

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології**

**ПОГОДЖЕНО**

**Декан факультету**

**захисту рослин, біотехнологій та екології**

\_\_\_\_\_ **Коломієць Ю.В.**

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

**Завідувач кафедри**

**фізіології, біохімії рослин та**

**біоенергетики**

\_\_\_\_\_ **Прилуцька С.В.**

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему «Вплив нанопраймування насіння карбоновими наночастинками на морфометричні показники сої звичайної (*Glycine max.*) в умовах посухи»**

Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

**Гарант освітньої програми**

**к.б.н., доцент**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Кваско О.Ю.**

**Керівник кваліфікаційної роботи**

**к.б.н., доцент**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Ткаченко Т.А.**

**Виконала**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Павлючук А.О.**

**КИЇВ - 2025**

**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**  
\_\_\_\_\_ **Прилуцька С.В.**  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ **2025р.**

**ЗАВДАННЯ**

**НА ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

**Павлючук Анастасії Олександрівні**

Спеціальність «162 Біотехнологія та біоінженерія»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) «Вплив нанопраймування насіння карбоновими наночастинками на морфометричні показники сої звичайної (*Glycine max.*) в умовах посухи» затверджена наказом ректора НУБіП України від “22” жовтня 2024р. №1880

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 20 травня 2025 р.

Вихідні дані до роботи: вуглецеві наночастинки; морфофізіологічні показники сільськогосподарських культур; рослини сої звичайної (*Glycine max.*).

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

- Літературний огляд та збір інформації за темою дипломної роботи;
- Написання основної частини;
- Формулювання висновків та рекомендацій;

- Оформлення дипломної роботи;
- Перевірка дипломної роботи керівником;
- Виправлення недоліків;
- Захист дипломної роботи.

#### 5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв
1	Ткаченко Т.А.		
2	Ткаченко Т.А.		
3	Ткаченко Т.А.		

6. Дата видачі завдання 1 вересня 2024 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної бакалаврської роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Літературний огляд та збір інформації за темою дипломної роботи;		
2	Написання основної частини;		
3	Формулювання висновків та рекомендацій;		
4	Оформлення дипломної роботи;		
5	Перевірка дипломної роботи керівником;		
6	Виправлення недоліків;		
7	Захист дипломної роботи.		

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Павлючук А.О.

Керівник бакалаврської  
кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_

Ткаченко Т.А.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Вплив нанопраймування насіння карбонними наночастинками на морфометричні показники сої звичайної (*Glycine max.*) в умовах посухи»: 50 с., 2 таблиці, 13 рисунків, 32 літературних джерела.

**Мета дослідження:** встановити вплив праймування насіння оксидом графену на морфофізіологічні показники сої звичайної (*Glycine max.*) в умовах модельованої посухи.

**Об'єкт дослідження:** морфофізіологічні показники сої звичайної (*Glycine max.*) за дії карбонних наночастинок в умовах модельованої посухи.

**Предмет дослідження:** праймування, оксид графену, морфофізіологічні показники рослин сої звичайної (*Glycine max.*).

**Методи дослідження:** фізіологічні (визначення морфометричних показників рослин, вмісту пігментів - хлорофіл *a* і *b*, каротиноїдів), біохімічні (активність каталази) та статистичні (обробка та візуалізація результатів).

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....</b>	<b>7</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Поняття про вуглецеві наноматеріали та їх вплив на рослину .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Оксид графену (GO; ГО; C<sub>140</sub>H<sub>42</sub>O<sub>20</sub>): використання та вплив на рослину .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3. Загальна характеристика сої звичайної (<i>Glycine max.</i>) .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3.1. Загальні відомості .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3.2. Ботанічно-морфологічний опис культури .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3.3. Технологічний процес вирощування культури .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3.4. Харчова та комерційна значимість .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. Негативний вплив посухи на рослини.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4.1. Вплив посухи на морфометричні показники рослин.....</b>	<b>19</b>
<b>1.4.2. Вплив посухи на вміст фотосинтетичних пігментів та каротиноїдів у рослин .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.3. Вплив посухи на каталазну активність у рослин .....</b>	<b>22</b>
<b>РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Об'єкт дослідження та його характеристика .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2. Передпосівна підготовка та умови вирощування.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4. Методика визначення каталазної активності .....</b>	<b>30</b>
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. Схожість насіння сої за праймування оксидом графену.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2. Морфометричні показники сої за дії посухи та нанопраймування..</b>	<b>33</b>
<b>3.3. Аналіз вмісту пігментів (хлорофілів <i>a</i> і <i>b</i> та каротиноїдів) за дії посухи та нанопраймування оксидом графену .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4. Активність каталази у рослинах сої за дії посухи та нанопраймування оксидом графену.....</b>	<b>40</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>42</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>44</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>48</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

ВНМ - вуглецеві наноматеріали;

GO, ГО - оксид графену;

ВНЧ - вуглецеві наночастинки;

врГО - водорозчинний графен оксид;

ROS - активні форми кисню;

CAT - каталаза.

## ВСТУП

**Актуальність дослідження:** Кліматичні зміни призводять до зростання інтенсивності посух, що суттєво впливає на врожайність сільськогосподарських культур, включаючи сою, яка є важливою олійною та білковою культурою. Пошук ефективних методів підвищення стійкості рослин є пріоритетним завданням для забезпечення продовольчої безпеки. Використання нанотехнологій у сільському господарстві є перспективним напрямом, який дозволяє поліпшити ріст та розвиток рослин, адже карбонові наночастинки сприяють посиленню стійкості до стресових факторів у рослин.

Потенціал сучасних нанотехнологій при інтеграції у сфері рослинництва:

1. Створення та застосування добрив та засобів захисту рослин на основі карбонових наноматеріалів;
2. Загальне скорочення обсягів агрохімікатів завдяки впровадженню препаратів на основі карбонових наноматеріалів;
3. Посилення стійкості сільськогосподарських культур до дії абіотичних стресів та підвищення продуктивності рослин за допомогою використання добрив та стимуляторів росту рослин на основі карбонових наноматеріалів.

**Метою дослідження** було дослідження впливу оксиду графену на морфологічні та фізіологічні характеристики сої звичайної (*Glycine max.*).

**Об'єктом дослідження** були морфологічні та фізіологічні показники сої звичайної (*Glycine max.*) за праймування насіння наночастинками оксиду графену та моделювання посухи.

**Предметом дослідження** були молоді пагони сої звичайної (*Glycine max.*) та їх морфологічні та фізіологічні показники.

**Методи дослідження:** фізіологічні (оцінка морфометричних параметрів), спектрофотометричні (проведення визначення вмісту пігментів – хлорофілу а, хлорофілу b, каротиноїдів та активності каталази) та методи статистичної обробки отриманих даних.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1 Поняття про вуглецеві наноматеріали та їх вплив на рослину

Вуглецеві наноматеріали (ВНМ) - це карбонові елементи та їх суміші, розміри яких знаходяться у діапазоні до 100 нм. Частинки таких розмірів проявляють особливі механічні, каталітичні та адсорбційні характеристики, оскільки їх властивості визначаються законами квантової механіки. Вуглецеві наноматеріали таких розмірів демонструють нові фізико-хімічні характеристики, зокрема специфічну поверхневу конформацію та високу хімічну активність. Такі характеристики суттєво відрізняються від властивостей матеріалів у звичайному (макроскопічному) стані і ці відмінності здебільшого зумовлені змінами форми агломератів, структури поверхні та малими розмірами частинок [1].

Вуглецеві наноматеріали набули свого розповсюдження через властивості вуглецю до полімеризації на атомному рівні із подальшим утворенням довгих вуглецевих ланцюгів. Упродовж останніх десятиліть ХХ століття список відомих алотропних форм вуглецю значно поповнився завдяки відкриттю нових низьковимірних структур, серед яких вуглецеві нанотрубки (ВНТ), фулерени та графени, що привернули значну увагу науковців та різних сфер промисловості. Ці матеріали володіли унікальними та винятковими властивостями, що відкрили їм шлях до широкого використання у різних сферах науки та техніки [2].

Найбільше поширення отримали такі вуглецеві наноматеріали (ВНМ) як графен, графену оксид (ГО), фулерен (C<sub>60</sub>), фулероли, вуглецеві наноточки (ВНТЧ), вуглецеві нанотрубки (ВНТ), флуоресцентні вуглецеві точки (ФВТЧ) та інші. Кількість відомих ВНМ постійно зростає завдяки дослідженням хіміків, біологів та матеріалознавців, які займаються синтезом та дослідженнями можливостей застосування нових матеріалів з урахуванням їх властивостей. Взаємодія ВНМ із рослинами може спричинити різноманітні фізіологічні зміни, які залежать від характеристик наноматеріалів: розміру, форми, конформації, електричного заряду, хімічного складу, активності, поверхневих властивостей та

концентрації. Ефективність впливу певного виду ВНМ змінюється залежно від виду рослини і характеру взаємодії значною мірою визначається концентрацією наноматеріалу [3].

Велика кількість дослідних робіт свідчить про позитивну динаміку стимулювання проростання насіння, активізацію росту вегетативних органів рослин, подовження та розгалуження кореневої системи, поліпшення біохімічного складу, підвищення ферментативної активності, активацію захисних механізмів, відповідальних за пригнічення активності ферментів окислювання, інтенсифікацію фотосинтетичних процесів та загальне покращення метаболічних функцій, що сприяють підвищенню врожайності [4]. Багато досліджень підтверджують здатність карбонових наночастинок проникати в рослинні організми через кореневу систему симпластичним та апопластичним шляхами з подальшим транспортуванням судинною системою, зокрема через ксилему [5].

Окрім цього, вуглецеві наноматеріали позитивно впливають на властивості ґрунту, сприяючи збереженню його структури за рахунок контрольованого вивільнення поживних речовин, поліпшують здатність ґрунту до вологоутримання, збільшують ефективність засвоєння елементів живлення рослинами стабілізують значення рН [6].

Незважаючи на низку позитивних властивостей карбонових наночастинок, є припущення щодо їх потенційно токсичності, зокрема їхнє накопичення може призводити до утворення активних форм кисню і, як наслідок, появи некротичних змін. Отже, у зв'язку з вищеперерахованими аспектами виникає потреба у поглибленому вивченні механізмів взаємодії карбонових наночастинок з організмами рослин. Актуальними у подальшому можуть стати дослідження довгострокового впливу цих наноматеріалів на здоров'я людей, які споживають рослини, вирощені за допомогою засобів на основі наночастинок, а також на стан довкілля і мікробіоту ґрунту [7].

