну структуру та властивості. Такі форми називаються алотропами. Донедавна було відомо

лише два природні алотропи вуглецю: алмаз і графіт, але за цей час були знайдені та описані нові алотропні форми, зокрема вуглецеві наноматеріали. Загалом наноматеріали характеризуються наявністю частинок хоча б одного розміру в межах від 1 до 100 нм. Усі наноматеріали, що складаються з атомів вуглецю, отримали назву вуглецевих наноматеріалів. Вуглецеві наноструктури включають частинки, що можуть мати трубку, роноподібну, сферичну або еліптичну форму [2].

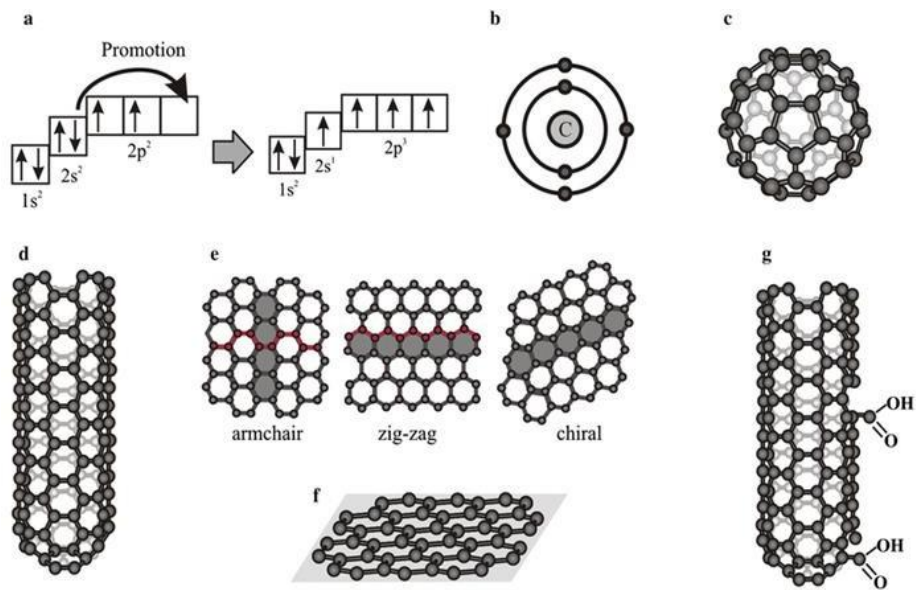


Рис.1.1 Будова атома вуглецю та наночастинок на основі вуглецю [2]

Структура атома вуглецю та вуглецевих наночастинок. а. Електронна конфігурація атома вуглецю до і після переходу одного s-електрона; б. Схематичне зображення структури атома вуглецю з двома електронними орбіталями навколо ядра і шістьма електронами, розподіленими на них; с. Структура фулерену C_{60} ; д. Структура одношарової вуглецевої нанотрубки; е. Різні типи одношарових вуглецевих нанотрубок: кріслоподібна, зигзагоподібна і хірально; ф. Структура графенового листа; г. Структура окисленої одношарової вуглецевої нанотрубки [2].

Вуглецеві наноматеріали привернули значну увагу в практичних застосуваннях завдяки їх широкому поширенню, низькій вартості синтезу та простоті виготовлення. Існує безліч способів класифікації таких матеріалів,

зважаючи на їхню різноманітність за розміром, формою та складом [3]. Найбільш поширеним методом класифікації вуглецевих наноматеріалів є поділ за їх мікроструктурою та фізико-хімічними властивостями. До таких матеріалів відносяться вуглецеві квантові точки, фулерени, нанотрубки, графен, його похідні, наноалмази та оксид графену. Особливість деяких з них — чутливість до подразників, таких як магнітне поле, температура, рН, світло та вологість. Взаємодія функціональних груп на їх поверхні під дією стимулів може значно покращити їх провідність і змінити інші фізико-хімічні властивості, що відкриває нові можливості для їх застосування. Вуглецеві наноматеріали, що реагують на подразники, можуть використовуватися як розумні матеріали з динамічно змінними фізико-хімічними властивостями, що відповідають на зміни навколишнього середовища. Їх різноманітні наноструктури та функціональні комплекси відкривають нові можливості для створення передових розумних наноматеріалів [4].

Незважаючи на багатообіцяючі досягнення, сфера вуглецевих наноматеріалів має низку непорозумінь, зокрема щодо їхнього впливу на навколишнє середовище та здоров'я. Одним із головних питань є потенційна токсичність вуглецевих наноматеріалів, що викликало серйозне занепокоєння серед дослідників і регулюючих органів. Дослідження виявили, що певні вуглецеві наноматеріали, зокрема вуглецеві нанотрубки (ВНТ) та оксид графену (ОГ), можуть спричиняти цитотоксичність, окислювальний стрес і запальні реакції в біологічних системах. Екологічна стійкість і біонакопичення вуглецевих наноматеріалів залишаються предметом активних досліджень та обговорень. Загроза внесення цих матеріалів в екосистеми та їх збереження, що може порушувати водне та наземне життя, викликає занепокоєння та посилення регулювань і комплексної оцінки ризиків. Крім того, етичні питання нанотехнологій, зокрема проблеми конфіденційності, безпеки та їх вплив на суспільство, додають додаткову складність до обговорення. З розвитком галузі важливо збалансувати технологічні переваги з ретельним розумінням потенційних ризиків, забезпечуючи відповідальний

розвиток та застосування вуглецевих наноматеріалів [5]. Вуглецеві наноматеріали, такі як графен, фулерени, вуглецеві нанотрубки (ВНТ) та наноалмази (СND), стали революційними завдяки своїм унікальним хімічним структурам та надзвичайним властивостям. Ці матеріали володіють видатними електричними, тепловими та механічними характеристиками, що робить їх перспективними для широкого спектра застосувань, включаючи електроніку, енергозберігаючі технології та сільське господарство [6].

1.2 Класифікація ВНЧ та їх вплив на рослину

1.2.1 Фулерени

Фулерени – це молекули, що складаються з атомів вуглецю, організованих структури, зазвичай сферичної, еліпсоїдної або циліндричної форми.

У 1985 році Крото з колегами зафіксували незвичні результати мас-спектрометрії парів вуглецю, що зрештою призвело до відкриття фулерену[

Фулерени можна визначити як клас вуглецевих молекул із замкненою структурою C_n , де n позначає загальну кількість атомів вуглецю, що формують 12 п'ятикутників і змінну кількість шестикутних граней. Залежно від кількості утворюються фулерени різних розмірів. Фулерени виявляють гідрофобні властивості, а їх розчинність залежить від розміру молекул [7]. Завдяки ароматичній структурі, фулерени розчиняються в органічних вуглеводнях та розчинниках, що містять галогени. Розмірність структури фулерену також впливає на його реакційну здатність. Однією з ключових рушійних сил є послаблення деформації, яке впливає на каркасну структуру, сприяючи поверненню до sp^3 -гібридизації. Таким чином, хімічна реакційна здатність фулеренів зростає зі збільшенням їхнього розміру, оскільки це веде до зменшення деформації, наближаючи структуру до більш графітоподібної плоскої форми [8].

Через п'ять років після відкриття, синтез C_{60} був вперше успішно здійснений за допомогою методу дугового розряду, при якому графіт

випаровувався і конденсувався. Фулерени були синтезовані шляхом термічної обробки конденсованого вуглецю та зібрані у пастці водяного охолоджувача. Згодом дослідники створили солі фулеренів, фулерени з відкритою структурою та квазіфулерени [9].

C_{60} є найпоширенішим і найбільш вивченим представником фулеренів. Зовнішній діаметр молекули C_{60} не є суперароматичною через наявність п'ятикутних структур, де атоми вуглецю не схильні утворювати подвійні зв'язки. Молекула фулерену може зазнавати легкого відновлення, а через поверхневу вигнутість її гібридизація знаходиться між sp^2 і sp^3 . Це, разом із її топологією, пояснює надзвичайну здатність C_{60} до прийому електронів. Така особливість має значний вплив на хімічну реакційну здатність і електрохімічні властивості фулерену, а також відкриває можливості для численних реакцій функціоналізації, які можуть бути здійснені на молекулі фулерену [8]. Форма фулерену ідентична будівлі, що спроектована американським архітектором Річардом Бакмінстером Фуллером, тому фулерен також називають бакмінстерфуллереном [11].

Фулерен широко використовується в сільському господарстві, зокрема для регуляції росту та розвитку рослин, підвищення родючості ґрунту, боротьби зі шкідниками та зменшення забруднення навколишнього середовища. Було проведено низку досліджень, щоб вивчити, як фулерен та його похідні впливають на ріст і розвиток рослин. Деякі з них показали позитивний ефект для рослин, тоді як інші результати вказували на відсутність впливу або були негативними. Коле та низка вчених встановили, що попередня обробка насіння фуллеролом, водорозчинним похідним фулерену, має позитивний вплив на врожайність біомаси, вміст води та врожайність плодів гіркої дині. Обробка фуллеролом (від 10 до 100 мг/л) суттєво прискорила проростання насіння, покращила надземну суху масу та фотосинтез *V. parvis* під час водного стресу. Аналогічно, обприскування екзогенним фуллеролом або застосування його для протравлювання насіння

покращує антиоксидантний захист, зменшуючи рівень H_2O_2 у пшениці за умов сольового стресу [48].

Проте роль вуглецевих наноматеріалів фулерену та його похідних у рості та розвитку рослин на фізіологічному, біохімічному, харчовому та генетичному рівнях є неоднозначною та суперечливою. Деякі дослідження вказують на негативний вплив цих матеріалів, що може призводити до фітотоксичності, яка гальмує проростання насіння, розвиток кореневої системи та пагонів, а також зменшує утворення біомаси. Ці результати підкреслюють необхідність більш детального дослідження впливу фулерену та його похідних для оптимізації їх використання в агрономії та біотехнології [12].

1.2.2 Вуглецеві нанотрубки

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) – це новий тип вуглецю, структура якого нагадує складений двовимірний графеновий лист. Вони також мають форму молекулярних трубок, що складаються з графітових шарів вуглецю.

Серед інших вуглецевих наноматеріалів ВНТ є одним із алотропів вуглецю, який володіє винятковими властивостями, що робить їх придатними для технічного використання. Вони були відкриті японським дослідником С. Іідзімою в 1991 році. За своєю структурою ВНТ поділяються на дві основні категорії: одношарові та багатошарові нанотрубки. Деякі дослідники додатково виділяють в окремий клас ВНТ двостінні вуглецеві нанотрубки. Зазвичай одношарові нанотрубки мають діаметр близько 1–3 нм і довжину кілька мікрометрів, тоді як багатошарові нанотрубки характеризуються діаметром 5–40 нм і довжиною близько 10 мкм. Однак нещодавно було повідомлено про синтез нанотрубок довжиною навіть 550 мм. Структура ВНТ надає їм унікальні властивості, поєднуючи високу жорсткість, міцність і еластичність, що робить їх кращими порівняно з іншими волокнистими матеріалами. Також ВНТ мають значно вищу тепло- та електропровідність у порівнянні з іншими провідними матеріалами [2].

У 2008 році Саїнас та ін. продемонстрували вплив функціоналізованих і нефункціоналізованих одношарових вуглецевих нанотрубок на подовження коренів у різних культурах, таких як помідори, цибуля, огірок, салат, капуста та морква. Насіння рослин обробляли обома типами ВНТ у чашках Петрі, після чого їх поміщали в камеру для вирощування при температурі 25°C. Нефункціоналізовані ВНТ мали сильніший вплив на довжину коренів порівняно з функціоналізованими. Нефункціоналізовані нанотрубки сповільнили подовження коренів у томатів, тоді як у цибулі та огірка цей процес покращився. Функціоналізовані нанотрубки зменшили подовження коренів у салату, а на капусту та моркву жоден тип ВНЧ не мав впливу [14].

Проникнення одностінних вуглецевих нанотрубок крізь мембрану хлоропласта відбувається завдяки їх взаємодії з гліцероліпідами, які обволікають наночастинки. У результаті руйнування мембрани хлоропласта ліпіди адсорбуються на гідрофобній поверхні нанотрубок і таким чином зв'язуються з внутрішньою частиною хлоропластів. Вуглецеві нанотрубки піддаються кінетичному поглинанню ліпідами, після чого мембрана хлоропласта знову відновлюється [10].

Більшість досліджень зосереджено на вивченні впливу ВНТ на тканини людини та тварин, тоді як їхній вплив на рослини досліджується значно менше. Тому всебічне вивчення взаємодії між рослинами та ВНТ є необхідним, охоплюючи молекулярний, клітинний та органний рівні, а також інтегруючи фізіологію рослин для розкриття тонкощів цього процесу. Багатогранна динаміка взаємодії ВНТ з рослинами охоплює широкий спектр ефектів на фізіологічному, біохімічному та молекулярному рівнях. Позитивні результати включають посилення фотосинтезу, поліпшення ефективності використання поживних речовин і збільшення антиоксидантної активності, що разом сприяє прискореному росту рослин та підвищеній стійкості до стресових факторів. Складна взаємодія ВНТ з рослинами привертає увагу не лише завдяки їх позитивному впливу на ріст і стресостійкість, але й через потенційні фітотоксичні наслідки, пов'язані з їх використанням. Мікробні

взаємодії в ризосфері та мікробіомі рослин є критично важливими для здоров'я, росту та стійкості рослин до стресу. Нещодавні дослідження виявили, що ВНТ можуть впливати на ці складні мікробні мережі, що може мати наслідки для симбіозу рослин з мікробами і стану ґрунту. Одним із важливих аспектів застосування ВНТ в сільському господарстві є їхня доведена ефективність у боротьбі з патогенами рослин. Антимікробні властивості ВНТ були досліджені щодо поширених фітопатогенів, таких як гриби та бактерії. Властивості ВНТ, такі як велика площа поверхні та висока реакційна здатність, роблять їх перспективними кандидатами для ефективної доставки агрохімічних сполук, таких як добрива, регулятори росту та біопрепарати рослинам. Даний інноваційний підхід може значно змінити спосіб точного та цілеспрямованого застосування цих ресурсів у сільському господарстві [15].

1.2.3 Наноалмази

Один із найунікальніших вуглецевих наноматеріалів – це наноалмаз. Наноалмази складаються з атомів вуглецю з sp^3 -гібридизацією, які формують типові великі кристалічні структури. Їхнє ядро, розміром близько 2-3 нм, нагадує алмазну решітку з атомами вуглецю в sp^3 -стані, тоді як поверхня подібна до графітової – містить sp^2 -гібридизовані атоми з відкритими зв'язками, на які можуть приєднуватися функціональні групи. Основна частина ядра складається переважно з вуглецю. Між ядром і зовнішньою поверхнею знаходиться середній шар, який зазвичай вважається неоднорідною трансляційною вуглецевою оболонкою ширина якої менше 1 нм. Внутрішній бік даної оболонки відокремлений шарами, що подібні до вуглецевих кілець та покритий графітовим моношаровим вуглецем [16].

Наноалмази вирізняються високою твердістю, ефективною теплопровідністю, біосумісністю, хімічною стійкістю та високим питомим електричним опором. Вони також нетоксичні, що робить їх ідеальними для

біологічного застосування. Токсичність наноалмазів вивчаються як за допомогою досліджень *in vivo*, так і *in vitro*. Обидва підходи детально аналізують життєздатність клітин, клітинні механізми та поведінку. У межах *in vitro* порівнювали токсичність різних вуглецевих наноматеріалів, таких як одно- та багат шарові нанотрубки, а також наноалмази. Результати показали, що карбоксильовані нанотрубки є більш токсичними, ніж наноалмази, оскільки останні проявляють нижчий рівень цитотоксичності [17].

Хімічний склад поверхні наноалмазів визначає їхню здатність сприяти відновленню активних форм кисню. Антиоксидантна активність і здатність наноалмазів нейтралізувати радикали пояснюється наявністю чисельних функціональних груп, переважно – OH та -COOH, і великою кількістю подвійних зв'язків C=C на їх поверхні. У дослідженнях встановлено, що рівень УФ-індукованого перекисного окислення ліпідів, а отже, утворення альдегідів у соєвій олії, що була збагачена наноалмазами, був нижчим порівняно з чистою олією. Тому дедалі більше досліджень зосереджуються на наноалмазах як на перспективних, стабільних та довготривалих антиоксидантах [18].

1.2.4 Графен

Графен - це двовимірна алотропна форма вуглецю, що утворена з окремих шарів атомів вуглецю. У графені атоми вуглецю мають sp^2 -гібридизацію та з'єднані між собою σ - і π -зв'язками в двовимірну гексагональну кристалічну решітку з відстанню 0,142 нм між сусідніми атомами вуглецевих шестикутників. Графен також є структурним елементом для інших вуглецевих алотропів, таких як вуглецеві нанотрубки та фулерени [2].

Теоретичне вивчення графену розпочалося задовго до одержання реальних зразків матеріалу. Вперше теорію графену було досліджено канадським фізиком-теоретиком П. Р. Уоллесом в 1947 році. Проте перші зразки графену вдалося описати через 57 років, а саме 2004 році, завдяки

фізикам А. Гейму та К. Новосьоловому, котрі згодом стали лауреатами Нобелівської премії 2010 року. Попри довгу історію теоретичних досліджень, те, що реальний матеріал графену був отриманий відносно нещодавно, свідчить про те, що дослідження його властивостей все ще тривають [2].

Використання графену та його похідних продемонстрували позитивні результати у зменшенні стресу рослин. Графенові наноматеріали підвищують ефективність агрохімікатів, покращують утримання добрив у ґрунті. Внесення графену у кількості від 1 нг кг^{-1} до 5 г кг^{-1} у ґрунт, вплинуло на зміну структури мікробіоти, а точніше, значно підвищилася її активності, а дозування від 50 мг кг^{-1} до 150 г кг^{-1} мало позитивний вплив на продуктивність рослин. Однак існує потреба у поглиблених дослідженнях дії графену на рослинні культури. Дані дослідження є ключем до розробок ефективних стратегій використання графенових наноматеріалів для підвищення врожайності в умовах посухи [19].

1.2.5 Оксид графену

Оксид графену (ОГ) – це шаруватий матеріал на основі вуглецю з кисневмісними функціональними групами, такими як $=\text{O}$, $-\text{OH}$, $-\text{O}-$, $-\text{COOH}$, що приєднані з обох боків шару та по краях площини. Як і будь-які двовимірні вуглецеві матеріали, оксид графену є одношаровим та багатошаровим. Структура з одним шаром – це оксид графену, два шари – двошаровий. ОГ, що складаються з трьох або чотирьох шарів, класифікується як малошаровий. Якщо кількість шарів від п'яти до десяти, то це багатошаровий оксид графену, а при наявності одинадцяти чи більше шарів, матеріал називають оксидом графіту [20].

Оксид графену синтезують шляхом окислення графіту до оксиду графіту, після чого здійснюється його відшарування з утворенням ОГ. Властивості матеріалу залежать від методу синтезу, оскільки саме він впливає на кількість та тип кисневмісних функціональних груп у структурі. На відміну від графену, оксид графену є гідрофільним, тому дана властивість

полегшує створення суспензій у органічних розчинниках або воді. Проте, у випадку сильного окислення ОГ стає електричним ізолятором із забороненою зоною, яка складає 2.2 eV [21].

Вперше оксид графену був синтезований ще в 1859 році Бенджаміном Броуді, що є набагато раніше за відкриття самого графену. Він розробив спосіб окислення та відшарування природного кристалічного графіту, у результаті чого, отримав помітну кількість одношарового оксиду графена. На той час існування чистого графену було невідомим, тому лише через півтора століття потому, після активного дослідження графену, до методу Броуді знову повернулися, оскільки його винахід синтезу ОГ є простим та економічно вигідним [22].

Більшість сучасних методів синтезу оксиду графена засновані на підході Хаммерса, у якому графіт окислювався за допомогою перманганату калію в сірчаній кислоті. Одним із способів відновлення ОГ є використання гідразину, але дана речовина надзвичайно токсична, тому, через це були запропоновані безпечніші альтернативи, зокрема борогідрит натрію (NaBH_4) та аскорбінова кислота, які продемонстрували себе як досить ефективні відновники [23].

У 2010 році був запропонований новий метод синтезу, відомий як метод Тура, який відноситься до перманганатних методів. У цьому процесі фосфорну кислоту змішують із сірчаною в пропорція 1:9, а до суміші додають перманганат калію та графіт як 6:1. Суміш нагрівається до 50 °C та перемішується протягом 12 годин. Далі додається 30% H_2O_2 для того щоб нейтралізувати надлишок перманганата калію. Фосфорна кислота у даній реакції виконує функцію стабілізатора окислювального процесу, що робить синтез ОГ безпечним. За даного методу, одержується вищий вихід ОГ з більшим окисленням, що відповідає правильній структурі [21].

Оксид графену вирізняється унікальними структурними та поверхневими характеристиками, такими як велика питома площа поверхні, пористість, хімічна й механічна стійкість, а також здатність проявляти

каталітичну активність. Завдяки цьому він ефективно підходить для усунення різноманітних забруднюючих речовин. Механізми адсорбції, каталіз розкладання та мембранна фільтрація за допомогою ОГ, виявилися досить ефективними в усуненні пестицидів та фармацевтичних засобів, які є найпоширенішими забруднювачами навколишнього середовища [24].

Вплив оксиду графена на ріст рослин змінюється залежно від того на якій стадії розвитку вона знаходиться. Проведені дослідження демонструють, що ОГ здатний стимулювати проростання насіння, проте його дія залежить від виду рослини. Наприклад, у насінні *Festuca arundinacea*, обробленого розчином ОГ з концентрацією 0,2 мг/л, значно підвищився рівень схожості, а концентрація 50 мг/л позитивно впливала на схожість насіння шпинату та цибулі. Один із можливих механізмів такої дії полягає у здатності ОГ проникати крізь оболонку насіння, тим самим порушувати її цілісність, що полегшує всмоктування води, від чого пришвидшується проростання та підвищується його відсоток. Завдяки кисневмісним функціональним групам ОГ утримує воду, а гідрофобні ділянки sp^2 -структури сприяють перенесенню вологи до насіння, стимулюючи процес проростання. При низьких концентраціях ОГ від 50 до 100 мг/л, спостерігається значне пришвидшення у рості вже дорослих рослин томатів, тоді як підвищення концентрації до 200 мг/л не впливає на діаметр та вагу стебла. Як і більшість регуляторів росту, ОГ здатний впливати на ріст рослин залежно від його концентрації, тому потрібно визначати оптимальну концентрацію для досягнення максимального ефекту. Наприклад, для того, щоб виявити оптимальну концентрацію ОГ для кукурудзи, її обробляли такими концентраціями : 25, 50, 100 і 200 мг/л у ґрунті; найбільш ефективною була концентрація 50 мг/л, саме за неї був ефективний ріст як надземної, так і підземної частини рослини [25].

Однією з основних екологічних проблем, пов'язаних з оксидом графену, є його токсичність для рослин. При концентраціях від 0 до 1000 мкг/л, значний вплив ОГ на проростання та розвиток *Arabidopsis thaliana* спостерігався. Однак дослідження проведені на бобах (*Vicia*

faba L.), виявили токсичну дію – пригнічення росту та виникнення окислювального стресу [27]. При дослідженні фітотоксичної дії ОГ на конюшину білу (*Trifolium repens* L.), було виявлено, що відновлений оксид графену негативно впливає на біомасу пагонів, навіть за низької дози 50 мг кг⁻¹ серед трьох вуглецевих наноматеріалів. Проведені дослідження демонструють, що наноматеріали з малим розміром є більш згубними для рослин [26].

1.3 Вплив водного дефіциту на сільськогосподарські рослини

Доступ до води є найкритичнішою потребою для навколишнього середовища, оскільки її відсутність знижує врожайність наших сільськогосподарських культур. У природі певні види пристосовані до посушливих умов, проте більшість культур є залежними від води. Тривалість водно-дефіцитного стресу впливає на ріст і здатність рослини давати врожай, особливо на ранній стадій розвитку. На сьогоднішній день сільськогосподарські культури інтенсивно досліджуються для вивчення механізмів, що реагують на посуху, адже після детального аналізу можна допомогти рослинам адаптуватися та одержати максимальний врожай [42].

Нестача води виникає внаслідок зменшення кількості опадів або їх відсутністю, що призводить до низького вмісту вологи в ґрунті та низького водного потенціалу в надземних частинах рослини, таких як листя та стебла. Коли це трапляється, швидкість втрати води шляхом транспірації через листя перевищує швидкість поглинання води через в сухих середовищах [43].

Типовими симптомами недостатньої кількості води у рослини є скручування, пожовтіння листя, постійне в'янення. Крім того, реакція рослини на водний дефіцит сильно залежить від наявності попереднього стресового чинника або хвороби [44].

Незважаючи на негативний вплив дефіциту води на продуктивність рослини можуть реагувати на різний ступінь посухи. Існує сильна кореляція

між ростом рослини і доступністю води, оскільки на збільшення клітин впливає саме відсоток вмісту води, що потрапив до рослини. За нестачі ріст рослин пригнічується внаслідок чого знижується тургор клітинної стінки. А за суворих умов посухи, спостерігається зниження дихання. Щоб впоратися з дефіцитом води, осмотична адаптація рослин, підтримується за рахунок збільшення органічних речовин, а саме глюкози в коренях та листках, а відносно більший ріст коренів порівняно з пагонами спостерігався у рослин, що піддавалися стресу посухи [45].