## 1.2 Оксид графену (GO; ГО; $C_{140}H_{42}O_{20}$ ): використання та вплив на рослину

Оксид графену (GO) (рис. 1.2.) є представником сімейства графену, продуктом його окиснення, що є каркасним вуглецевим наноматеріалом з 2D-структурою та високою питомою активністю поверхні, яка утворена шарами графіту, краї яких містять функціональні кисневі групи. Потенціальними сферами для використання ГО є медицина, промисловість і будівництво, а також сільське господарство, зокрема рослинництво [8].



Рис 1.2. ТЕМ колоїдної частинки оксиду графіту [8]

Механізм, який сприяє активнішому проростанню посадкового матеріалу може полягати у здатності ГО проникати у покривні оболонки насіння, що полегшує поглинання води та призводить до пришвидшеного проростання, оскільки кисневмісні функціональні групи ГО збирають молекули води і гідрофобні домени транспортують їх до насінневих покривів [9].

Окрім активації проростання насіння, було виявлено, що ГО у невеликих кількостях сприяє росту рослинних пагонів та значно збільшує біомасу стебла та листя [10].

Низка досліджень стверджує, що присутність ГО сприяє прискоренню проростання насіння. Важливим аспектом є залежність інтенсивності впливу ГО

від виду рослин. Таким чином було виявлено, що для стимуляції проростання насіння костриці очеретяної (*Festuca arundinacea*) оптимальною дозою ОГ є 0,2 мг/л за якої активність проростання значно зросла [11].

У науковому дослідженні, присвяченому вивченню впливу оксиду графену на проростання та ранній розвиток пшениці ярої (*Triticum aestivum L.*), було встановлено чітку дозозалежну реакцію рослин на дію наночастинок. Таким чином, при використанні концентрацій ОГ у межах концентрацій 50-100 мг/л спостерігалась стимуляція ростових процесів дослідних зразків у вигляді подовження та розгалуження кореневої системи та вегетативної частини рослин, а також підвищувалась активність ферментів антоксидантного стресу, зокрема каталази (CAT), що є наслідком поліпшення адаптивних механізмів рослин до абіотичних чинників середовища. Натомість за умови застосування вищих доз ОГ у межах концентрацій 500-1000 мг/л, були виявлені ознаки фітотоксичності, зменшення біомаси та кількості хлорофілу, пригнічення росту та зміни морфології кореневої системи піддослідних зразків; у рослин відзначалось підвищення показників вмісту перекису водню як маркеру окисного стресу, який є сигналом порушення клітинного гомеостазу. Автори зробили припущення про потенційний біостимулюючий ефект ОГ за його використання у низьких концентраціях, проте свідчать про токсичний ефект при перевищенні оптимального дозування [12].

У дослідженні, присвяченому вивченню впливу ОГ на ріст і розвиток дослідних рослин ріпаку звичайного (*Brassica napus L.*), було встановлено, що обробка посадкового матеріалу ОГ у межах концентрацій 25-100 мг/л призводить до значного зменшення довжини первинного кореня порівняно з контрольними зразками. Рослини, що піддавались обробці ОГ у концентраціях 50-100 мг/л спостерігалося зменшення маси кореневої системи. Обробка насіння ОГ при дозуванні 50 мг/л збільшувала експресію генів, що контролюють біосинтез абсцизової та індол-3-оцтової кислот, що свідчило про активацію захисної відповіді рослини на дію наночастинок та, як наслідок, створення

фітотоксичного ефекту за умови перевищення гранично допустимого дозування [13].

### 1.3. Загальна характеристика сої звичайної (*Glycine max.*)

#### 1.3.1. Загальні відомості

Соя звичайна або щетиниста (*Glycine max.*) (рис. 1.3.1.) є однорічною дводольною трав'янистою культурою родини бобових (*Fabaceae*), роду *Glycine*, який налічує у собі близько 40 видів. Наймасштабніше значення для виробництва та розповсюдженість має вид сої культурної (*Glycine hispida L.*), який містить 6 підвидів. За зовнішнім виглядом подібна до квасолі та є однією із найдавніших культур, вживаних у їжу.

Як представник однорічних рослин, соя завершує свій життєвий цикл протягом одного вегетаційного періоду, під час якого рослина формує глибоку кореневу систему стрижневого типу, що може досягати до 2 метрів. Рослини сої досягають висоти від 20 см до 2 метрів, в залежності від сорту та умов вирощування. Особливістю сої, як і багатьох представників родини бобових, є здатність до симбіотичних відносин з ґрунтовими бактеріями роду *Bradyrhizobium*, які дозволяють рослині фіксувати атмосферний азот [14].



Рис. 1.1. Соя звичайна (*Glycine max.*) [15];

Соя посідає чільне місце серед світових культур, оскільки є багатофункціональною культурою, яку широко використовують у харчовій

(виробництво олії, борошна, рослинних замінників м'ясних та молочних продуктів), енергетичній (виготовлення біопалива), фармацевтичній (використання фітогормонів у виробництві БАДів та косметології через їх антиоксидантні властивості) та агроекологічній (використання як сидеративної культури за рахунок симбіозу кореневої системи рослини з бульбочковими бактеріями) галузях, а також у сфері виготовлення комбікормів та шроту для тваринництва [16].

### 1.3.2. Ботанічно-морфологічний опис культури

Коренева система сої стрижнева і добре розвинена, представлена грубим, відносно недовгим головним коренем та бічними більш тонкими та довгими коренями, що можуть сягати довжини до 2 м. У ризосфері представників виду у радіусі 6-10 см формується симбіотичний комплекс, представлений нітрифікуючими бактеріями, зокрема *Bradyrhizobium*, що утворюють характерні бульбочки на поверхні коренів, здатні до фіксації азоту. Бульбочки мають кулеподібну форму, діаметром досягають до 8 мм. На кореневій системі однієї рослини можуть сформуватись близько 60 бульбочок.

Висота стебла різних сортів сої може варіюватись у межах від 20 см, що притаманне карликовим сортам, до 2 м, яку можна спостерігати у високорослих сортів. Стебло грубе і товсте, має діаметр близько 13 мм, має прямостоячу або сланку форму, дещо витке та утворює гілки. Висота кріплення нижніх гілок- до 25см. Здатне до кущування різної форми щільності. Характерним для сої є опушення стебла та гілок, наявність білих, світло-жовтих або бурих м'яких волосків.

Листки- складні, на черешку утворюється три, іноді п'ять листочків, що мають малі прилистки та почергове розміщення. Форма листків частіше за все овальна із загостреними кінцями, завдовжки 15-16 см, шириною до 10 см. Примордіальні листки мають супротивне розміщення. Кількість листків однієї рослини варіюється в залежності від умов вирощування, зволоженості та сорту і

налічує до 180 штук. Більшість сортів мають здатність до опадання листя при настанні досягання плодів.

Соя є самоzapильною культурою, у якої перехресне запилення є рідкісним. Квітки дрібні, із п'ятизубчастою чашечкою та п'ятипелюстковим віночком. Квітки мають біле або фіолетове забарвлення. Маточка містить 10 тичинок. Квітки мають пазушне розміщення на квітконіжках утворенням суцвіть, що можуть містити від 2 до 20 кіток. Квітки не мають характерного аромату, оскільки є самоzapильними, відповідно, участь комах-запилювачів не є потрібною в процесі розмноження цієї культури. Приймочка маточки має розширення з плоским верхом, у зав'язі розвивається декілька насінневих зачатків.

Плодом *Glycine max.* є дводольний біб, що має з'єднання із двох поздовжніх швів. Боби завдовжки 3-8 см дещо зігнуті, опуклі, світло-жовтого або коричневого кольорів, мають опушення і дзьобик гострої форми на кінці. Біб має здатність розкриватись, а стулки скручуватись при його досягання, тим самим даючи насінню висипатись. У середньому біб містить 3-4 насінини.

Насіння має округлу або овальну форму, розмірів від 5 до 9 мм; жовтого, коричневого, чорного забарвлення, серед деяких сортів поширена пігментація темно-коричневого кольору [17].

### **1.3.3. Технологічний процес вирощування культури**

*Glycine max.* є багатофункціональною культурою, що поєднує продовольче, біоенергетичне, кормове та лікувальне значення, потенціал якої важко переоцінити. Протягом тривалого часу соя залишається однією з провідних стратегічних культур у світовій аграрній практиці. Упродовж останніх десятиліть спостерігається суттєве зростання попиту на продукцію на основі сої. Культивування та вирощування сої має низку економічних та агротехнічних особливостей.

Первинний та основний обробіток ґрунту для посіву сої має такі важливі етапи агротехнічного комплексу як знищення бур'янів, створення оптимальних

умов проростання та розвитку рослин у вигляді покращення фізичної (зорювання територій посіву) та хімічної структури ґрунту (внесення добрив). Напрямок та технологічні параметри цих процесів залежать від кліматичних умов, типу культури-попередника, вирощуваного на даній території, ступеня засміченості поля, якості ґрунту тощо.

Першочерговим етапом посіву є лушення стерні - поверхневий обробіток на глибину 6–12 см, що здійснюється безпосередньо після збирання попередньої культури. Його своєчасне проведення сприяє збереженню ґрунтової вологи, пригніченню бур'янів та прискоренню мінералізації рослинних решток. Затримка з виконанням цього заходу може призвести до надмірного засмічення посівів у наступному вегетаційному періоді. Для лушення використовують дискові та лемішні агрегати, які агрегуються з тракторами відповідної потужності.

Наступним етапом є оранка, що забезпечує глибоке розпушення орного шару. Глибина оранки коригується залежно від типу ґрунту та попередника. Для проведення цього заходу застосовують плуги різних модифікацій, здатні забезпечити якісне обертання пласта та загортання рослинних решток.

Для забезпечення високої врожайності сої доцільним є комплексне застосування агрономічних заходів, зокрема - раціональний вибір мінеральних добрив у рекомендованих нормах, використання інокулянтів, мікроелементів та біологічно активних речовин та препаратів на основі наночастинок, які стимулюють ріст рослин. На ґрунтах із підвищеною кислотністю необхідне проведення вапнування для нейтралізації кислотності та поліпшення умов засвоєння поживних речовин. Інокуляція бульбочковими бактеріями сприяє біологічній фіксації атмосферного азоту, що дозволяє підвищити врожайність культури на 2,0–4,5 ц/га.