1.3.1 Механізми уникнення стресу у рослин за умов посухи

Згідно зі стратегією уникнення, водний потенціал рослин підтримується на високому рівні за рахунок зменшення транспіраційних витрат у продихах. В інших випадках, наявність ворсинок (трихоми) на листках і кутикули, можуть допомогти підтримувати високий водний потенціал у тканинах рослин. Однак надмірний розвиток цих структур знижує продуктивність рослин та середній розмір вегетативної та репродуктивної частин рослини [40]. З іншого боку, адаптивність до водного дефіциту на рівні фотосинтетичних механізмів включає зменшення площі листя рослин і обмеження в утворенні нових листків. Виникнення трихом по обидва боки від листя дозволяє рослині переносити дефіцит води за посухи.. Ці структури знижують температуру листя за рахунок збільшення швидкості відбиття світла в листі. Інші механізми, наприклад осмотична адаптація, антиоксидантний захист, накопичення розчиненої речовини, метаболічна та біохімічна динаміка закриття продихів та збільшення співвідношення корневих пагонів, є іншими поширеними стратегіями, які дозволяють рослинам переносити несприятливий вплив стресу від посухи [41].

1.4 Загальна характеристика ячменю озимого (*Hordeum vulgare* L.)

Озимий ячмінь – це однорічна рослина, відноситься до злакових культур, довжина якої доходить до 90 см. Листя гладке та широке, завдовжки близько 30 см і завширшки 2-3 см. Колоски – найцінніша частина, мають шестикутну або чотиригранну форму, а самі колоски зібрані по три і кожен колос є плодоносним. Плоди захищені щільною лузгою, яку видаляють перед отриманням крупи або борошна. За умови вдалої перезимівлі, ячмінь має значно вищу врожайність порівняно з яровим, оскільки оптимізує використання вологи в даний сезонний період.



Рис. 1.2 Ячмінь озимий. Джерело: [49] [50]

Сорти озимого ячменю є холодостійкими, висаджуються восени. Вегетативний ріст, що включає формування листків, кореневої системи та вузлів кущення, відбувається протягом осені-зими, в даний період росту рослина накопичує поживні речовини та енергію для подальшого розвитку. Після зимівлі, коли температура зростає, рослина переходить у фазу репродуктивного росту, під час якого формується колос. Процес яровизації, який необхідний для переходу рослини до стадії цвітіння, активується за тривалих низьких температур близько 0 - +5 °С. Озимий ячмінь дозріває до весни, а врожай збирають у літку [28].

Найкраще сіяти озимий ячмінь на ділянки після пшениці, зернобобових, коренеплодів і баштанних культур, гарними попередниками вважаються також гірчиця та льон. Ґрунт повинен бути вологим, а дата посіву

залежить від погоди. Оптимальна дата – 1 жовтня, проте, якщо вересень або початок жовтня теплий, можна і з 20 жовтня. Головне, щоб до зими ячмінь не сформував стеблеву трубку, оскільки за такої умови він не витримає холод.

1.4.1 Характеристика озимого ячменю сорт «Достойний»

Озимий ячмінь сорт «Достойний» виведений Селекційно-генетичним інститутом НААН України у 2006 році. Характеризується як високопродуктивний сорт, має високу врожайність та стійкий до хвороб, таких як борошниста роса, чорна і пухирчаста сажка (7-8 балів) [36].

Сорт «Достойний» належить до дворучок (посів можливий двічі на рік – восени та навесні). За морфологічними ознаками, тип колоса – шестирядний, зерно велике, жовте, видовженої форми. Виростає рослина до 100-105 см. Рекомендований для зон: Степ, Лісостеп, Полісся. Потенціал врожайності 99 ц/га, реальні врожаї 59-63 ц/га. Скоростиглий, стійкий до вилягання (7-8 балів) [37].

1.4.2 Окультурення рослини

Ячмінь (*Hordeum vulgare L.*), окультурений різновид дикого виду *Hordeum spontaneum*, став однією з перших сільськогосподарських культур, вирощуваних людьми на території Західної Азії. Археологічні свідчення підтверджують його вирощування вже у 8-7 тисячоліттях до н. е. Ячмінь, разом із іншими злаковими, відіграв ключову роль у розвитку землеробства й супроводжував його поширення до Європи впродовж 6-5 тисячоліть до н.е [29]. Попри дані підтвердження, точне місце походження ячменю досі не встановлено. *H. Spontaneum* був також знайдений в таких регіонах, як Марокко, Алжир, Лівія, Єгипет, Крит, Ефіопія та Тибет. Така широка географія дає підстави припускати, що ячмінь міг мати не один, а кілька центрів окультурення, тобто походити з різних частин Старого Світу незалежно один від одного [30]. Спочатку ячмінь вирощувався переважно у південних та західних регіонах Європи, зокрема Італії, Греції та на Балканах, а пізніше і в північних країнах континенту. Під час промислової революції в

19 столітті, вирощування ячменю стало більш ефективним, оскільки тогочасні умови зумовлювали необхідність розвитку нових агрономічних методів.

Попри багатовікову історію окультурення, озимий ячмінь досі залишається однією з ключових сільськогосподарських культур Європи.

1.4.3 Особливості росту і розвитку ячменю озимого в умовах водного дефіциту

Посуховий стрес, спричинений дефіцитом вологи, тривалими періодами високих температур та підвищеним рівнем випаровування, є одним із найпомітніших наслідків змін клімату, які негативно впливають на рослинництво. Прогнозується, що надалі, такі умови будуть не лише в посушливих і напівпосушливих регіонах, але і у зонах із помірним кліматом, в такому випадку, існує загроза для стабільної продуктивності сільськогосподарських культур, зокрема озимого ячменю [31].

Результати проведених досліджень свідчать, що озимий ячмінь демонструє відносно високу стабільність врожаю в умовах водного дефіциту. Це пов'язано з біологічними особливостями озимого ячменю, він відновлює вегетацію відразу після весняного зволоження. Ранній початок активного росту дозволяє культурі пройти критичні фази органогенезу до настання високих температур та інтенсивного випаровування, що дає змогу частково уникнути дії стресових факторів та забезпечує рівномірне формування врожаю [31].

Водночас, озимий ячмінь є чутливою рослиною до тривалого водного дефіциту. Посуха негативно впливає як на надземну, так і на підземну частини його частини. Зокрема, спостерігається сповільнення росту пагонів, скорочення довжини кореневої системи та зниження загальної біомаси. Попередні дослідження впливу водного стресу на ячмінь, переважно зосереджувалися на аналізі морфологічних змін кореневої системи, оскільки саме вона першою реагує на стресові сигнали, викликані нестачею вологи, та

характеристиках врожайності. В коренях спостерігається модифікація провідної тканини – судин ксилеми, яка відіграє ключову роль у транспортуванні води та неорганічних речовин, забезпечуючи функціонування надземних органів під час стресу. Також не оминають наслідки водного дефіциту і один із найважливіших органів – зернівку. Її розвиток безпосередньо залежить від водного забезпечення. Під впливом посухи формування зерна зазнає змін : відбувається передчасне старіння рослини, скорочення тривалості накопичення зерна органічними речовинами, через що маса зернівки зменшується [33].

Оскільки коренева система забезпечує надходження води та мінералів, її морфологічні показники тісно пов'язані з розвитком генеративних органів. Під дією посухового стресу відбуваються зміни у співвідношенні між масою коренів до пагонів – спостерігається адаптивна реакція рослини, що супроводжується зниженням маси до 1000 зерен [32].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження обрано озимий ячмінь (*Hordeum vulgare* L.) сорту Достойний.

Насіння овальної форми, видовжене та загострене на кінцях, світло-жовтого кольору, середній розмір зерен близько 7- 9 мм в довжину та 4-5 мм у ширину.

Сорт здатний витримувати тривале зниження рівня вологості в ґрунті без значних втрат у врожайності. Рослина активно використовує воду з глибших шарів ґрунту, зберігаючи стабільну фотосинтетичну активність і формує потужну кореневу систему. Посухостійкість на рівні 8-9 балів [43].

2.2 Передпосівна обробка насіння

Передпосівна обробка насіння включала два етапи: стерилізацію і обробку наночастинками.

Спочатку насіння ячменю промивали тричі під протоковою водою для очищення від забруднень. Далі здійснювали відбракування пошкоджених та уражених шкідниками насінин, яке після розчині NaCl (20 г/л) упродовж 10 хвилин. Насіння, яке осідало на дно посудини є якісним та життєздатним для проростання. Щоб пришвидшити даний процес, насіння замочували у 0,02 % розчині борної кислоти H_3BO_3 на 25 хвилин, і знову промивалеея не менше трьох разів під протоковою водою. Обов'язково насіння стерилізували у 3 % розчині пероксиду водню H_2O_2 не менше 15 хвилин для знищення бактерій, грибів та патогенів, що можуть бути на поверхні; та тричі промивали під протоковою водою.

Простерилізоване насіння поміщали у чашки Петрі, де замочувалося 5 годин у водному розчині оксиду графену у діапазоні концентрацій 5, 10, 20 та 50 мкг/мл. Насіння контрольної групи (без обробки НЧ) замочували у дистильованій воді.

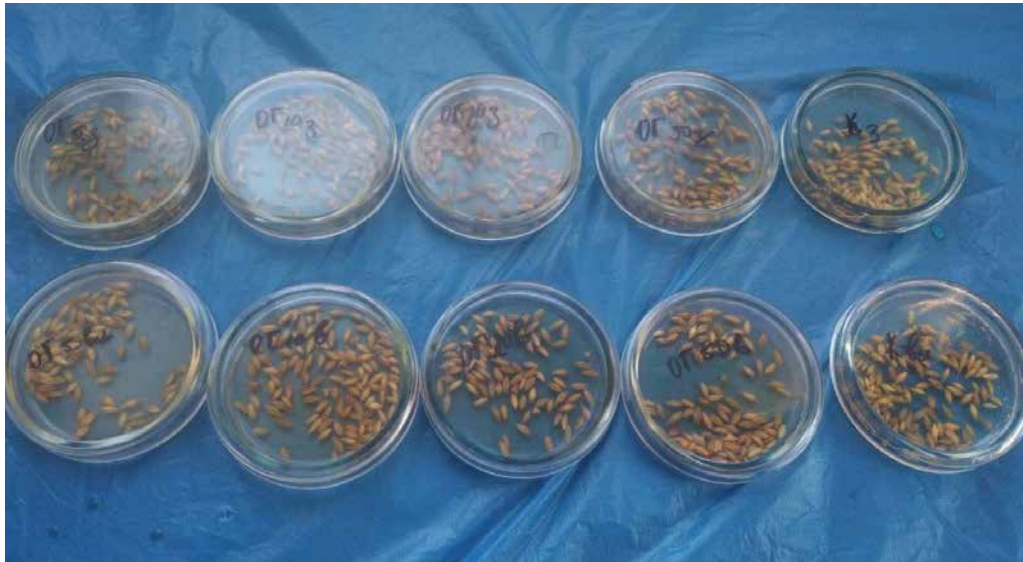


Рис.2.2 Замочування дослідних груп насіння ячменю у розчинах оксиду графену по 40 мл

Насіння висаджували у вазони об'ємом 1 літр та 0, 8 літра, всього було використано 20 вазонів для досліджень. Кожна проба містила по 10 насінин. Проби були розділені на дві дослідні групи: 1) регулярний полив і 2) водний дефіцит.

Дослід тривав 16 діб з двома дослідними групами рослин ячменю. Група, де моделювалися умови посухи проби поливалаея 1 раз на 4 дні, група за нормальних умов поливу – 1 раз на 1-2 дні. Такий підхід дозволив змодельовати вплив водного дефіциту на ріст і розвиток рослин у порівнянні з оптимальними умовами.

На 17 день після висадки насіння, була проведена оцінка морфометричних показників (висота рослини, довжина стебла та коренів, маса рослини).

2.3 Визначення вмісту пігментів

Для виділення рослинних фотосинтетичних пігментів, наважку листя рослин масою 100 мг подрібнювали та поміщали у фарфорову ступку, перетирали з додаванням 96 % етилового спирту та невеликої кількості CaCO_3 , для нейтралізації кислоти, що міститься в клітинному соку, до

утворення гомогенату. Одержаний екстракт відфільтровували в пробірку за допомогою фільтрувального паперу, який поміщали у лійку. Вміст пробірки доводили до 10 мл етиловим спиртом.



Рис. 2.5 Спиртові Екстракти пігментів

Концентрації хлорофілів а і b, а також каротиноїдів визначали за допомогою спектрофотометричного методу, у на спектрофотометрі UVmini-1240 (Шімадзу, Японія). Вимірювали оптичну щільність, довжина хвиль яких відповідає максимумам поглинання пігментів у відповідному розчиннику. Для хлорофілу а довжина хвилі становила 663 нм, хлорофілу b – 646 нм, каротиноїдів – 470 нм. Розчин для контролю – 96% етиловий спирт. Розраховувалися концентрації хлорофілів та каротиноїдів за формулами:

$$C_{хл.а} = 13,7 \cdot A_{663} - 5,76 \cdot A_{646}, \quad (2.1)$$

$$C_{хл.б} = 25,8 \cdot A_{646} - 7,6 \cdot A_{663}, \quad (2.2)$$

де A_{663} – оптична густина розчину за довжини хвилі 663 нм;

A_{646} – оптична густина розчину за довжини хвилі 646 нм.

$$C_{кар} = 4,695 \cdot A_{470} - 0,268 \cdot (C_a + C_b), \quad (2.3)$$

де A_{470} – оптична густина розчину за довжини хвилі 470 нм;

$C_a + C_b$ – сумарний вміст хлорофілів у розчині, мг/л.