Оптимальним температурним режимом для проростання насіння є діапазон +15...+20 °С, коли як для вегетації і цвітіння та формування бобів необхідна температура +18...+27 °С та +20...+22 °С відповідно [17].

Після збирання врожаю насіння сої підлягає обов'язковому очищенню від домішок і ретельному сушінню до рівня вологості 12–14%. Вміст чистого насіння повинен становити не менше 95 %. Процес сушіння потребує дотримання чітких технологічних норм, так як високі температури можуть пошкодити насінневу оболонку та вплинути на подальшу схожість насіння [18].

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

Україна посідає провідне місце серед країн-виробників сої за кількістю зареєстрованих сортів. За весняну посівну 2024 року площі посівів сої в Україні становили 2,03 млн га, що демонструє збільшення площі посівів на 9,8 % (майже на 200 тис. га) у порівнянні з 2023 роком, де було зібрано 1,84 млн га сої [19].

Україна й надалі зберігає статус перспективного експортера для країн Європейського Союзу, що зумовлено її географічною наближеністю до ринку збуту. Незважаючи на наявні логістичні труднощі, обидві сторони активно вживають заходів для їхнього подолання, що сприяє збереженню ділової активності в аграрному секторі. Актуальні економічні та виробничі умови в Україні свідчать про ймовірне зростання інтересу агровиробників до вирощування олійних культур, зокрема сої, що частково зумовлено змінами у структурі посівних площ після зменшення виробництва зернових. Так, у червні 2023 року обсяги експорту сої з України перевищили 200 тис. тон. Хоча це й дещо менше порівняно з травневими показниками, загальний обсяг свідчить про стабільний попит на українську продукцію. У 2022 році посівні площі під сою в Україні перевищили 1,5 млн гектарів, що дало змогу зібрати урожай на рівні 3,7 млн тон, тобто на 7 % більше порівняно з попереднім роком. Зважаючи на стратегічну роль сої як джерела протеїну для європейського ринку, ці показники підкреслюють її ключове значення у системі продовольчої безпеки [20].

Наразі на державному рівні затверджено 62 сорти, які характеризуються різною тривалістю вегетаційного періоду - від 70 до 130 днів. Залежно від тривалості вегетації, сорти класифікуються як ультраскоростиглі, дуже

скоростиглі, скоростиглі та середньостиглі. Потенційна врожайність сортів варіюється в межах 18–38 ц/га.

Норма висіву визначається біологічними особливостями конкретного сорту і становить у середньому 400–700 тис. життєздатних насінин на гектар. У разі вирощування на зрошуваних землях норма висіву збільшується на 20–25 % [18].

У країнах, що не належать до азійського регіону, спостерігається зростаючий попит на продукти з сої. Їхня функціональна універсальність сприяє легкому інтегруванню до раціонів західного типу, забезпечуючи ефективний спосіб використання поживного потенціалу бобових культур, які традиційно мають обмежене застосування в країнах Північної Америки та Європи. На відміну від інших представників родини бобових, соя характеризується специфічним макроелементним складом. Зокрема, її білки мають вищу біологічну цінність, а сама культура є джерелом незамінних жирних кислот. Соевий білок, крім високої поживної якості, демонструє гіпохолестеринемічні властивості - знижує рівень ліпопротеїнів низької щільності у крові, а також може сприяти помірному зниженню артеріального тиску. Використання соєвих продуктів як альтернативи традиційним джерелам білка у західних дієтах сприяє позитивній трансформації жирнокислотного профілю раціону, що може мати додаткові переваги для серцево-судинного здоров'я [21].

#### **1.4. Негативний вплив посухи на рослини**

У зв'язку зі зміною кліматичних умов упродовж останніх десятиліть, спостерігається реєстрація аномально високих температур протягом року на територіях, яким вони не притаманні, зокрема на території України. Одним із наслідків аномально високих температурних режимів є посуха, що завдає непоправної шкоди рослинництву та сільськогосподарській галузі. Засушливі умови мають негативний вплив на рослинність, несучи за собою низку серйозних проблем, які мають колосально велику зону впливу, починаючи від погіршення родючості ґрунтів до загрози знищення лісів і, як наслідок, дисбалансу екосистем [22].

Рослини, які є біологічними системами, чутливо реагують на зміни кліматичних умов, серед яких посуха є одним із найсуттєвіших абіотичних стресорів, що негативно впливають на їхній ріст, розвиток та метаболізм. В умовах водного дефіциту, спричиненого недостатнім зволоженням ґрунту, у рослин порушується водний баланс, що може зумовлювати пригнічення фізіологічних процесів, зниження родючості культур, передчасне опадання листя і загибель.

Окрім безпосереднього впливу на рослинний організм, посуха становить загрозу для збереження біорізноманіття, оскільки окремі, особливо чутливі види, можуть не мати здатності швидкої адаптації до змінених кліматичних умов.

Також водний дефіцит може призводити до деградації ґрунтового покриву через зміну його структурної цілісності та розвитку ерозійних процесів, які зменшують родючість і порушують стабільність природних екосистем.

Збереження рослинного покриву є важливим чинником підтримки екологічної рівноваги. Усвідомлення негативного впливу абіотичних факторів середовища, зокрема посухи, на рослини є необхідною умовою для формування адаптаційних заходів і розробки ефективних стратегій пом'якшення наслідків кліматичних стресів у природних і агроекосистемах [23].

#### **1.4.1. Вплив посухи на морфометричні показники рослин**

Водний дефіцит для рослин, спричинений посухою має серйозний вплив на біомасу, форму та розмір рослинних органів, оскільки такі зміни можуть бути наслідками адаптаційної відповіді організму на дію абіотичного стресу.

Однією з основних адаптаційних змін рослинного організму до посушливих умов є подовження та розгалуження кореневої системи, адже довгі корені дозволяють рослинам здійснювати доступ до вологи на глибших шарах ґрунту. Рослини, що здатні до розвитку довгої кореневої системи, є посуховитривалішими та краще переносять водний стрес.

Рослини реалізують механізми уникнення посухового стресу шляхом зменшення втрати вологи, зокрема через закриття продихів, зниження інтенсивності поглинання світла, а також зменшення листкової поверхні крони. Крім того, адаптаційні процеси включають покращення водозабезпечення за рахунок розширення кореневої системи, перерозподіл поживних речовин з відмираючого листа, а також підвищення ефективності фотосинтетичних процесів [24].

У одному із досліджень, присвяченому впливу засухи на представників популяції дубу Бранта (*Quercus brantii*) та їх морфометричні показники насіння здорових дерев перського дуба було зібрано методом випадкової вибірки з природних популяцій у районах Чегені (провінція Лурестан, Іран) та Меласі (провінція Ілам, Іран). Після пророщування отримано 240 сіянців зі схожими початковими розмірами, які було піддано впливу різних рівнів водного дефіциту. Сіянци з популяції Чегені характеризувалися більшим діаметром стебла порівняно з популяцією Меласі.

Умови контрольованого зрошення та помірного водного стресу не призвели до істотних змін діаметра стебла у жодній з груп. Проте за умов сильного дефіциту вологи спостерігалось суттєве зменшення діаметра стебел у сіянців Чегені, тоді як у сіянців Меласі таких змін не виявлено. Висота рослин в обох популяціях істотно знижувалася зі зростанням інтенсивності стресу, особливо за умов сильного посухового навантаження.

Суттєве зменшення загальної біомаси внаслідок посухи було характерне лише для популяції Чегені, у той час як біомаса сіянців Меласі залишалася відносно стабільною. Водночас у контрольних умовах рослини Чегені демонстрували вищу біомасу порівняно з Меласі. Зниження біомаси в умовах сильного стресу у Чегені вказує на їхню меншу стійкість до посухи.

Отримані результати свідчать про адаптивні особливості популяцій: рослини з регіонів з високим рівнем опадів (Чегені) виявляють меншу стійкість до водного дефіциту, ніж популяції, сформовані в умовах обмеженого

водозабезпечення (Меласі), що свідчить про їхню вищу адаптацію до аридного середовища [25].

#### **1.4.2. Вплив посухи на вміст фотосинтетичних пігментів та каротиноїдів у рослин**

Посушливі умови, що є значним абіотичним стресом, завдає вплив на важливі життєві фактори та функціонування рослинних організмів. До таких аспектів належить динаміка вмісту пігментів, таких як хлорофіл *a* та *b*, а також каротиноїдів, від яких напряду залежить перебіг фізіологічних процесів та життєдіяльність рослин.

У науковому дослідженні, присвяченому вивченню впливу посухового стресу на вміст пігментів у рисі (*Oryza sativa*), на основі отриманих результатів, були сформовані висновки, що такий абіотичний фактор спричиняє зниження вмісту пігментів у біомасі рослини. Таким чином вміст хлорофілу *a* знизився на 11,2-61,6% протягом перших 12 днів досліду. Кількість хлорофілу *b* також зазнала зниження на 21,4%, яке спостерігалось на 6 день досліду, яке прогресувало до завершення експериментальної роботи. Водночас співвідношення хлорофілу *a/b* зменшилось у діапазоні 18,2-58,5% протягом 12 діб. Вплив посухи на вміст каротиноїдів у дослідній культурі також був негативний: протягом 3-12 дня дослідів їх вміст зменшився у діапазоні 0,41-32,7% [26].

Таким чином, отримана у ході досліджень інформація щодо динаміки вмісту фотосинтетичних пігментів та каротиноїдів у біомасі рослин, є важливим аспектом та підґрунтям для подальших досліджень у цій сфері, зокрема для розробки стратегій з адаптації рослин та селекційної роботи над посухостійкими та посуховитривалими сортами харчових культур.

### 1.4.3. Вплив посухи на каталазну активність у рослин

Каталаза є одним із найважливіших ензимів, що бере участь у розкладанні перекису водню у клітинах рослинного організму. Вплив посухового стресу на каталазну активність має наслідки не тільки у біохімічних процесах, а також процесах метаболізму, фізіології та адаптивних відповідей.

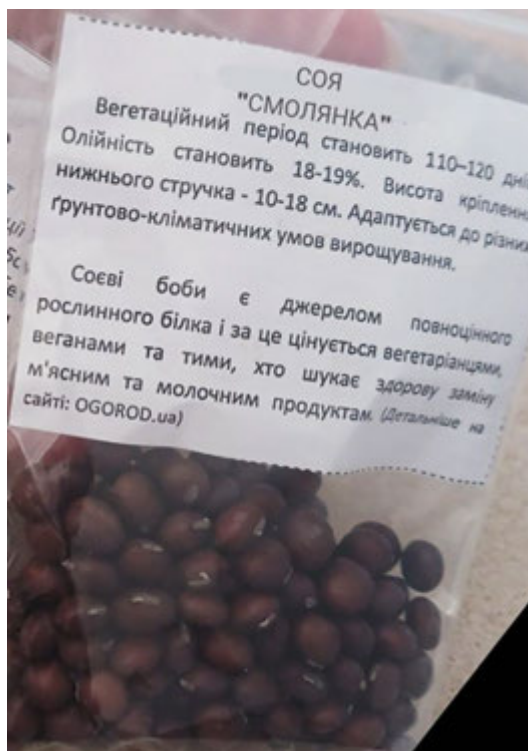
Під впливом абіотичних стресових факторів навколишнього середовища збереження високого рівня активності ферментів антиоксидантної системи свідчить про здатність рослинного організму підтримувати ефективні захисні механізми адаптації. Таким чином, стабільна активність цих ферментів за умов дії абіотичних чинників (високі температурні режими, засуха і т.д.) є важливим показником стійкості рослин до стресу, адже це свідчить про їхню адаптивну життєздатність та здатність швидко та ефективно реагувати на несприятливі умови середовища, підтримувати фізіолого-біохімічний гомеостаз та забезпечувати продовження росту і розвитку в умовах змін середовища.

У науковому дослідженні, присвяченому вивченню впливу абіотичного стресу, викликаного посухою, на активність каталази у представників *Pinellia ternata*, піддослідні рослини були розподілені на чотири групи з різними видними режимами. Таким чином, найвищий показник каталазної активності спостерігався у піддослідних зразків, що зазнавали найбільшого посухового стресу [27].

## РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Об'єкт дослідження та його характеристика

Об'єктом дослідження було обрано насіння сої звичайної (*Glycine max.*) сорту «Смолянка» (рис. 2.1). Насіння урожаю 2023 року, компанія OGOROD™.



**Рис. 2.1.** Насіння сої звичайної (*Glycine max.*) сорту «Смолянка»

Насіння має округлу форму, насіннева оболонка темно-коричневого або майже чорного забарвлення, середній діаметр насінини 9 мм. Сорт є середньостиглим, вегетаційний період триває 110-120 днів, вміст білка в насінні становить 36-40 %, олійність- 18-19 % (має середню олійність). Схожість сорту сягає до 90 %. Внесений до Реєстру сортів України у 2008 році. Рекомендований для вирощування в зонах Лісостепу та Полісся [28].

Сорт адаптивний до різних ґрунтово-кліматичних умов. Потенційна врожайність сорту становить 3,8-4,2 т/га, а середня врожайність під час державних випробувань на території Полісся склала 3,1 т/га [29].

## 2.2. Передпосівна підготовка та умови вирощування

Посівний матеріал висівався на універсальний субстрат «Поліський» з біогумусом та значенням рН 5,5-6,5 виробництва Rich Land.

Передпосівна підготовка включала наступні етапи:

- 1) Попереднє промивання посівного матеріалу проточною водою від забруднень.
- 2) Відбракування некондиційного насіння за візуальними ознаками (перевірка на наявність пошкоджень, захворювань, уражень шкідниками).
- 3) Замочування насіння у водному розчині NaCl концентрацією 5:1 (на 500 мл H<sub>2</sub>O був узятий NaCl вагою 10 г) на 10 хвилин. Після зазначеного часу непридатний до вирощування посадковий матеріал спливає на поверхню рідини, а придатне насіння осідає на дні посудини.
- 4) Замочування посадкового матеріалу у розчині 0,02 % H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> на 20 хвилин для стимуляції процесу проростання. Після промили насіння проточною водою (рис. 2.2.).



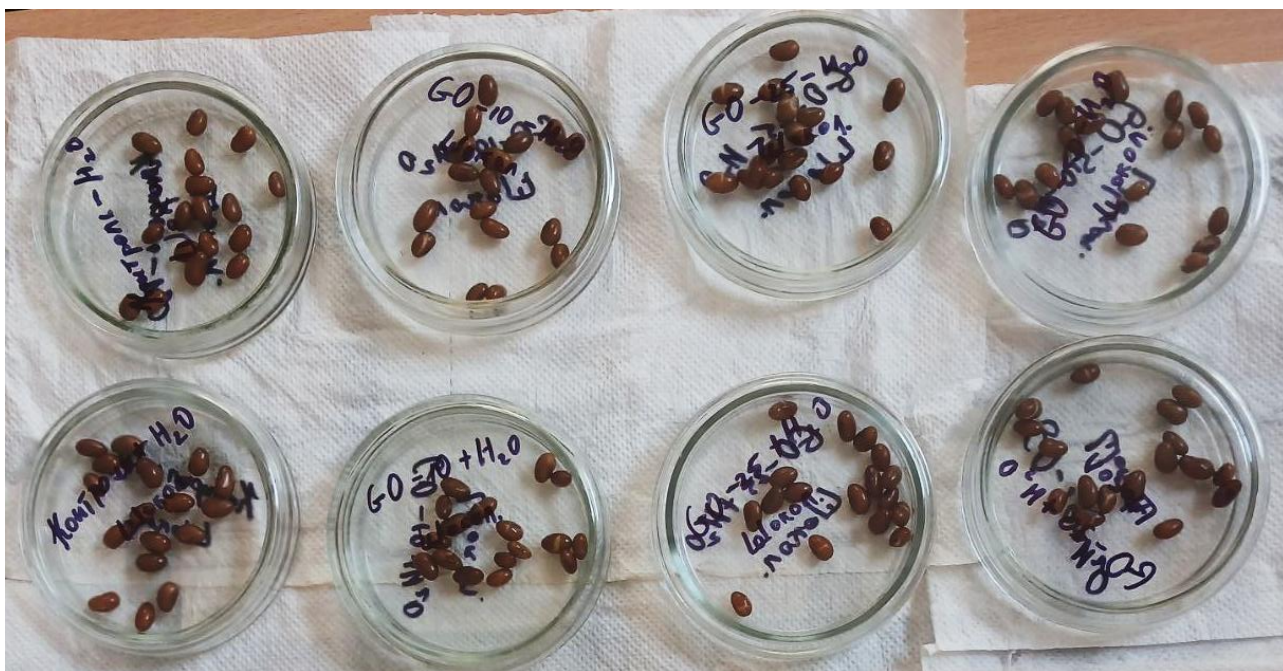
**Рис. 2.2.** Обробка посадкового матеріалу розчином 0,02 % H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>.

5) Стерилізація посадкового матеріалу у розчині 3%  $H_2O_2$  на 15 хвилин (рис. 2.3.). Після 2-3 рази промили насіння проточною водою.



**Рис. 2.3.** Обробка посадкового матеріалу розчином 3%  $H_2O_2$ .

6) Оброблене насіння розділили на три дослідні групи та замочили у трьох попередньо приготованих розчинах ГО з концентраціями 10 мкг/мл, 25 мкг/мл та 50 мкг/мл протягом 10 годин (рис. 2.4.)



**Рис. 2.4.** Замочування посадкового матеріалу у розчинах ГО

7) Насіння сої контрольної групи було замочене у дистильованій воді протягом 10 годин.

Замочене насіння на наступну добу висаджували у 8 горщиків (по 8 насінин на горщик) за наступною схемою (табл. 2.1):

*Таблиця 2.1.*

#### Схема дослідів

№ проби	Група	Режим поливу проби
№1	Контрольна група	Регулярний
№2	Контрольна група	Імітація посухи
№3	ГО концентрацією 10 мкл/мл	Регулярний
№4	ГО концентрацією 10 мкл/мл	Імітація посухи
№5	ГО концентрацією 25 мкл/мл	Регулярний
№6	ГО концентрацією 25 мкл/мл	Імітація посухи
№7	ГО концентрацією 50 мкл/мл	Регулярний
№8	ГО концентрацією 50 мкл/мл	Імітація посухи

Посадка насіння здійснювалась на глибину 2-3 см у глибину ґрунту (рис. 2.5.).



**Рис. 2.5.** Посадка насіння

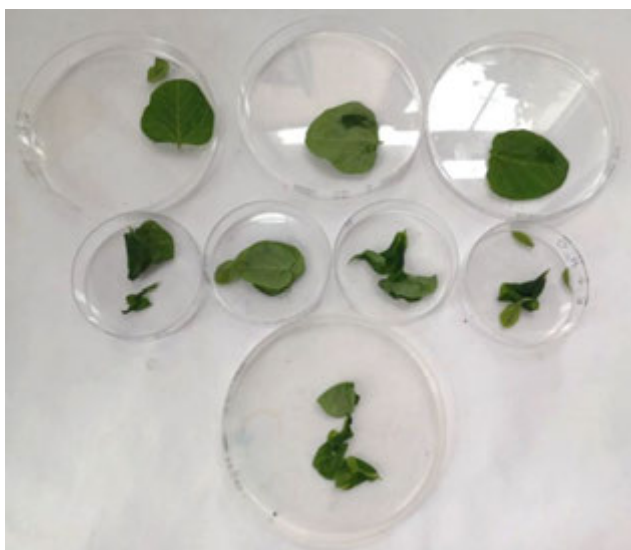
Тривалість досліду для всіх груп становила 14 діб із дня посадки. Дослідні групи № 1, 3, 5, 7 піддавались поливу водою (по 100-150 мл) раз на 4 доби, тоді як групи з імітацією посухи № 2, 4, 6, 8 також поливалися водою раз на 7 діб. Посівний матеріал пророщували за температурного режиму +15-20 °С.

На 14-тий день вегетації проведено оцінювання схожості та морфометричний аналіз рослин за наступними показниками: загальна довжина та маса рослини, довжина кореневої системи, довжина та діаметр пагона та кількість листків. Також на 14-тий день після проростання було проведено дослідження вмісту пігментів, зокрема хлорофілів *a* і *b*, каротиноїдів та активності каталази.