Кількісний вміст пігментів та каротиноїдів, розраховували за формулою:

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

де V – об'єм спиртової витяжки, мл;

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

M – маса наважки з сировиною, г [34].

2.4 Оцінка активності каталази

Щоб одержати клітинний екстракт, 0,5 г наважки рослинного матеріалу розтирали у фарфоровій ступці з додаванням 5 мл фосфатного буферу на холодильному агенті, оскільки каталаза чутлива до тепла, і при високих температурах може денатурувати. Тому ступки та реактиви попередньо охолоджували у холодильнику.

Рослинний гомогенат центрифугували 10 хвилин при 3 тис. об/хв. Далі у пробірці вносили 1 мл пероксиду водню та 100 мкл супернатанту. У контрольну пробу замість супернатанту додали 100 мкл дистильованої води. Вміст пробірок інкубували на водяній бані при температурі 37°C упродовж 10 хвилин. Після нагрівання у пробірці вносили 1 мл молібдату амонію для того, щоб зупинити реакцію, і знову центрифугували 10 хвилин при 3 тис. об/хв. Насиченість забарвлення надосаду вимірювали на спектрофотометрі при довжині хвилі 410 нм.

Активність каталази розраховували за формулою:

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

Де E – активність каталази (мкат/мг);

$A_{хол}$ – екстинція холостої проби (замість пероксиду водню вносили дистильовану воду);

$A_{досл}$ – екстинція дослідної проби;

V – об'єм внесеної проби (100 мкл);

t – час інкубації (10 хв або 600 с);

m – маса тканини при внесенні проби (мг);

K – коефіцієнт мілімолярної екстинції пероксиду водню[34].

2.5. Статистичні методи обробки отриманих результатів

Морфометричні показники ячменю озимого, вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілу а, хлорофілу b, каротиноїдів) та активність каталази були проаналізовані за допомогою програми Excel 2021. Обчислювався однофакторний та багатфакторний дисперсійний аналіз, а також стандартна похибка та стандартне відхилення.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Морфометричні показники за умов регулярного поливу і водного дефіциту і дії оксиду графену

На 17 день після висаджування насіння у ґрунт, було оцінено морфометричні показники рослин ячменю у всіх досліджуваних групах. Довжина рослини, стебла, коріння, а також масу рослини.

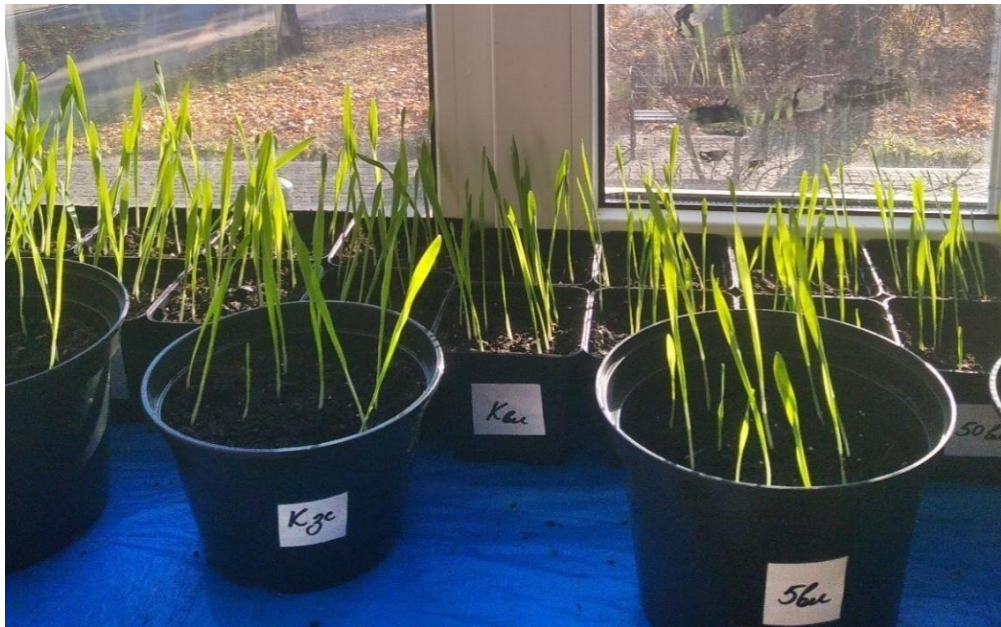


Рис. 3.1 Сіянци ячменю озимого сорту «Достойний» на 17 день з моменту висадки



Рис. 3.2. Морфометрія озимого ячменю

Показники довжини рослин ячменю на 17 день за умов регулярного поливу представлено у табл.3.1.

Таблиця 3.1

Довжина рослин ячменю за регулярного поливу (см)

№ проби	Контроль (регулярний полив)	Концентрація оксиду графену, мкг/мл			
		5	10	20	50
1	24	24,5	26	25,5	22
2	21,5	26,6	26,5	23,5	23,5
3	22,5	23,5	23,5	25,5	23,5
4	21	26	24	18,5	22,4
5	25,6	21,5	24,2	21,5	24,5
Середнє значення	23,92	24,42	24,28	24,23	24,15
Похибка	0,83	0,85	0,58	1,28	0,48
±	1,86	1,90	1,30	2,86	1,08



Рис. 3.3. Довжина рослин ячменю за регулярного поливу.

Далі проаналізовано показники рослин за умов водного дефіциту (Табл. 3.2.).

Таблиця 3.2

Довжина рослин ячменю за умов водного дефіциту (см)

№ проби	Контроль (водний дефіцит)	Концентрація оксиду графену, мкг/мл			
		5	10	20	50
1	25,7	27,8	28	27,5	20
2	25,6	29,5	23,5	21,5	24,5
3	20	28,2	28,6	25,4	20,4
4	22,5	26	26,2	27,8	23,4
5	24,5	29,6	27	24,5	24
Середнє значення	22,96	28,22	26,66	25,34	24,87
Похибка	1,06	0,64	0,90	1,15	0,90
±	2,38	1,44	2,01	2,58	2,02

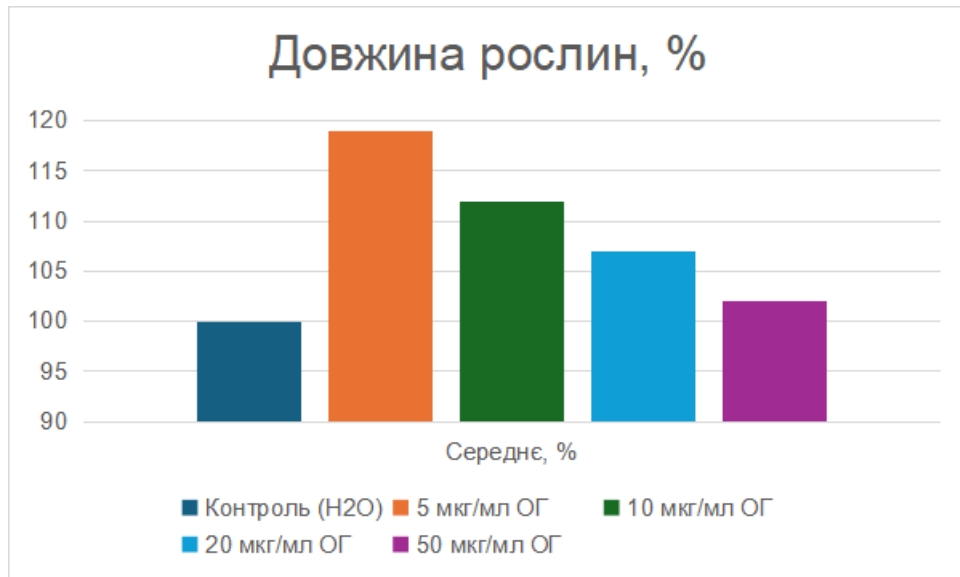


Рис. 3.4 Довжина рослин ячменю за умов водного дефіциту.

Посуха значно впливає на морфометричні показники рослин, зменшуючи їх ріст та розвиток. В умовах водного дефіциту спостерігається скорочення довжини коренів, висоти рослин, а також зниження маси сухої речовини. Це зумовлено обмеженням доступу води, що веде до зниження фотосинтетичної активності та порушення обміну речовин [41].

Згідно отриманих результатів показано, що як у групі за регулярного поливу, так і в умовах водного дефіциту, найкращі результати продемонстрував ріст ячменю за концентрації 5 мкг/мл ОГ. У групі з регулярним поливом ріст у порівнянні з контролем збільшився на 6,5 %, а в умовах водного дефіциту – на 19,3 %. За концентрацій 10, 20, 50 мкг/мл ОГ стимулював ріст рослин, проте показники дещо знизилися. У групі рослин за оптимальних умов поливу оброблених ОГ за концентрації 10 мкг/мл довжина рослин ячменю зроста на 5,7 %, при 20 мкг/мл – на 2,7 %, і при 50 мкг/мл – 1,6 % (Рис.3.3) порівняно з контрольним показником. За умов посухи ріст рослин за концентрацій 10, 20, 50 мкг/мл ОГ був на 12,6 %, 7,1 % та 5,1 % вищий відносно контрольних показників у досліджуваній групі за водного дефіциту (Рис.3.4).

Довжини стебла ячменю озимого в усіх дослідних групах . Результати наведено в таблицях 3.3 та 3.4.

Таблиця 3.3

Довжина стебла рослин за регулярного поливу (см) та дії ОГ

№ проби	Контроль (регулярний полив)	Концентрація оксиду графену, мкг/мл			
		5	10	20	50
1	19,1	19,8	19,5	13,5	18,7
2	17,2	17,5	14,5	15,7	16,5
3	15	18,8	18,2	13	17,7
4	15,5	16,5	17	16,8	15,6
5	18	18,8	16,7	15,7	16
Середнє значення	16,96	18,28	18,1	17,95	17,26
Похибка	0,81	0,58	0,90	0,70	0,57
±	1,81	1,30	2,01	1,57	1,27

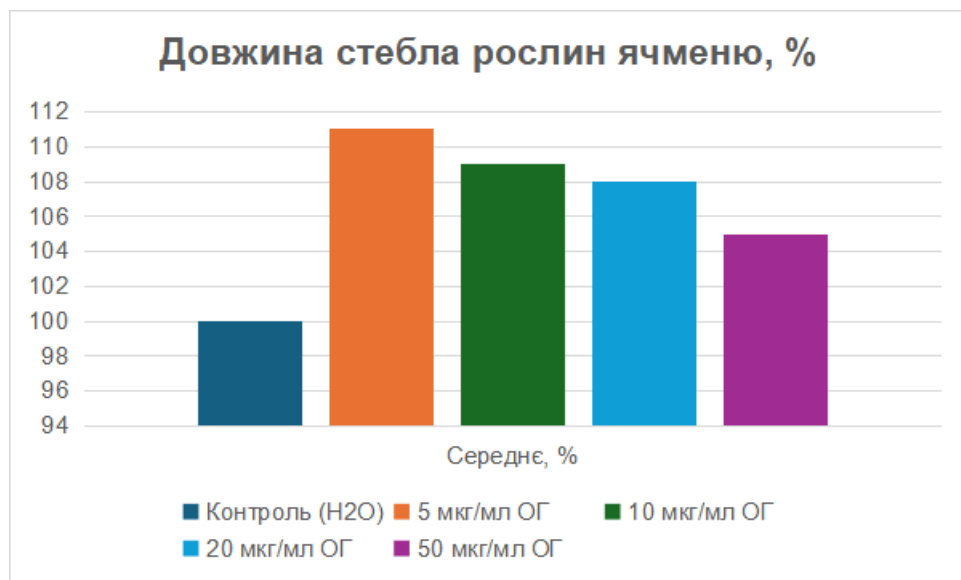


Рис. 3.5 Довжина стебла рослин ячменю за умов регулярного поливу, %

Таблиця 3.4

Довжина стебла рослин за умов водного дефіциту та ОГ (см)

№ проби	Контроль (водний дефіцит)	Концентрація оксиду графену, мкг/мл			
		5	10	20	50
1	17,2	20,7	20	18,5	17
2	14,7	20	16,9	20,6	18,5
3	16,5	18,5	17,2	17,7	17
4	16,9	17,5	18,2	13,5	16,4
5	15,6	17,7	16	15,7	19,5
Середнє значення	16,18	18,06	18	17,68	17,68
Похибка	0,43	0,56	0,65	1,08	0,57
±	0,97	1,25	1,45	2,41	1,27