### 2.3. Методика визначення вмісту пігментів (хлорофілів *a* і *b*, каротиноїдів)

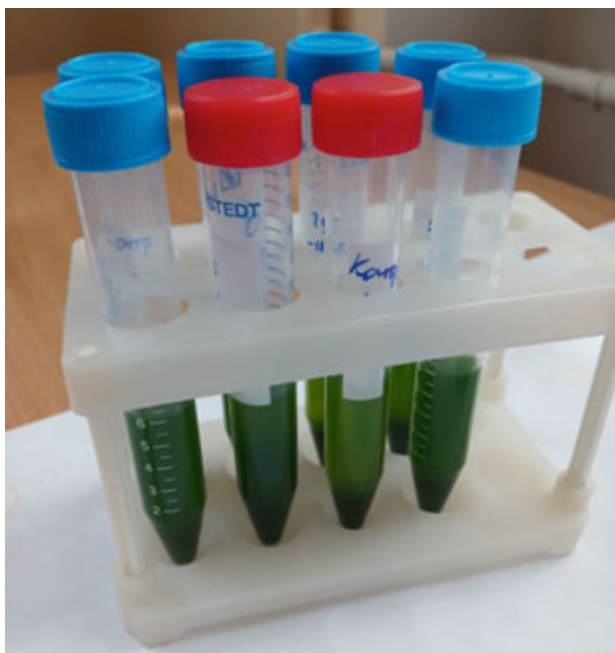
Для дослідження пігментного складу дослідних зразків відбирали листки сої звичайної (*Glycine max.*). Аналізу вмісту пігментів проводили спектрофотометричним методом.

Кількісне визначення пігментів проводили за наступною методикою: наважку 0,1 г подрібненого рослинного матеріалу (рис. 2.6.) піддавали гомогенізації у ступці з додаванням невеликої кількості карбонату кальцію  $\text{CaCO}_3$  у якості абразиву.



**Рис. 2.6.** Наважки рослинного матеріалу для аналізів вмісту пігментів

На наступному етапі до гомогенізованої суміші додавали 2,5-3 мл 96% етилового спирту  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  і повторно розтирали до однорідності. Отриману однорідну суміш відфільтровували в пробірки крізь фільтрувальний папір поміщений у скляні лійки. Об'єм фільтрату доводили до об'єму 10 мл за допомогою етанолу. На виході було отримано по одному зразку з кожної дослідної групи (загалом 8 зразків) (рис. 2.7.).



**Рис.2.7.** Фільтрат суміші рослинних пігментів, отриманих із дослідних проб

Оптичну густина екстрактів аналізували за допомогою спектрофотометра UVmini-1240 SHIMADZU на довжинах хвиль, що відповідають максимуму оптичного поглинання пігментів: для хлорофілу *a*-  $\lambda=663$  нм, для хлорофілу *b*-  $\lambda=646$  нм, для каротиноїдів-  $\lambda=470$  нм. У якості порівняльного розчину виступав етиловий спирт. Концентрації пігментів розраховувалися за наступними формулами:

$$C_{\text{хл.}b} \text{ мг/л} = 20,13 \cdot D_{646} - 5,03 \cdot D_{663}, \quad (2.1.)$$

$$C_{\text{хл.}a} \text{ мг/л} = 12,21 \cdot D_{663} - 2,81 \cdot D_{646}, \quad (2.2.)$$

$$C_{\text{хл.}a+\text{хл.}b} \text{ мг/л} = 7,12 \cdot D_{663} + 16,8 \cdot D_{646} \quad (2.3.)$$

$$C_{\text{кар.мг/л}} = \frac{1000 \cdot D_{470} - 3,27 \cdot C_{\text{хл.}a} - 100 \cdot C_{\text{хл.}b}}{229} \quad (2.4.)$$

де  $D_{646}$  – оптична густина розчину за довжини хвилі 646 нм;

$D_{663}$  – оптична густина розчину за довжини хвилі 663 нм;

$D_{470}$  – оптична густина розчину за довжини хвилі 470 нм.

Уміст пігментів у рослинній сировині (А) розраховували за допомогою наступної формули:

$$A_{\text{мг/г}} = \frac{C \cdot V}{H \cdot 1000} \quad (2.5.)$$

Де С– концентрація пігментів, мг/г;

V– об'єм екстракту, мл;

H– наважка рослинного матеріалу, г [30].

#### **2.4. Методика визначення каталазної активності**

Каталаза (CAT) є розповсюдженим ензимом, що каталізує розкладання перекису водню на воду і кисень, тим самим захищаючи клітини живих організмів від окисного впливу активних форм кисню. У клітинах рослинних організмів каталаза є сигнальним агентом, що вказує на несприятливі фактори середовища (наявність високих температур, важких металів, випромінювання, зміна рН тощо) [31].

Каталаза є термочутливим ферментом, через це протягом дослідної роботи є необхідність проводити етапи роботи максимально швидко, забезпечуючи умови, при яких дослідний зразок перебуватиме під дією сталої температури. Для забезпечення таких умов рослинний матеріал реактиви та обладнання (1М фосфатний буфер, ступки, чаші) слід попередньо охолодити.

Для отримання необхідного рослинного екстракту здійснювали гомогенізацію 0,25 г листя та елементів пагона сої з додаванням 5 мл фосфатного буферного розчину. Протягом гомогенізації ступку утримували на холодоагенті для збереження низької температури. Отриманий гомогенат переносили в мікропробірки типу епандорф та центрифугували протягом 10 хвилин при швидкості 3 тис. об/хв.

До експериментальних пробірок додавали по 1 мл розчину перекису водню та 100 мкл отриманого супернатанту. У контрольній пробі замість супернатанту використовували 100 мкл дистильованої води. Інкубацію здійснювали у водяній

бані при температурі 37 °С протягом 10 хвилин. Після завершення інкубації реакцію зупиняли додаванням 1 мл розчину молібдату амонію. Подальше центрифугування пробірок проводили за аналогічних умов (10 хвилин при 3 тис. об/хв).

Інтенсивність забарвлення супернатанту після центрифугування визначали за допомогою спектрофотометра UVmini-1240 при довжині хвилі 410 нм. Розрахунок каталазної активності здійснювали відповідно до встановленої методики з використанням відповідної формули:

$$E = (A_{\text{хол}} - A_{\text{досл}}) \cdot V \cdot t \cdot K/m \quad (2.6.)$$

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

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

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

$V$  – обсяг внесеної проби;

$t$  - час інкубації;

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

$K$  – коефіцієнт мілімолярної екстинкції  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $22,2 \cdot 10^3 \text{ мМ}^{-1} \text{ хем}^{-1}$ ) [32].

### РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1. Схожість насіння сої за праймування оксидом графену

Сходи сої з'явилися вже на 4-5 день після посіву. Остаточний показник схожості насіння (рис. 3.1.) було обраховано на 14-тий день вегетації, дані було занесено до таблиці (табл. 3.1.)



Рис. 3.1. Рослини сої *Glycine max.* на 14-тий день вегетації

Таблиця 3.1.

**Схожість насіння *Glycine max.* за різних концентрацій ГО на 14-ту добу вегетації**

Дослідна група, №	Схожість насіння, шт	Відсоток схожості, %
№1- Контрольна група	8/8	100
№2- Контрольна група +посуха	7/8	87,5
№3- ГО-10 мкл/мл	8/8	100
№4- ГО-10 мкл/мл +посуха	8/8	100

Таблиця 3.1.

№5- ГО-25 мкл/мл	8/8	100
№6- ГО-25 мкл/мл +посуха	6/8	75
№7- ГО-50 мкл/мл	4/8	50
№8- ГО-50 мкл/мл +посуха	7/8	87,5

Виходячи із даних таблиці, можна зробити висновок, що усі дослідні зразки мають високий показник схожості посівного матеріалу, найнижчим показником володіє зразок №6- ГО- 25 мкл/мл +посуха та №7- ГО-50 мкл/мл, що мають коефіцієнт схожості 75% та 50% відповідно. Причиною таких показників може бути нежиттєздатність деяких насінин зразків, а також додатковий стрес, спричинений посушливими умовами (у випадку зразка №6) та зависокою концентрацією оксиду графену за нормальних умов середовища (у випадку зразка №7).

### 3.2. Морфометричні показники сої за дії посухи та нанопраймування

На 14-ту добу вегетації був проведений аналіз морфометричних даних паростків рослин *Glycine max.* за наступними показниками: загальна довжина та маса рослини, довжина кореневої системи, довжина та діаметр пагона та кількість листків. Рослини для створення вибірки з кожної проби були обрані випадковим чином. Кожна вибірка становила 5 рослин, а загальна кількість посаджених насінин становила 8 штук у кожному дослідному зразку.

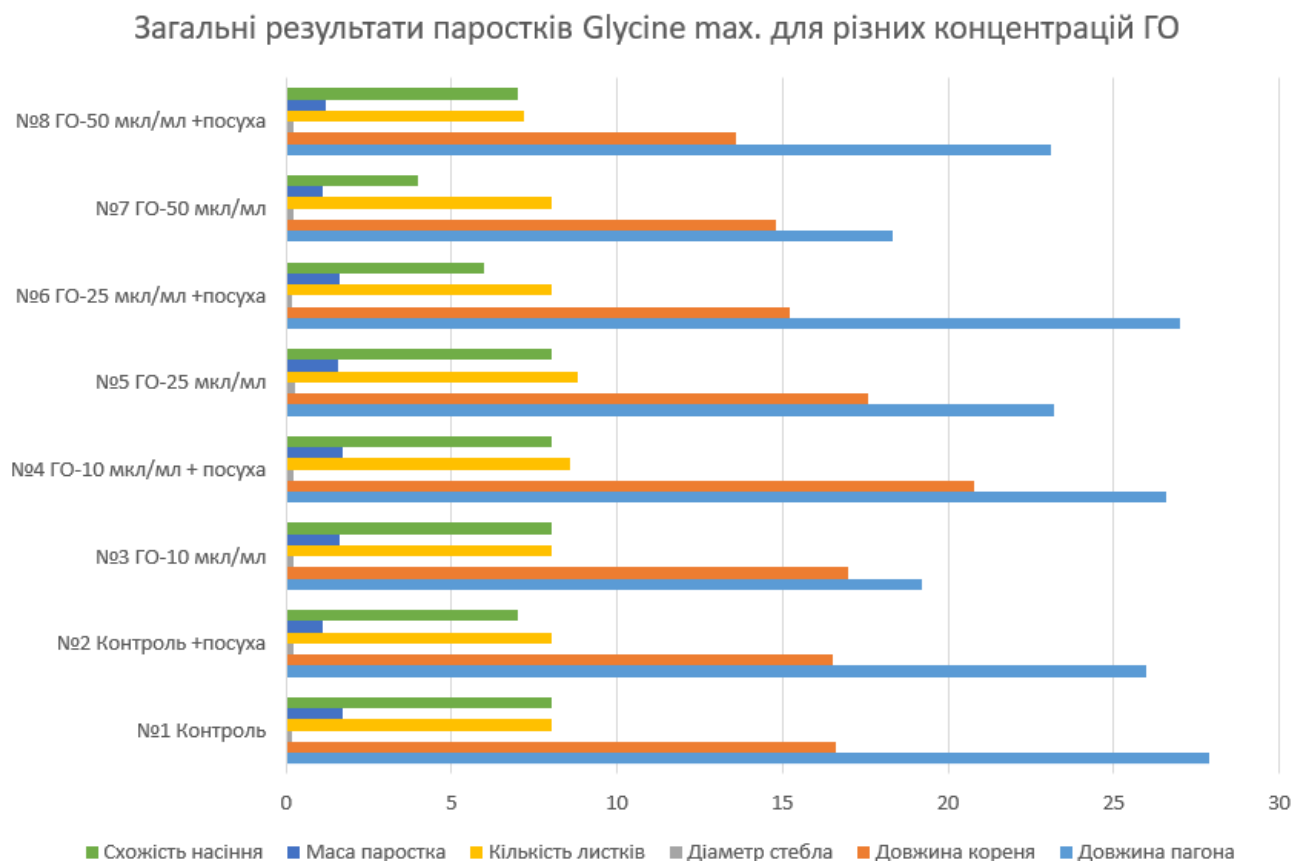
Ілюстрації проведення морфометричних аналізів дослідних рослин подано на фотознімках (рис. 3.2.).





**Рис. 3.2.** Ілюстрації проведення морфометричних аналізів дослідних рослин за різних концентрацій ГО: а- Контрольна група; б- Контрольна група +посуха; с- ГО концентрацією 10 мкл/мл; д- ГО концентрацією 10 мкл/мл +посуха; е- ГО концентрацією 25 мкл/мл; ф- ГО концентрацією 25 мкл/мл +посуха; г- ГО концентрацією 50 мкл/мл; х- ГО концентрацією 50 мкл/мл +посуха.

Отримані дані були структуровані у вигляді зведеної стовпчастої гістограми, на якій подано середні результати морфометричних показників з кожної вибірки рослин у кожній дослідній пробі (рис. 3.3.).



**Рис. 3.3. Морфометричні показники сої за умов праймування насіння ГО та дії посухи**

Оцінюючи дані, наведені на рис. 3.3., було встановлено, що рослини дослідної проби №1 з регулярним поливом мають вищі показники, ніж у зразка №2 з імітацією посухи: довжина пагона більша на 7,3 %, маса паростка- на 53,8 %, схожість насіння - на 14,3%. Тобто регулярний водний режим більш позитивно впливає на більшість морфометричних показників рослини, ніж абіотичний стрес, спричинений посухою.

При порівнянні морфометричних даних контрольного зразка з регулярним поливом (№1) зі зразками, насіння яких праймували різними концентраціями ГО (№3, 5, 7) та вирощених за нормальних умов поливу було встановлено, що

найбільш позитивну динаміку демонструє зразок № 5, який має збільшення довжини кореня на 6 %, діаметру стебла - на 30% та кількості листків - на 10 %. Такий розподіл свідчить про позитивний вплив карбонових наночастинок у концентрації 25 мг/мл на біомасу сої. У свою чергу, негативну динаміку ростових характеристик демонструє зразок №7, який має зменшення довжини пагона на 34,4%, довжини кореня- на 12%, загальної маси паростка- на 36,3% та схожості насіння- на 50 % у порівнянні з контролем. Такі зміни можуть свідчити про можливу цитотоксичну дію наночастинок ГО у найвищій концентрації 50 мкл/мл на рослини сої, що призводить до інгібування ростових лінійних параметрів культури.

Разом з тим рослини сої, вирощені з насіння, яке праймували наночастинками оксиду графену різних концентрацій (№4, 6, 8) та паралельно піддавали дії посухового стресу у порівнянні з рослинами сої, що вирощували в умовах імітації посухи (№ 2) мають різнонаправлені зміни, що, в основному, залежали від концентрації ГО.

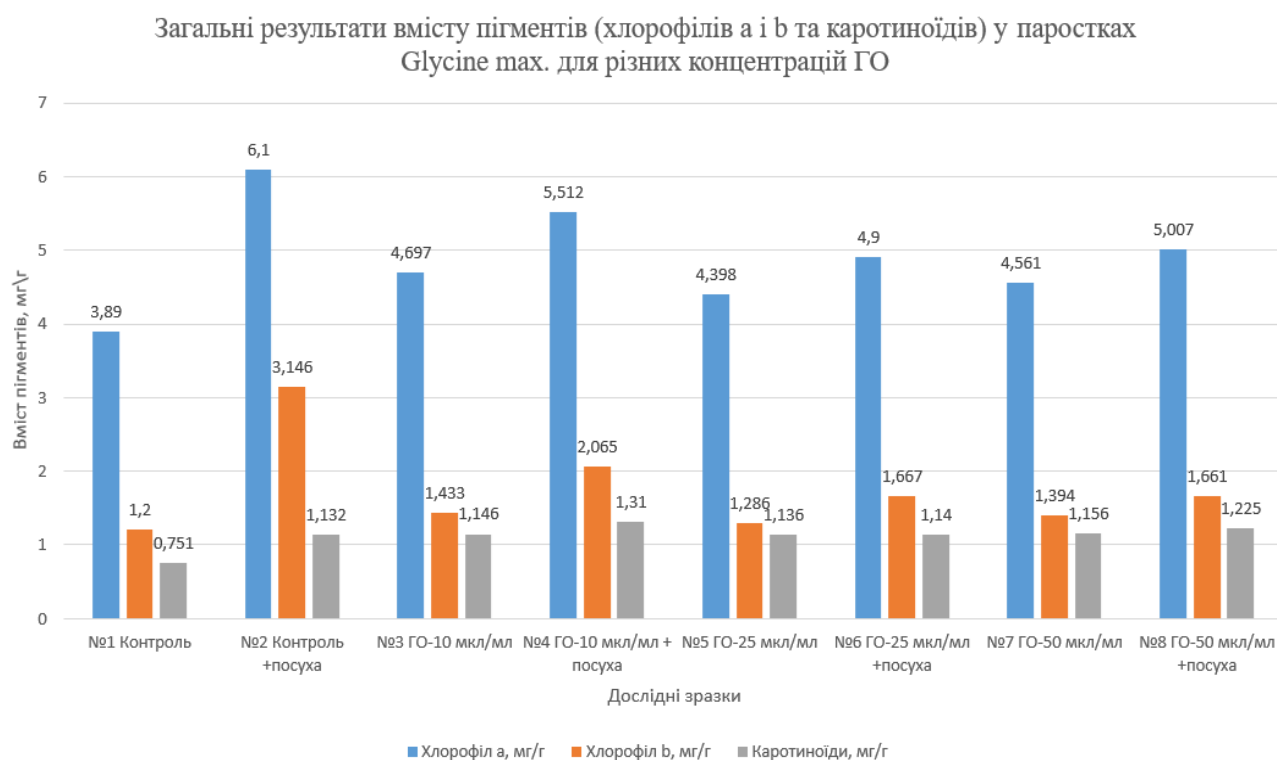
Так найпозитивнішу динаміку ростових характеристик демонструє дослідна група № 4, де відмічали збільшення довжини кореня на 26 %, діаметра стебла - на 10 %, кількості листків- на 7,5 %, що може свідчити про стимулюючий ефект карбонових наночастинок у концентрації 10 мкл/мл на посуховитривалість та нарощування біомаси рослини. Натомість негативну динаміку демонструє зразок № 8: відмічали зменшення довжини пагона на 11,2 %, довжини кореня - на 18,9 %, кількості листків - на 10 % та схожості - на 12,5 %. Отримані результати можуть свідчити про цитотоксичність високих концентрацій ГО (50 мкл/мл), яка викликає затримку росту та інгібує процеси розвитку рослинного організму.

При порівнянні зразків, насіння яких праймували наночастинками різних концентрацій, але одні піддавались дії посухового стресу (№ 4, 6, 8), а інші вирощувались в умовах регулярного поливу (№ 3, 5, 7), було встановлено, що перші (водний дефіцит) мають кращі морфометричні характеристики, що свідчать про стимуляцію посуховитривалості, здійснену помірними

концентраціями ГО (10 та 25 мкл/мг), у той час, як зразки з концентраціями ГО у 50 мкл/мг демонстрували нижчі результати стійкості.

### 3.3. Аналіз вмісту пігментів (хлорофілів *a* і *b* та каротиноїдів) за дії посухи та нанопраймування оксидом графену

Після обрахунку вмісту пігментів (хлорофілів *a* і *b* та каротиноїдів) у рослинній сировині сої звичайної за відповідними формулами (2.1.-2.4.), отримані дані були перенесені до зведеної стовпчастої гістограми (рис 3.4.).



**Рис. 3.4. Результати дослідження вмісту пігментів**

Оцінюючи дані рисунку 3.4. було встановлено, що вміст пігментів у рослинах дослідної групи № 2 (моделювання посухи) є вищими, а саме вміст хлорофілу *a* більший на 56,8 %, хлорофілу *b*- у 2,6 рази, а каротиноїдів- на 50,7%, порівняно з рослинами, полив яких здійснювався регулярно. Таку закономірність можна пояснити зменшенням кількості води у біомасі паростків, що

вирощувались в умовах посухи, через що вміст пігментів у відсотковому складі є більшим.

При порівнянні даних контрольного зразка з регулярним поливом (№1) з характеристиками зразків, що не зазнавали посухового стресу та були пророщені з додаванням різних концентрацій ГО (№ 3, 5, 7), помітно, що показники вмісту пігментів у зразках з концентраціями ГО 10, 25 та 50 мкл/мг зросли: хлорофіл *a*- на 20,7 % (№ 3), 13 % (№ 5) та 17,2 % (№ 7); хлорофіл *b*- на 19,4 % (№ 3), 7,1 % (№ 5) та 16,1 % (№ 7); каротиноїди - майже у 2 рази (№ 3), на 51,3 % (№ 5) та 54 % (№ 7). Зважаючи на отримані результати можна стверджувати, що найбільш позитивну динаміку зростання вмісту пігментів демонструє зразок № 3, що свідчить про найбільшу стимулюючу дію наночастинок ГО у концентрації 10 мкл/мг.