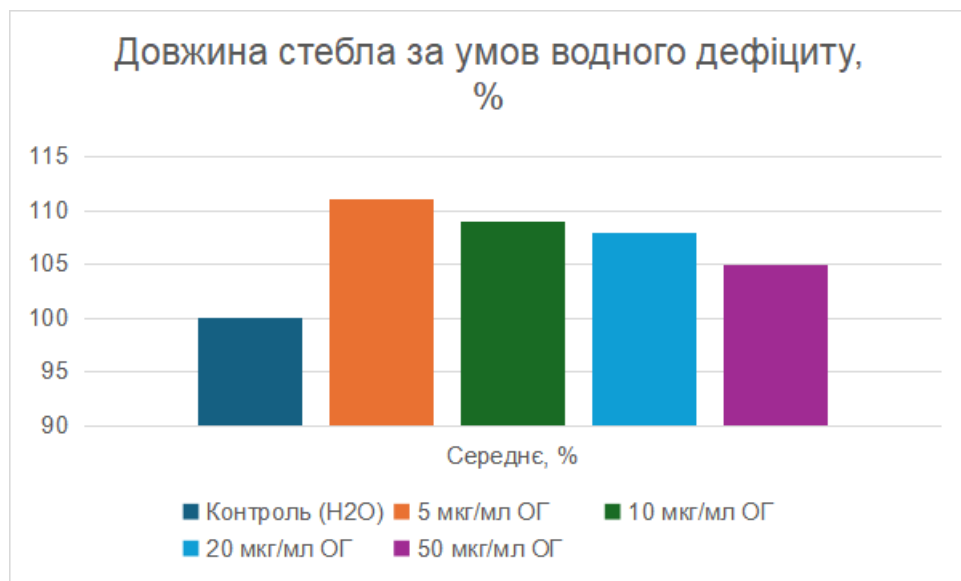


Рис. 3.6 Довжина стебла рослин ячменю за умов водного дефіциту та дії ОГ, %

Довжина стебла у рослин за регулярного поливу, насіння яких не було замочене у ОГ становило 16,96 см, тоді як за умов посухи - 16,18 см. Після дії ОГ за концентрації 5 мкг/мл стебло ячменю озимого було довшим на 7,7 % у групі рослин за регулярного поливу, у другій групі рослин за нестачі води –

на 11,5%. Відносно контролю показники довжини стебла за концентрацій 10, 20, 50 мкг/мл збільшилися на 6,1%, 6% та 1,2 % – для першої досліджуваної групи (Рис.3.5), та на 11,2%, 9,2%, 7,4 % – для другої експериментальної групи (Рис.3.6).

Наступним завданням було вивчити довжину коренів рослин у обох дослідних групах. Результати дослідження представлено у таблицях 3.5 – 3.6.

Таблиця 3.5

Довжина коренів рослин ячменю за регулярного поливу та ОГ(см)

№ проби	Контроль (регулярний полив)	Концентрація оксиду графену, мкг/мл			
		5	10	20	50
1	6,8	7,5	6,6	6	5
2	6,7	6,9	6,5	6,7	6,5
3	6	7	7,6	5,8	6
4	4,1	6,4	7,3	8,5	6,5
5	10	8,8	6,5	7,3	5,5
Середнє значення	6,72	7,32	6,9	6,86	6,5
Похибка	0,95	0,42	0,22	0,49	0,27
±	2,13	0,93	0,49	1,10	0,61

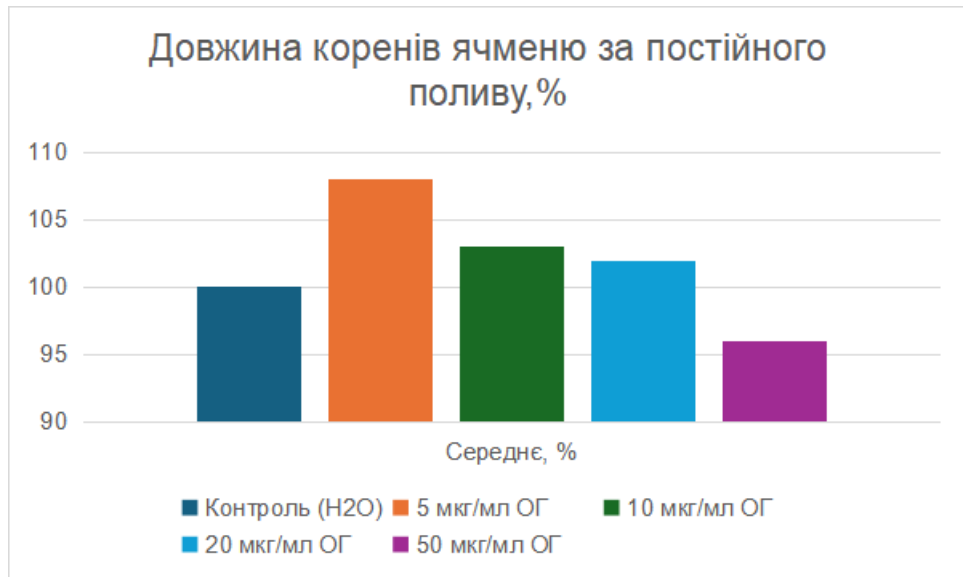


Рис.3.7 Довжина коренів ячменю озимого за регулярного поливу та дії ОГ, %

Таблиця 3.6

Довжина коренів рослин ячменю при водному дефіциті та дії ОГ(см)

№ проби	Контроль (водний дефіцит)	Концентрація оксиду графену, мкг/мл			
		5	10	20	50
1	6,6	8	9,3	8	6,5
2	8,5	12	8,8	7	7
3	5	9,4	11,3	7,2	7,4
4	7	9,5	10,8	10,6	6,6
5	6,5	10,8	11	8,3	7,8
Середнє значення	7,35	9,94	9,84	8,16	7,52
Похибка	0,59	0,70	0,49	0,63	0,24
±	1,33	1,57	1,09	1,42	0,53

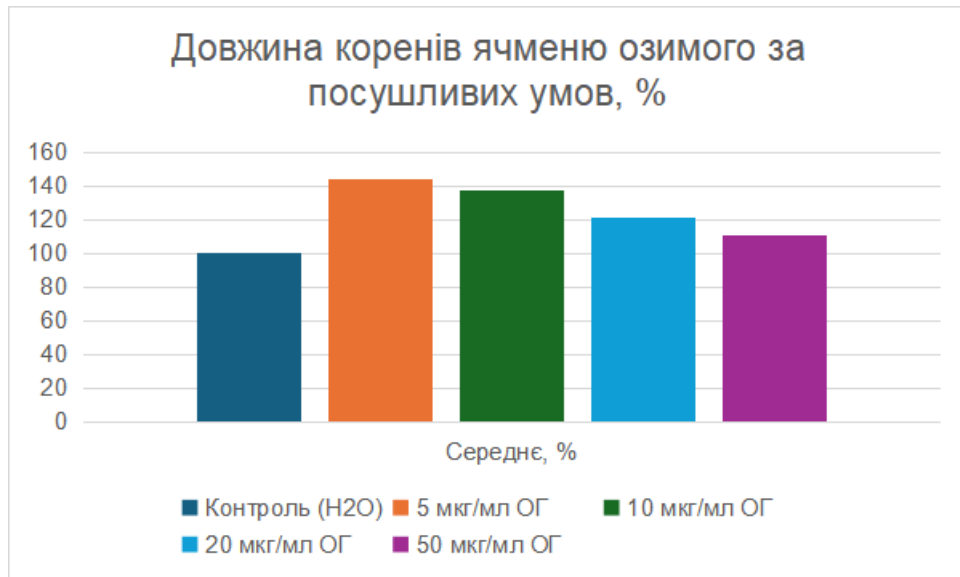


Рис. 3.8 Довжина коренів ячменю за умов посухи та дії ОГ, %

Середня довжина коренів у групі за регулярного поливу становила 6,72 см. Обробка насіння ОГ, за концентрації 5 мкг/мл зумовила незначне збільшення довжини кореня на 8,6% відносно контролю, проте отримана різниця не вважаються статистично важливою. За концентрацій 10,20 та 50 мкг/мл відхилення від контрольного значення становили 3,6%, 2%, та -3%, що також не свідчить про істотну дію ОГ на довжину кореня.

За умов водного дефіциту, обробка насіння ОГ концентрацією 5 мкг/мл сприяла збільшенню довжини кореня на 44,8%, порівняно з контролем, що свідчить про стимулюючу дію ОГ за цієї концентрації на ріст кореневої системи. За концентрації 10 мкг/мл ОГ сприяв збільшенню довжини кореня на 38% відносно контролю. Замочування насіння у 20 мкг/мл ОГ зумовило підвищення даного показника на 21,9%, а за 50 мкг/мл – на 11%. Отриманий результат свідчить про позитивний вплив ОГ на ріст кореневої системи в умовах водного дефіциту. Ефективність дії ОГ є вищою, ніж у групі з регулярним поливом (Рис.3.8).

Наступним морфометричним показником, який оцінювали сира маса саджанців ячменю озимого. Результати представлено у таблицях 3.7 та 3.8.

Таблиця 3.7

Маса рослин ячменю у групі за регулярного поливу та дії ОГ (мг)

№ проби	Контроль (регулярний полив)	Концентрація оксиду графену, мкг/мл			
		5	10	20	50
1	251	329	425	301	270
2	300	305	328	295	336
3	323	310	272	305	273
4	263	326	260	296	317
5	364	299	315	320	313
Середнє значення	300	324	319,2	303	301,8
Похибка	18,9	7,79	27,1	4,51	12,96
±	42,94	17,4	60,7	10,1	29

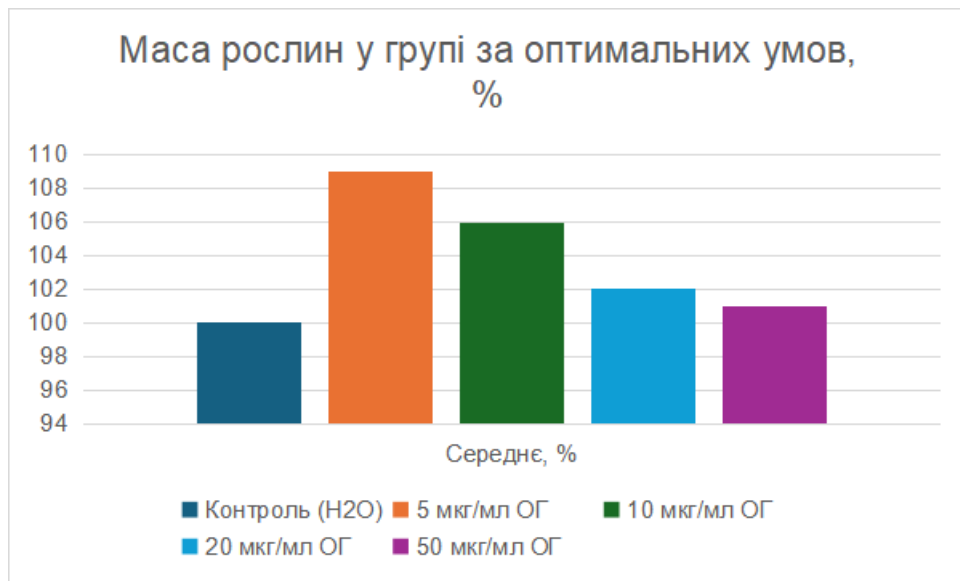


Рис. 3.9 Маса ячменю у групі за регулярного поливу та дії ОГ, %

Таблиця 3.8

Маса рослин ячменю за умов водного дефіциту та ОГ (мг)

№ проби	Контроль (водний дефіцит)	Концентрація оксиду графену, мкг/мл			
		5	10	20	50
1	270	304	317	266	257

2	336	264	296	312	333
3	326	348	304	270	258
4	282	303	295	306	197
5	270	269	310	308	364
Середнє значення	298,8	304,2	301,4	299,8	281,8
Похибка	14,26	15,4	4,44	10,7	29,7
±	31,89	34,5	9,93	23,9	66,5

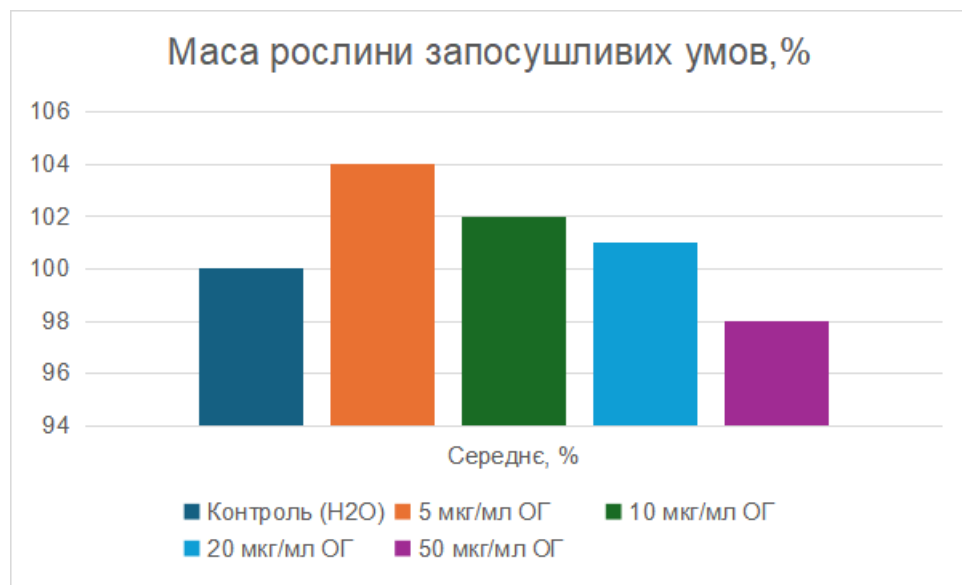


Рис. 3.10 Маса рослин ячменю за умов водного дефіциту та дії ОГ, %

У досліджуваній групі за регулярного поливу, маса відносно контрольних показників, збільшилася на 9,8%. При 10 мкг/мл підвищилася маса на 6,5%, 20 мкг/мл – на 2%, а 50 мкг/мл – на 0,6% (Рис. 3.9).