Порівняння вмісту фотосинтетичних пігментів рослин, що вирощувались в умовах обмеженого поливу (№ 2) з аналогічними показниками зразків рослин, які також зазнавали посухового стресу, але їх насіння попередньо праймували різними концентраціями ГО (№ 4, 6, 8) свідчить, що у останніх вміст хлорофілів дещо знизився, в каротиноїдів - навпаки збільшився на 15,7 % (№ 4) та 8,2 % (№ 8) відповідно. Така закономірність може бути пов'язана із активацією наночастинок захисту рослин від оксидантного стресу, викликаного посушливими умовами.

При порівнянні зразків, що піддавались посуховому стресу (№ 4, 6, 8) зі зразками з регулярним поливом (№ 3, 5, 7), де насіння обох груп оброблялись оксидом графену, можна підсумувати, що зразки в умовах посухи містили більший відсоток хлорофілів, а також каротиноїдів, ніж відповідні зразки без водного дефіциту: хлорофіл *a* - на 17,4 % (№ 4), 11,4 % (№ 6) та 9,8% (№ 8); хлорофіл *b* - на 44,1 % (№ 4), 29,6 % (№ 6) та 6 % (№ 8); каротиноїди - на 14,3 % (№ 4), 0,4 % (№ 5) та 6 % (№ 8). Такі характеристики свідчать про помітний позитивний вплив оксиду графену, який сприяв підвищенню адаптаційних можливостей дослідних рослин до водного дефіциту.

### **3.4. Активність каталази у рослинах сої за дії посухи та нанопраймування оксидом графену**

Результати дослідження активності каталази в рослинах сої різних дослідних груп показали, що при порівнянні даних двох контрольних зразків (№1 та 2), характеристики зразка №2 з імітацією посухи є вищими відносно зразка №1 на 31,6 %. Такі зміни можуть свідчити про активацію адаптаційної відповіді рослинного організму на посушливі умови середовища, викликані водним дефіцитом.

При порівнянні даних контрольного зразка з регулярним поливом (№1) з характеристиками зразків, що не зазнавали посухового стресу та були пророщені з додаванням різних концентрацій ГО (№3, 5, 7), помітно, що показники активності каталази у зразках з концентраціями ГО 10, 25 та 50 мкл/мг зросли відносно показників контрольного зразка: у 2 рази, на 91,7% та на 95,8% відповідно. З отриманих даних можна зробити припущення, що оксид графену може виступати як помірний абіотичний стресор, який стимулює систему антиоксидантного захисту рослин в межах адаптаційної відповіді.

Аналіз результатів порівняння активності каталази рослин контрольної групи № 2 (імітація посухи) з аналогічними показниками рослин сої, що зазнавали посухового стресу та були пророщені з додаванням різних концентрацій ГО (№ 4, 6, 8), свідчить, що у зразках з концентраціями ГО 10, 25 та 50 мкл/мг активність ферменту зросла лише за найвищої концентрації наночастинок на 38,1% відповідно. Можна припустити, що лише високі концентрації графену оксиду активують систему антиоксидантного захисту сої дослідних зразків в межах адаптаційної відповіді.

При порівнянні зразків, що піддавались посуховому стресу (№ 4, 6, 8) зі зразками з регулярним поливом (№ 3, 5, 7), де усі групи оброблялись оксидом графену, можна підсумувати, що зразки в умовах посухи містили менший вміст

каталази, ніж відповідні зразки нормального водного режиму із вмістом ГО 10, 25 та 50 мкл/мл, в яких відмічали зростання активності цього ферменту на 36 %, 34,6 % та 7,6 % відповідно. Таким чином, найбільше зниження вмісту каталази має проба № 4 – ГО 10 мкл/мл + посуха у порівнянні з відповідною пробою за концентрацією ГО, що не піддавалась посузі, а найменше зниження- у пробі № 8 – ГО 50 мкл/мл+посуха.

Отже, аналізуючи всі отримані дані можемо зробити висновок, що найоптимальнішою для праймування насіння сої є доза графену оксиду 10 мкл/мл, що проявляє стимулюючий ефект на рослини та сприяє їх адаптації до несприятливих умов довкілля.

## ВИСНОВКИ

1. Дослідження впливу такого абіотичного чинника як посуха на морфофізіологічні показники рослин сої звичайної за праймування насіння наночастинками оксиду графену свідчить про активацію адаптаційної відповіді рослин за помірних концентрацій карбонових наночастинок 10 та 25 мкл / мл та фітотоксичну дію останніх за високих концентрацій (50 мкл/мл).

2. Морфометричні показники сої звичайної показали, що за дефіциту води показники довжини пагона, схожості насіння та загальної маси рослини були меншими на 7,3%, 14,3% і 53,8% відповідно порівняно з контролем, що не зазнавав водного дефіциту.

3. Оксид графену в концентрації 25 мкл/мл у пробі з регулярним водним режимом мав найбільший позитивний вплив і підвищував показники довжини кореня, діаметра стебла та кількості листків на 6%, 10% та 7,5% відповідно, порівняно із контролем з регулярним поливом.

4. У концентрації 10 мкл/мл оксид графену в дослідній групі з імітацією посухи проявив найкращі результати щодо морфометричних показників рослин, про що свідчить збільшення довжини кореня на 26 %, діаметра стебла - на 10 %, кількості листків - на 7,5 % у порівнянні із контрольною пробою без дії наночастинок.

5. В дослідній групі рослин з водним дефіцитом оксид графену в концентрації 10 мкл/мл сприяв збільшенню морфометричних показників порівняно із відповідними даними рослин за регулярного поливу: довжина стебла зросла на 38,5 %, кореня- на 22,4 %, діаметр стебла- на 10 %, кількість листків - на 7,5 % та маси паростків на 7,5 %. Таким чином вплив графену оксиду у концентрації 10 мкл/мг сприяє адаптаційним процесам при дефіциті води, а також стимулює нарощування біомаси рослини.

6. Було показано, що вміст фотосинтетичних пігментів у сої за дії посухи підвищувався, зокрема вміст хлорофілу *a* зростав на 56,8 %, хлорофілу *b* - у 2,6 рази, а каротиноїдів - на 50,7 % порівняно із контрольним зразком регулярного поливу. Така тенденція спостерігалась у всіх дослідних зразках, що

були вирощені за умов посухи та праймування карбоновими наночастинками, однак найбільший стимулюючий ефект оксид графену проявляв у концентрації 10 мкл/мл: відмічалось збільшення кількості хлорофілу *a* на 17 %, хлорофілу *b* - на 44 % та каротиноїдів - на 13,4 %, порівняно з аналогічним зразком, вирощеним без водного дефіциту.

7. Встановлено, що за водного дефіциту зростала активність каталази на 31,6% порівняно з контролем. Для рослин сої, вирощених у мовах посухи, найбільший вплив на активність каталази мала концентрація оксиду графену 10 мкл/мл, де зменшення каталазної активності відбулось на 36 %, порівняно із аналогічним зразком, вирощеним за умов регулярного поливу.

Таким чином, оцінка впливу праймування насіння сої наночастинками оксиду графену на фізіологічний стан сої звичайної сорту «Смолянка» за моделювання посушливих умов сприятиме глибшому розумінню механізмів адаптації сільськогосподарських культур до абіотичних стресових факторів, спричинених зміною кліматичних умов, а також удосконаленню агробіотехнологічних підходів, спрямованих на підвищення посухостійкості та поживної цінності рослин з розробкою відповідних препаратів на основі карбонових наночастинок.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.-J., Kopittke, P.M., 2016. Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends Plant Sci.* 21, 699–712. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.04.005>.
2. Zaytseva and Neumann *Chem. Biol. Technol. Agric.* (2016) 3:17.
3. Kumar, A., Singh, A., Panigrahy, M., Sahoo, P.K., Panigrahi, K.C., 2018. Carbon nanoparticles influence photomorphogenesis and flowering time in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Rep.* 37, 901–912. URL: <https://doi.org/10.1007/s00299-018-2277-6>.
4. Canas, J.E., Long, M., Nations, S., Vadan, R., Dai, L., Luo, M., Ambikapathi, R., Lee, E.H., Olszyk, D., 2008. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon-nanotubes on root elongation of select crop species. *Nanomater. Environ.* 27, 1922–1931. URL: <https://doi.org/10.1897/08-117.1>.
5. Anjum, N.A., Singh, N., Singh, M.K., Shah, Z.A., Duarte, A.C., Pereira, E., et al., 2013. Singlebilayer graphene oxide sheet tolerance and glutathione redox systemsignificance assessment in faba bean (*Vicia faba* L.). *J. Nanopart. Res.* 15, 1770. URL: <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1770-7>.
6. Chen, J., Dou, R., Yang, Z., Wang, X., Mao, C., Gao, X., et al., 2016. The effect and fate of water-soluble carbon nanodots in maize (*Zea mays* L.). *Nanotoxicology* 10, 818–828. URL: <https://doi.org/10.3109/17435390.2015.1133864>.
7. Gopalakrishnan Nair, P. M. Toxicological Impact of Carbon Nanomaterials on Plants // *Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications* / eds. M. Ashfaq, A. Verma. – Cham : Springer, 2018. – P. 87–104. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70166-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70166-0_5).
8. Оксид графену: одержання, властивості, застосування: лекція №8 [Електронний ресурс]. – [Б. м.]: [б. в.], [2018], 1-7 с. URL: <https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2018/04>.