У групі за водного дефіциту, відносно групи 1, приріст маси рослин ячменю був меншим. За концентрації ОГ 5 мкг/мл маса збільшилася на 3%. При 10, 20 мкг/мл показники змінилися на 2,6% та 1,5%. Проте за концентрації 50 мкг/мл ОГ відбулося зниження маси на 2%. Загалом, жодна з концентрацій оксиду графену не викликала зміни маси, які б перевищували поріг 20%. Тому, усі зміни можна класифікувати як незначні, що свідчить про

відсутність впливу оксиду графену на масу зразків у досліджуваних умовах (Рис.3.10).

Таким чином, можна зазначити, що замочування насіння ячменю озимого сорту «Достойний» у ОГ за концентрації 5 мкг/мл мало найвищі показники серед досліджуваних морфометричних параметрів у двох експериментальних групах. На другому місці по ефективності знаходиться концентрація ОГ 10 мкг/мл, а концентрація 50 мкг/мл мала найнижчий вплив, а у випадку з масою ячменю та довжиною коренів – пригнічувальний ефект, зокрема для групи з водним дефіцитом. Якщо порівнювати вплив ОГ на рослини за регулярним поливом та за умов посухи, то їх дія ефективно повпливала на довжину коренів, оскільки найвищий відсоток росту спостерігався в умовах нестачі води за концентрації 5 мкг/мл. Це найвищий показник серед досліджуваних зразків – 44,8%, у той час як за тієї ж концентрації при доступі до води даний показник дорівнював 8,6 %.

3.2 Вміст пігментів у озимому ячмені сорту «Достойний» за умов регулярного поливу і водного дефіциту і дії оксиду графену

Хлорофіли та каротиноїди – це одні з найважливіших рослинних пігментів. Хлорофіли відіграють ключову роль у процесі фотосинтезу, оскільки вони поглинають світлову енергію та використовують її під час перетворення, поглинутих з навколишнього середовища, вуглекислого газу та води на кисень та глюкозу.

Хлорофіл а – основний пігмент, який поглинає світло у синій та червоний частинах спектра. У процесі фотосинтезу він віддає збуджені електрони в електрон-транспортний ланцюг.

Хлорофіл b – допоміжний пігмент, передає поглинуту енергію до хлорофіла а, завдяки чому спектр поглинутого світла ширший. За структурною формулою, у хлорофіла b метилова група (CH_3), яка є у хлорофіла а, заміщена на формілову ($-\text{CHO}$). Через це він краще розчиняється

у полярних розчинах. Дана властивість допомагає хлорофілу b взаємодіяти з мембранами хлоропластів для переміщення енергії між молекулами в процесі фотосинтезу.

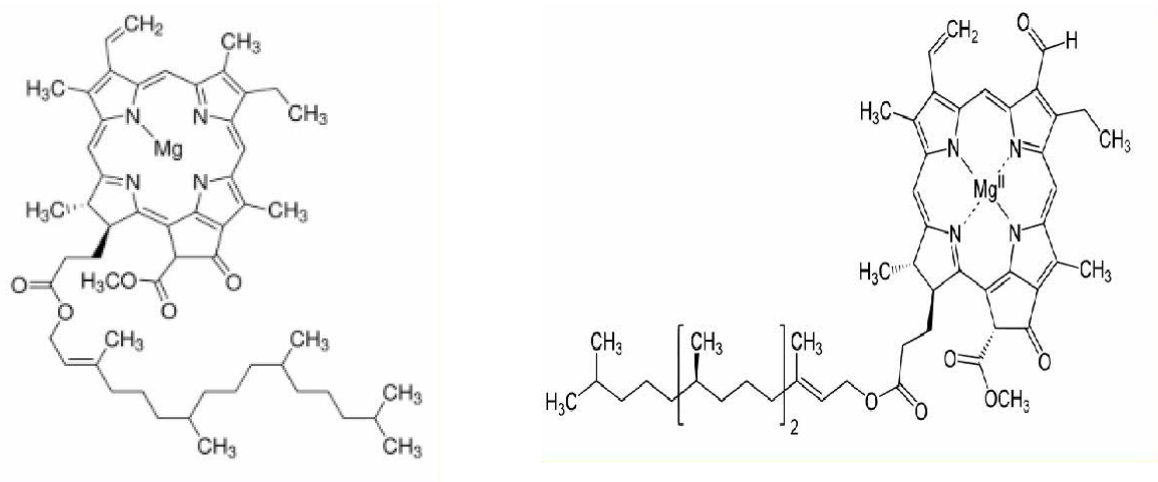


Рис. 3 1 Структурна формула хлорофілу a та хлорофілу b [51] [52]

Каротиноїди – допоміжні пігменти, які поглинають світло у синій та зеленій частині спектра. Так як і хлорофіл b, безпосередньо участь у процесі фотосинтезу не приймає, головна функція – це передача поглинутої енергії до хлорофілу a. Каротиноїди відіграють важливу роль у окисно-відновних реакціях рослини, вони є переносниками активної форми кисню завдяки подвійним зв'язкам у структурі. Це дозволяє кисню накопичуватися та вивільнятися в атмосферу під час фотолізу води у реакціях фотосинтезу.

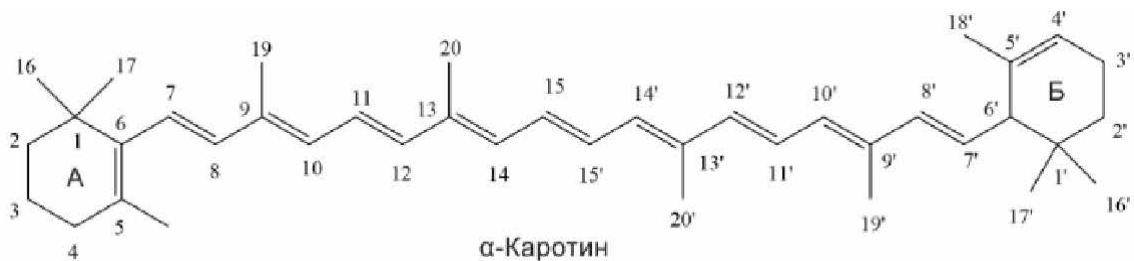


Рис. 3 2 Структурна формула α -каротину [53]

Об'єкт дослідження для визначення вмісту хлорофілів *a* і *b* та каротину – ячмінь озимий, який зростав за нормальних умов поливу та посухи.

Було проаналізовано вміст фотосинтетичних пігментів, а саме хлорофілу *a*, хлорофілу *b* та каротиноїдів у рослин озимого ячменю сорту «Достойний» за умов регулярного поливу, водного дефіциту та дії ОГ.

Результати досліджень представлено у таблицях 3.9 і 3.10.

Таблиця 3.9

Вміст пігментів у ячмені за регулярного поливу та дії ОГ (мг/г)

Проби	Хлорофіл а	Хлорофіл b	Каротиноїди
Контроль(H ₂ O)	0,713	0,281	0,703
5мкг/мл ОГ	0,714	0,285	0,706
10мкг/мл ОГ	0,800	0,318	0,752
20мкг/мл ОГ	0,658	0,260	0,594
50мкг/мл ОГ	0,581	0,231	0,517

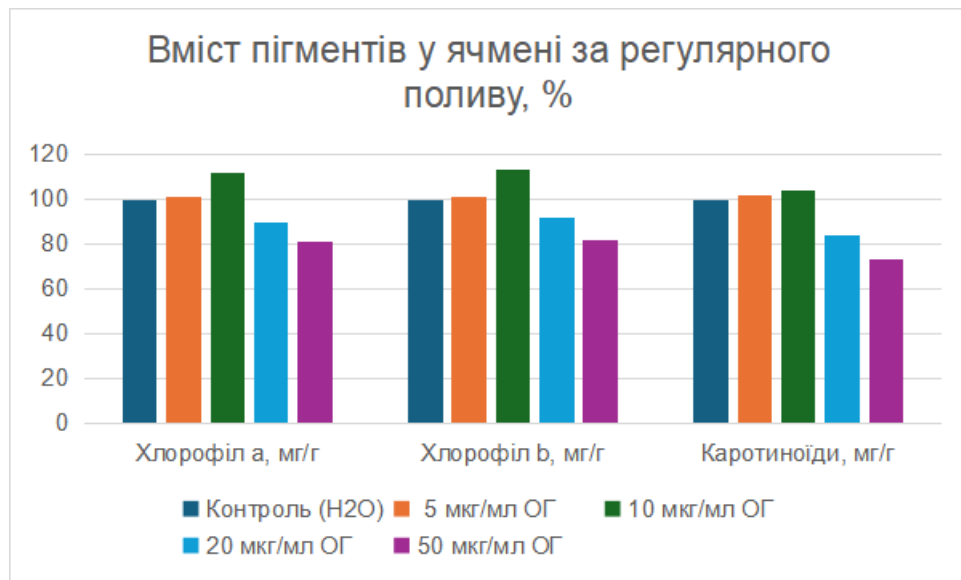


Рис. 3.11. Вміст фотосинтетичних пігментів в озимому ячмені за регулярного поливу та дії ОГ, %

**Вміст пігментів у ячмені озимому за водного дефіциту та дії ОГ
(мг/г)**

Таблиця 3.10

Проби	Хлорофіл а	Хлорофіл b	Каротиноїди
Контроль (H ₂ O)	0,723	0,299	0,754
5мкг/мл ОГ	0,786	0,325	0,752
10мкг/мл ОГ	0,791	0,327	0,764
20мкг/мл ОГ	0,710	0,291	0,654
50мкг/мл ОГ	0,683	0,275	0,610

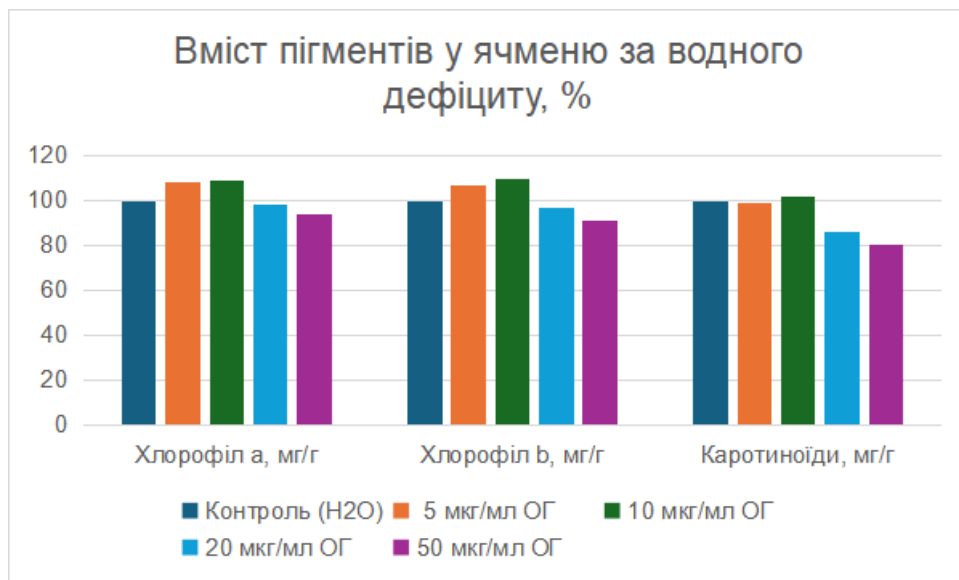


Рис. 3.12. Вміст фотосинтетичних пігментів в озимому ячмені за умов водного дефіциту та дії ОГ, %

У досліджуваній групі рослин за умов регулярного поливу спостерігається збільшення вмісту фотосинтетичних пігментів за концентрацій ОГ 5 та 10 мкг/мл. За концентрації ОГ 10 мкг/мл: вміст хлорофілу а зріс на 12,3%, хлорофілу b на 13 %, а каротиноїди на 4,6%. Відсоток при 5 мкг/мл ОГ був дещо менший: рівень хлорофілу а та

хлорофілу *b* збільшився на 1%, а каротиноїди на 2%. При концентраціях 20 мкг/мл ОГ вміст хлорофілів та каротиноїдів зменшився на 10%, 8,2% та 16%. При 50 мкг/мл відсоток знизився на 19,1%, 18%, 23,4%. Аналіз показників проводився у порівнянні з контролем (Рис. 3.11).

При аналізі вмісту фотосинтетичних пігментів за водного дефіциту, замочування насіння у розчині ОГ за концентрацій 10 мкг/мл також мало найвищі значення, вміст хлорофілу *a* зріс на 9%, хлорофілу *b* на 10,3%, каротиноїдів на 2%. При застосуванні ОГ з концентрацією 5 мкг/мл показники покращилися на 8% та 7,6%, а каротиноїди зменшилися на 1,5% відносно контрольних показників даної групи. При 20 мкг/мл відсоток концентрації пігментів хлорофілу *a*, *b* зменшився на 2 та 3%, у каротиноїдів – на 14%. За 50 мкг/мл ОГ показник знизився на 6, 8 та 20% (Рис.3.12).

Отже, при 10 мкг/мл ОГ спостерігається найбільший показник підвищення дії ОГ, тоді як високі концентрації ОГ (20 та 50 мкг/мл) призводять до зниження рівня фотосинтетичних пігментів, що свідчить про токсичну дію ОГ, внаслідок чого порушується процес фотосинтезу і знижує адаптаційні можливості ячменю за умов водного дефіциту.

В умовах посухи рівень хлорофілів та каротиноїдів знижується, оскільки водний стрес обмежує фотосинтетичні процеси [38]. Високі концентрації ВНЧ можуть мати токсичний вплив на рослини, порушуючи структуру хлоропластів, і як наслідок, зниження здатності до фотосинтезу [39].

3.3 Активність каталази в рослинах озимого ячменю сорту «Достойний» за умов регулярного поливу і водного дефіциту і дії оксиду графену

Каталаза – це внутрішньоклітинний фермент, класу оксидоредуктаз. За допомогою каталази, пероксидаза розщеплюється на воду та кисень, завдяки чому клітина уникає пошкодження. Фермент каталази безпосередньо впливає на утворення органічних речовин у рослині під час реакції фотосинтезу, які у свою чергу знижують рН, що покращує доступність поживних речовин [35].

Результати активності каталази у рослин озимого ячменю сорту «Достойний» за умов регулярного поливу, водного дефіциту та дії ОГ представлено у таблицях (табл. 3.11 та 3.12).

Таблиця 3.11.

Активності каталази за регулярного поливу (мкат/мл)

Проби	Активність каталази
Контроль (H ₂ O)	1727,52
5 мкг/мл ОГ	1728,38
10 мкг/мл ОГ	1786,08
20 мкг/мл ОГ	1056,4
50 мкг/мл ОГ	878,4

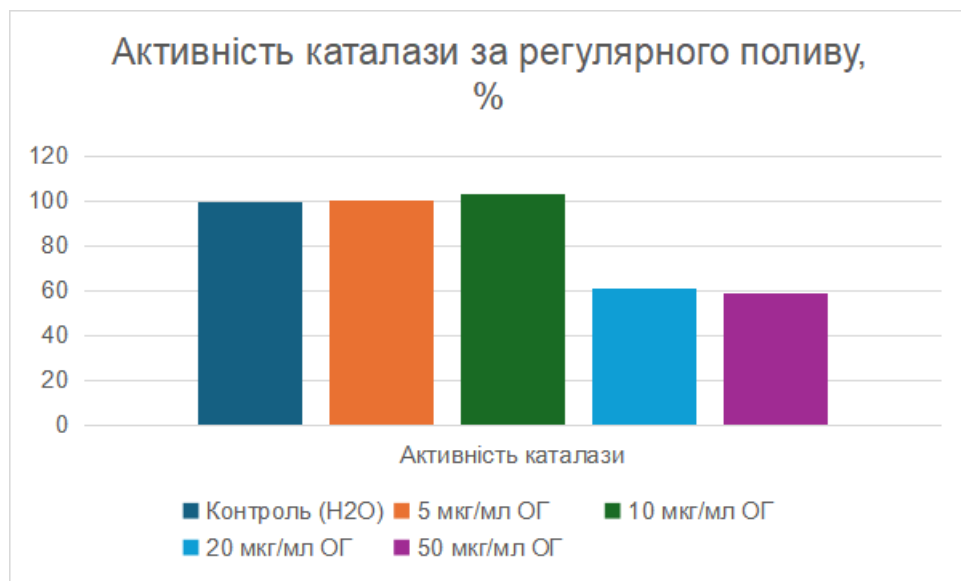


Рис. 3.13. Активність каталази у рослин ячменю озимого за постійного поливу та дії ОГ, %

Таблиця 3.12.

Активність каталази за водного дефіциту (мкат/мл)

Проби	Активність каталази
Контроль (H ₂ O)	1541,92
5 мкг/мл ОГ	1569,56

10 мкг/мл ОГ	1626,7
20 мкг/мл ОГ	1598,24
50 мкг/мл ОГ	1620,08

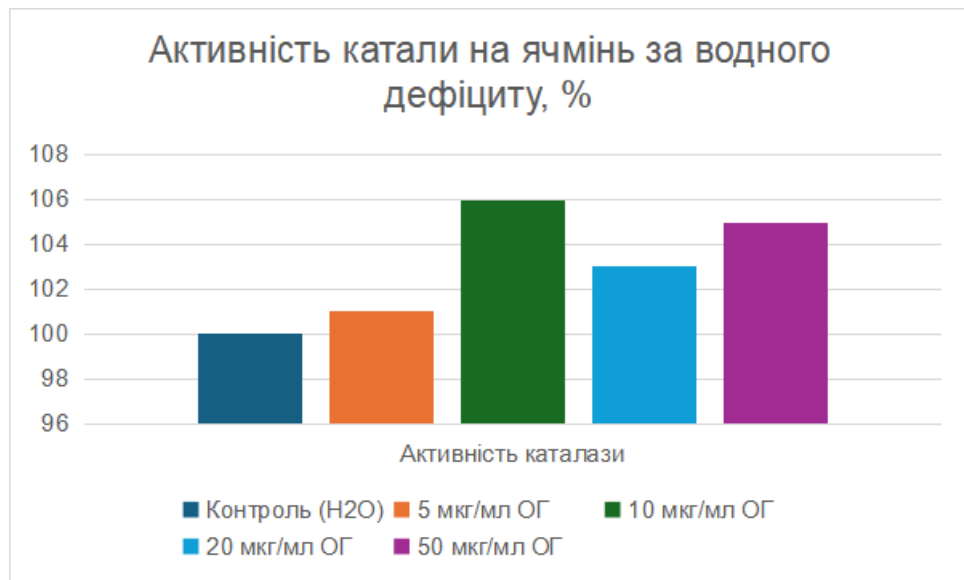


Рис. 3.14 Активність каталази у рослин ячменю озимого за водного дефіциту, %

За умов водного дефіциту, активність каталази загалом збільшилася у порівнянні з контрольними значеннями (контроль без оксиду графену) для всіх концентрацій оксиду графену (ОГ), за винятком концентрації 5 мкг/мл, де спостерігалось лише незначне підвищення.

У групі рослин за регулярного поливу та обробки насіння ОГ за концентрацій 20 і 50 мкг /мл активність каталази значно знижувалася на 40%, відносно контрольних показників (Рис.3.13). Тоді як ОГ за концентрації 5 і 10 мкг/мл не впливав на активність ензиму.

У групі рослин за умов водного дефіциту та оброблених ОГ активність каталази у діапазоні досліджуваних концентрацій відповідала контрольним показникам (Рис.3.14).

Підвищення активності каталази свідчить про наявність окислювального стресу. Зростання її активності може вказувати на активацію механізмів захисту рослини, спрямованих на нейтралізацію оксидативного

пошкодження та зменшення рівня реактивних кисневих форм, що утворюються під впливом стресових факторів [45]. Також зниження активності каталази може бути пов'язано з порушенням клітинних процесів, таких як метаболізм або білковий синтез, що відбувається за умов стресу. Це може знижувати здатність рослин до ефективної боротьби з окислювальними пошкодженнями і знижувати їх стійкість до екологічних стресів [46].

Високі концентрації наночастинок можуть знижувати активність каталази, що призводить до порушення антиоксидантної системи та підвищення рівня окислювального стресу, який негативно впливає на рослини [47].

ВИСНОВКИ

1. Результати дослідження демонструють, що замочування насіння ячменю озимого сорту «Достойний» у розчині ОГ має значний вплив на морфометричні параметри рослин. Найбільш ефективним для посилення росту виявилась концентрація 5 мкг/мл, при якій спостерігався найвищий відсоток росту довжини коренів, особливо в умовах водного дефіциту (44,8%). Даний результат свідчить про потенціал застосування цієї концентрації для адаптації рослин в умовах посухи. Концентрація ОГ 50 мкг/мл мала пригнічувальний ефект на масу ячменю та довжину коренів, особливо в умовах водного дефіциту. Порівняно з умовами регулярного поливу, в умовах посухи дія ОГ виявилася більш ефективною для стимулювання росту коренів, що відкриває можливості для використання цього стимулятора при вирощуванні ячменю в умовах посухи.

2. Найвищий вміст фотосинтетичних пігментів у рослин спостерігався при концентрації ОГ 10 мкг/мл, як за умов регулярного поливу, так і за водного дефіциту. Концентрації ОГ 20 і 50 мкг/мл призводили до зниження рівня хлорофілів і каротиноїдів, що свідчить про токсичний ефект високих доз. Високі концентрації ОГ порушують процеси фотосинтезу, знижуючи адаптаційні можливості ячменю, особливо в умовах стресу. Водночас, середня концентрація ОГ (10 мкг/мл) показала найкращі результати для підтримки фотосинтетичних процесів в умовах водного дефіциту.

3. За умов водного дефіциту, активність каталази в рослинах ячменю зростала у всіх концентраціях ОГ, окрім 5 мкг/мл, де спостерігалось лише незначне підвищення. Посилення активності каталази вказує на процес активації захисних механізмів рослин проти окислювального стресу. За регулярного поливу, високі концентрації ОГ, а саме 20 та 50 мкг/мл значно знижували активність каталази, що може свідчити про токсичну дію ОГ та порушення клітинних процесів і зниження стійкості до стресу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Arnab Mukherjee, Sanghamitra Majumdar, Alia D. Servin, Luca Pagano, OmParkash Dhankher, Jason C. White. Carbon Nanomaterials in Agriculture: A Critical Review. *PlantSci. Sec. FunctionalPlantEcology*. Volume 7 – 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00172>

[2] Zaytseva and Neumann *Chem. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications*. *Biol. Technol. Agric.* 2016. <https://link.springer.com/article/10.1186/S40538-016-0070-8>

[3] Patel KD, Singh RK, Kim HW. Carbon-based nanomaterials as an emerging platform for theranostics. *Mater Horiz.* 2019;6(3):434–469. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/mh/c8mh00966j/unauth>

[4] Chen Zhao, Jun Kang, Yuwen Li, Yan Wang, Xiaoying Tang and Zhenqi Jiang. Carbon-Based Stimuli-Responsive Nanomaterials: Classification and Application. *Cyborg and Bionic Systems*. 2023;4:0022. <https://spj.science.org/doi/10.34133/cbsystems.0022#body-ref-B1>

[5] Hwang HS, Jeong JW, Kim YA, Chang M. Carbon nanomaterials as versatile platforms for biosensing applications. *Micromachines*. 2020;11(9):814. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32872236/>

[6] Roy, Arpita, Gupta, Aaryan, Haque, Benazeer, Qureshi, Absar Ahmed, Verma, Devvret, Sharma, Kuldeep, Lee, Siaw Foon, Hee, Cheng Wan, Roy, Amit and Verma, Rajan. "An updated review on carbon nanomaterials: Types, synthesis, functionalization and applications, degradation and toxicity" *Green Processing and Synthesis*, vol. 13, no. 1, 2024, pp. 20240150. <https://doi.org/10.1515/gps-2024-0150>

[7] Cataldo F., Da Ros T. *Medicinal Chemistry and Pharmacological Potential of Fullerenes and Carbon Nanotubes*. Springer; Berlin/Heidelberg, Germany: 2008. *Carbon Materials in Chemistry and Physics*; Springer Business Science.

<https://www.researchgate.net/publication/252088868> Medicinal Chemistry and Pharmacological Potential of Fullerenes and Carbon Nanotubes

[8] Speranza G. Carbon Nanomaterials: Synthesis, Functionalization and Sensing Applications. *Nanomaterials (Basel)*. 2021 Apr 9;11(4):967. doi: [Carbon Nanomaterials: Synthesis, Functionalization and Sensing Applications - PMC](#)

[9] Mohammed Saleh, Afroz Gul, Abir Nasir, Titus Otamayomi Moses, Yahya Nural, Erdal Yabalak. Comprehensive review of Carbon-based nanostructures: Properties, synthesis, characterization, and cross-disciplinary applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Volume 146. 2025.

Pages 176-212

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1226086X24007913#preview-section-introduction>

[10] Прилуцька Світлана Володимирівна, Ткаченко Тетяна Анатоліївна, Клепко Алла Володимирівна. «ВУГЛЕЦЕВІ НАНОМАТЕРІАЛИ ЯК РЕГУЛЯТОРИ СТРЕСОВІЙКОСТІ РОСЛИН». Видавництво «Baltija Publishing» (2024).

[11] Qinyong Dai, Sunan Xu, Yingquan Peng, Wenli Lv, Lei Sun, Yi Wei. Anomalous photocurrent characteristics in fullerene C60 thin film-based organic field-effect transistors under illumination. *Chemical Physics Letters*. Volume 742. 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009261420300488>

[12] Jun-Lan Xiong, Jun Li, Hang-Chao Wang, Chun-Lei Zhang, Muhammad Shahbaz Naeem. Fullerol improves seed germination, biomass accumulation, photosynthesis and antioxidant system in *Brassica napus* L. under water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. Volume 129. 2018. Pages 130-140 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0981942818302432>

[13] Bakry, B.A.; Sadak, M.S.; Al Ashkar, N.M.; Ibrahim, O.M.; Okla, M.K.; El-Tahan, A.M. The Role of Carbon Nanotubes in Improving Drought Tolerance via Upregulation of the Physiological Processes of Peanut Plants Grown in Sandy Soils. *Agronomy* 2024, 14, 611.

<https://doi.org/10.3390/agronomy14030611>

[14] Safdar, M., Kim, W., Park, S. *et al.* Engineering plants with carbon nanotubes: a sustainable agriculture approach. *J Nanobiotechnol* **20**, 275. 2022. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01483-w>

[15] Atif Khurshid Wani, Zehra Khan, Saikat Sena, Nahid Akhtar, Maha Awjan Alreshdi, Krishna Kumar Yadav, Abdullah M. Alkahtani, AbWaheed Wani, Farida Rahayu, Chendy Tafakresnanto, Evy Latifah, Budi Hariyono, Zainal Arifin, Lienda Bashier Eltayeb. Carbon nanotubes in plant dynamics: Unravelling multifaceted roles and phytotoxic implications. *Plant Physiology and Biochemistry*. Volume 210. 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0981942824002961>

[16] Kumar S, Nehra M, Kedia D, Dilbaghi N, Tankeshwar K, Kim K-H. Nanodiamonds: Emerging face of future nanotechnology. *Carbon*. 2019;143:678-699. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622318310911>

[17] Zhu Y, Li J, Wenxin Li Y, Zhang XY, Chen N, Sun Y, et al. The biocompatibility of Nanodiamonds and their application in drug delivery systems. *Theranostics*. 2012;2(3):302-312. <https://www.thno.org/v02p0302.pdf>

[18] Antal, T.K.; Volgusheva, A.A.; Baizhumanov, A.A.; Kukarskikh, G.P.; Mezzi, A.; Caschera, D.; Ciasca, G.; Lambreva, M.D. Nanodiamond Particles Reduce Oxidative Stress Induced by Methyl Viologen and High Light in the Green Alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Int. J. Mol. Sci.* 2023, 24, 5615. <https://doi.org/10.3390/ijms24065615>

[19] Partho Das, C. Ryan Penton, Paul Westerhoff, François Perreault. Prospects of 2D graphene nanomaterials in plant based agriculture and their fate in terrestrial soil: a critical review. *Environ. Sci.: Nano*, 2023, 10, 2936-2956. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/en/d3en00511a/unauth#!divAbstract>

[20] Kumar V., Kumar A., Lee D.-J., Park S.-S. Estimation of Number of Graphene Layers Using Different Methods: A Focused Review. *Materials*. 2021;14:4590. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34443113/>

- [21] Jiříčková A, Jankovský O, Sofer Z, Sedmidubský D. Synthesis and Applications of Graphene Oxide. *Materials* (Basel). 2022 Jan 25;15(3):920. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8839209/#sec2-materials-15-00920>
- [22] Geim AK. Graphene prehistory. *Phys Scr.* (2012) T146:014003.doi: 10.1088/0031-8949/2012/T146/014003
- [23] Pei S, Zhao J, Du J, Ren W, Cheng H. 2010. Direct reduction of graphene oxide films into highly conductive and flexible graphene films by hydrohalic acids. *Carbon.* 48(15):4466-4474. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.08.006>
- [24] Anegebe, B., Ifijen, I.H., Maliki, M. et al. Graphene oxide synthesis and applications in emerging contaminant removal: a comprehensive review. *Environ Sci Eur* 36, 15 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00814-4>
- [25] Yang, Y.; Zhang, R.; Zhang, X.; Chen, Z.; Wang, H.; Li, P.C.H. Effects of Graphene Oxide on Plant Growth: A Review. *Plants* 2022, 11, 2826. <https://doi.org/10.3390/plants11212826>
- [26] Shulan Zhao, Xiangui Zhu, Mengdi Mou, Ziyuan Wang, Lian Duo. Assessment of graphene oxide toxicity on the growth and nutrient levels of white clover (*Trifolium repens* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Volume 234. 2022. 113399. ISSN 0147-6513, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113399>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014765132200239>)
- [27] Lingyun Chen, Chenglong Wang, Shengnan Yang, Xin Guan, Qiangqiang Zhang, Mengyao Shi, Sheng-Tao Yang, Chunying Chen and Xue-Ling Chang. Chemical reduction of graphene enhances in vivo translocation and photosynthetic inhibition in pea plants. *Environ. Sci.: Nano*, 2019, 6, 1077. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ra/c8ra01753k#!divCitation>
- [28] Andrew S. Ross, Brigid M. Meints, Jordyn S. Bunting. Chapter 16 – Barley. Editor(s): Peter R. Shewry, Hamit Koxsel, John R.N. Taylor. *ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology*. Academic Press. 2023. Pages 153-160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95295-8.00038-1>.

[29] Jones, H., Civián, P., Cockram, J. et al. Evolutionary history of barley cultivation in Europe revealed by genetic analysis of extant landraces. *BMC Evol Biol* 11, 320 (2011). <https://doi.org/10.1186/1471-2148-11-320>

[30] Wang Yonggang , Ren Xifeng , Sun Dongfa , Sun Genlou. Origin of worldwide cultivated barley revealed by NAM-1 gene and grain protein content. *Frontiers in Plant Science*. Volume 6. 2015. DOI=10.3389/fpls.2015.00803<https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2015.00803>.

[31] Yiğit, A.; Chmielewski, F.-M. A Deeper Insight into the Yield Formation of Winter and Spring Barley in Relation to Weather and Climate Variability. *Agronomy* 2024, 14, 1503. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071503>

[32] Samarah NH. Effects of drought stress on growth and yield of barley. *Agronomy for Sustainable Development*. 2005;25:145–149. doi: 10.1051/agro:2004064.<https://www.agronomy-journal.org/articles/agro/abs/2005/01/a03074/a03074.html>

[33] Li F, Chen X, Yu X, Chen M, Lu W, Wu Y, Xiong F. Novel insights into the effect of drought stress on the development of root and caryopsis in barley. *PeerJ*. 2020 Jan 31;8:e8469. doi: 10.7717/peerj.8469. PMID: 32030325; PMCID: PMC6996498.<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6996498/#ref-21>

[34] Nasrabadi H. SomebiochemicalpropertiesofcatalasefromKohlrabi // *J. Biol. Sci.* — 2008. — 8, N 3. — P. 649—653.

[35] Saeed, S.W.Z.; Naseer, I.; Zahir, Z.A.; Hilger, T.; Shahid, S.; Iqbal, Z.; Ahmad, M. Bacillus Strains with Catalase Enzyme Improve the Physiology and Growth of Rice (*Oryza sativa* L.). *Stresses* 2023, 3, 736-748. <https://doi.org/10.3390/stresses3040050/>

[36] Seleiman M.F., Kheir A.M. Saline soil properties, quality and productivity of wheat grown with bagasse ash and thiourea in different climatic zones. *Chemosphere*. 2018;193:538–546. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.053. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

[37] Martínez-Vilalta J., Garcia-Forner N. Water potential regulation, stomatal behaviour and hydraulic transport under drought: Deconstructing the iso/anisohydric concept. *Plant Cell Env.* 2017;40:962–976. doi: 10.1111/pce.12846. <https://doi.org/10.1111/pce.12846>

[38] Thomason W.E., Battaglia M.L. Early defoliation effects on corn plant stands and grain yield. *Agron. J.* 2020;112:1–9. doi: 10.1002/agj2.20402. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/agj2.20402>

[39] Miranda M.T., Da Silva S.F., Silveira N.M., Pereira L., Machado E.C., Ribeiro R.V. Root Osmotic Adjustment and Stomatal Control of Leaf Gas Exchange are Dependent on Citrus Rootstocks Under Water Deficit. *J. Plant Growth Regul.* 2020;285:1–9. doi: 10.1007/s00344-020-10069-5. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00344-020-10069-5>

[40] Wasaya A., Zhang X., Fang Q., Yan Z. Root phenotyping for drought tolerance: A review. *Agronomy.* 2018;8:241. doi: 10.3390/agronomy8110241. <https://www.mdpi.com/2073-4395/8/11/241>

[41] Seleiman MF, Al-Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, Dindaroglu T, Abdul-Wajid HH, Battaglia ML. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants (Basel).* 2021 Jan 28;10(2):259. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7911879/#sec4-plants-10-00259>

[42] Growex Market. Достойний Еліта URL: <https://growex.market/product/dostoyniy-elita>.

[43] Агроексперт-Трейд. Насіння ячменю озимого, сорт «Достойний». URL: <https://agroexp.com.ua/uk/semena-yachmenya-ozimogo-sort-dostoynyiy>.

[43] Chaves MM, Oliveira MM. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *J Exp Bot.* 2004 Nov;55(407):2365-84. doi: 10.1093/jxb/erh269. Epub 2004 Oct 8. PMID: 15475377

[44] Zhu, Y., Zhang, H., Wang, S., & Zhou, X. (2016). Effects of graphene oxide nanoparticles on plant growth and development. *Environmental Science and*

Pollution Research, 23(12), 12433-12441.

<https://www.researchgate.net/publication/370252529> Effects of Graphene Oxide on the Growth and Photosynthesis of the Emergent Plant *Iris pseudacorus*

[45] Leung, David.. Studies of Catalase in Plants Under Abiotic Stress. (2018)10.1007/978-3-319-75088-0_2.

<https://www.researchgate.net/publication/323679604> Studies of Catalase in Plants Under Abiotic Stress

[46] Hasanuzzaman M, Bhuyan MHMB, Parvin K, Bhuiyan TF, Anee TI, Nahar K, Hossen MS, Zulfiqar F, Alam MM, Fujita M. Regulation of ROS Metabolism in Plants under Environmental Stress: A Review of Recent Experimental Evidence. *Int J Mol Sci.* 2020 Nov 18;21(22):8695. doi: 10.3390/ijms21228695. PMID: 33218014; PMCID: PMC7698618.

[47] Sun, W., et al. Nanoparticles in plant growth and development: A review of the effects of metal-based nanoparticles on plants. *Science of the Total Environment.* (2019). 686, 665-676.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749123012241>

[48] Kong H, Meng X, Akram NA, Zhu F, Hu J, Zhang Z. Seed Priming with Fullerol Improves Seed Germination, Seedling Growth and Antioxidant Enzyme System of Two Winter Wheat Cultivars under Drought Stress. *Plants (Basel).* 2023 Mar 22;12(6):1417.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10052877/>

[49] AgroApp.. Winter barley. (2024) <https://agroapp.com.ua/wp-content/uploads/2024/03/winter-barley.jpg>

[50] Tetra Agro. Вирощування та збирання ячменю: секрети успіху [https://tetragro.com.ua/news/viroshhuvannya_ta_zivlennya_yacmenyu_sekreti_uspихu](https://tetragro.com.ua/news/viroshhuvannya_ta_zbiirannya_yacmenyu_sekreti_uspихu)

[51] PNGegg. (n.d.). Хімічна структура хлорофілу А. <https://e7.pngegg.com/pngimages/485/366/png-clipart-chlorophyll-a-chemistry-chemical-structure-chlorophyll-b-plant-angle-white-thumbnail.png>

[52] Sigma-Aldrich. Хімічна структура хлорофіла b
<https://www.sigmaaldrich.com/deepweb/assets/sigmaaldrich/product/structures/353/129/663cbdf3-d4c0-4ab5-b849-e9e51b40dcc6/640/663cbdf3-d4c0-4ab5-b849-e9e51b40dcc6.png>

[53] Chemiday. (n.d.). Хімічна структура α -каротину.
https://chemiday.com/_ld/1/42099391.png