9. He, Y.J.; Hu, R.R.; Zhong, Y.J.; Zhao, X.L.; Chen, Q.; Zhu, H.W. Graphene oxide as a water transporter promoting germination of plants in soil. *Nano Res.* 2018, *11*, 1928–1937 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12274-017-1810-1>.
10. Zhu, X.G.; Zhao, S.L.; Duo, L.A. Effects of graphene oxide on the physiological and ecological characteristics of *Medicago sativa*. *J. Tianjin Norm. Univ. (Nat. Sci. Ed.)* 2020, *40*, 33–37.
11. Wang, X.J.; Zhao, S.L.; Duo, L.A. Effect of Seed Dressing with Graphene Oxide on Seed Germination and Seedling Growth of *Festuca arundinacea*. *Seed* 2018, *37*, 1–4
12. Ren W., Chang H., Li L., Teng Y. Effect of graphene oxide on growth of wheat seedlings: Insights from oxidative stress and physiological flux // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2020. Т. 105, № 1. С. 139–145. URL: <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02888-9>.
13. Cheng F., Liu Y.-F., Lu G.-Y., Zhang X.-K., Xie L.-L., Yuan C.-F., Xu B.-B. Graphene oxide modulates root growth of *Brassica napus* L. and regulates ABA and IAA concentration // *Journal of Plant Physiology*. – 2016. – Т. 193. – С. 57–63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.02.011>.
14. Glycine max // *Useful Tropical Plants*. URL: <https://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Glycine+max> (дата звернення: 10.05.2025).
15. Green Institute. Зображення: Glycine max // The Green Institute. 08.08.2023. URL: <https://greeninstitute.ng/plants/2023/8/8/glycine-max> (дата звернення: 10.05.2025).
16. Селекція, виробництво, торгівля і використання сої у світі: [монографія] / А. О. Бабич, А. А. Бабич-Побережна. — К. : Аграрна наука, 2011. — 547 с.
17. Мазур В., Ткачук О., Панцирева Г., Купчук І. Соя в інтенсивному землеробстві : монографія / В. Мазур, О. Ткачук, Г. Панцирева, І. Купчук. — Вінниця : Нілан-ЛТД, 2022. — 221 с. URL:

- <http://vsau.vin.ua/repository/getfile.php/32347.pdf> (дата звернення: 13.05.2025)
18. Шаповал В.О., Горовий М.В., Калнагуз О.М. Технологічний процес вирощування сої // Матеріали XXI міжнародного форуму молоді, 10–11 квітня 2025 р. Суми: СНАУ, 2025. С. 65–66. URL: <https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/64861/1/Tezy%20MOLOD%20I%20INDUSTRIIa%204.0V%20XXI%20STOLITTI%2010-11%20kvitnia%202025-65-66.pdf> (дата звернення: 13.05.2025)
19. Нинішні площі посівів сої перевищують минулорічні майже на 200 тис. га // Landlord. — 2024. — 12 червня. — URL: <https://landlord.ua/news/nynishni-ploshhi-posiviv-soyi-perevyshhuyut-mynulorichni-majzhe-na-200-tys-ga/> (дата звернення: 13.05.2025)
20. Україна утримує позиції у топ-10 світових виробників сої // Landlord. — 2023. — 27 серпня. — URL: <https://landlord.ua/news/ukraina-utrymuie-pozytsii-u-top-10-svitovykh-vyrobnykiv-soi/> (дата звернення: 13.05.2025).
21. Messina M. Soy and Health Update: Evaluation of the Clinical and Epidemiologic Literature // Nutrients. — 2016. — Vol. 8, No. 12. — P. 754. — DOI: 10.3390/nu8120754. — PMID: 28009855. — PMCID: PMC5188409. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5188409/> (дата звернення: 13.05.2025).
22. Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples / A. A. Hoffmann et al. Austral ecology. 2018. Vol. 44, no. 1. P. 3–27. URL: <https://doi.org/10.1111/aec.12674>.
23. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures / K. Abbass et al. Environmental science and pollution research. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>.
24. Ansari W. A., Atri N., Pandey M., Singh A. K., Singh B., Pandey S. Вплив посухового стресу на морфологічні, фізіологічні та біохімічні характеристики рослин: огляд. Biosciences Biotechnology Research Asia. 2019;16(4). URL: <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/2785>.

25. Effect of drought stress on some growth, morphological, physiological, and biochemical parameters of two different populations of *Quercus brantii* / S. Jafarnia et al. *IForest - biogeosciences and forestry*. 2018. Vol. 11, no. 2. P. 212–220. URL: <https://doi.org/10.3832/ifor2496-010>
26. Impacts of drought stress on growth, protein, proline, pigment content and antioxidant enzyme activities in rice (*Oryza sativa* L. var. BRR1 dhan-24) / S. Nasrin et al. *Dhaka university journal of biological sciences*. 2020. Vol. 29, no. 1. P. 117–123. URL: <https://doi.org/10.3329/dujbs.v29i1.46537>
27. Effects of drought stress on the growth, physiology and secondary metabolite production of *pinellia ternata* thunb. / Y. Chen et al. *Pakistan journal of botany*. 2020. Vol. 53, no. 3. URL: [https://doi.org/10.30848/pjb2021-3\(25\)](https://doi.org/10.30848/pjb2021-3(25))
28. Соя Смолянка [Електронний ресурс] // ІАС "Аграрії разом". URL: <https://agrarii-razom.com.ua/culture-variety/smolyanka> (дата звернення: 15.05.2025)
29. Чорна соя [Електронний ресурс] // SuperAgronom.com. URL: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/chorna-soya-id29117> (дата звернення: 15.05.2025).
30. Мусієнко М.М., Паршикова Т.В., Славний П.С. Спектрофотометричні методи в практиці фізіології, біохімії та екології рослин : навч. посіб. / КНУТШ. – Київ : Фітосоціоцентр, 2001. – с. 97-99; 127-129.– ISBN 966-7938-09-3.
31. Plant catalases as NO and H<sub>2</sub>S targets / J. M. Palma et al. *Redox biology*. 2020. Vol. 34. P. 101525. URL: <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101525>.
32. Доліба І.М., Волков Р.А., Панчук І.І. Метод визначення каталазної активності у рослинному матеріалі // Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича.- УДК 577.151.4:58.08.

## ДОДАТКИ

Додаток А

### Апробація результатів дослідної роботи



#### МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ

#### «АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ»

14–15 травня 2025 року

м. Харків

**Організатори** – Державний біотехнологічний університет

**Співорганізатори** – Рейн-Ваальський університет прикладних наук, Німеччина; Університет аграрних наук, м. Упсала, Швеція; Природничий дослідницький центр, м. Вільнюс, Литва; Технологічний університет Лулео, м. Шеллефтеа, Швеція; Харківський національний університет ім. В.М. Каразіна, КО „Харківський зоопарк”, Миколаївський національний аграрний університет, Інститут сільського господарства карпатського регіону НААНУ.

#### Напрями роботи конференцій:

- ✓ Харчова та фармацевтична біотехнологія.
- ✓ Біотехнологія в тваринництві та ветеринарії.
- ✓ Екологічна біотехнологія та біотехнології в рослинництві.
- ✓ Стратегія сталого розвитку та збалансованого природокористування регіонів і локальних територій. Проблеми відходів та екологізація виробництва.
- ✓ Геоекологічний стан мінерально-сировинних та земельних ресурсів України. Екологічний стан ландшафтних систем.
- ✓ Сучасна екологія та технології захисту довкілля: біоекологія, агроекоекологія, геоекоекологія, техноекоекологія, соціоекоекологія (теоретичні та прикладні аспекти).
- ✓ Збалансоване природокористування: органічні технології у сільському господарстві, природна родючість ґрунтів, альтернативні джерела енергії, екологічні будинки.
- ✓ Геоінформаційні технології моніторингу, моделювання та прогнозування екологічного стану територій.
- ✓ Молекулярна біотехнологія.
- ✓ Технології тваринництва та рибництва.
- ✓ Водні біоресурси та аквакультура.
- ✓ Історія біотехнології, екології та аквакультури.
- ✓ Теорія та практика підготовки фахівців з біотехнологій, природничих та аграрних наук.

**43.Сидоренко Д.М.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
*ECOLOGICAL STRESSORS AND THEIR IMPACT ON ORGANISM AGING PROCESSES*

**44.Колдар Л.А.**

Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України  
*МОРФОГЕННИЙ РОЗВИТОК VIBURNUM OPULUS L.*

**45.Ковальова С.О.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
*ВПЛИВ НАДЛИШКОВИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ МАНГАНУ ТА ОСВІТЛЕННЯ НА РІСТ МІКРОВОДОРОСТЕЙ CHLORELLA VULGARIS*

**46.Ларіна Г.І.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
*ДОСЛІДЖЕННЯ РІСТСТИМУЛЮЮЧОЇ АКТИВНОСТІ ПОЛІЗАМІЩЕНИХ ПРОЛІЛПІРАЗОЛІНІВ НА НАСІННІ ЯЧМЕНЮ*

**47.Чайка Т.О.**

Полтавське відділення Академії наук технологічної кібернетики України  
*ІНТЕГРОВАНЕ ЗАСТОСУВАННЯ БІОПРЕПАРАТІВ ЯК ЧИННИК ПІДВИЩЕННЯ СТРЕСОСТІЙКОСТІ СОЇ В ОРГАНІЧНОМУ ЗЕМЛЕРОБСТВІ*

**48.Павлючук А.О.**

Національний університет біоресурсів та природокористування України  
*ВПЛИВ КАРБОНОВИХ НАНОЧАСТИНОК ОКСИДУ ГРАФЕНУ НА ФІЗІОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ СОЇ ЗВИЧАЙНОЇ (GLYCINE MAX.) В УМОВАХ ПОСУХИ*

**49.Льошина Л.Г..**

Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України  
*QUORUM SENSING SIGNALS AS INDUCERS OF METABOLIC ADAPTATION IN PLANTS: EXPERIENCE WITH C6-HSL IN CUCURBITA PEPO AND LINUM USITATISSIMUM CULTURES*

УДК 635.655:54-31-032.36

## ВПЛИВ КАРБОНОВИХ НАНОЧАСТИНОК ОКСИДУ ГРАФЕНУ НА ФІЗІОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ СОЇ ЗВИЧАЙНОЇ (*GLYCINE MAX.*) В УМОВАХ ПОСУХИ

А.О. Павлючук, Т.А. Ткаченко

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: [pavliuchuk.nastia2016@gmail.com](mailto:pavliuchuk.nastia2016@gmail.com)

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: [ttkach82@gmail.com](mailto:ttkach82@gmail.com)

*Актуальність дослідження.* Кліматичні зміни призводять до зростання інтенсивності посух, що суттєво впливає на врожайність сільськогосподарських культур, включаючи сою, яка є важливою олійною та білковою культурою. Пошук ефективних методів підвищення стійкості рослин є пріоритетним завданням для забезпечення продовольчої безпеки. Використання нанотехнологій у сільському господарстві є перспективним напрямом, який дозволяє поліпшити ріст та розвиток рослин, адже карбонові наночастинки сприяють посиленню стійкості до стресових факторів у рослин [1].

*Метою роботи* було дослідити вплив різних концентрацій оксиду графену (GO) на морфометричні показники рослин сої звичайної (*Glycine max.*) за умов моделювання посухи.

*Матеріали та методи досліджень.* Для дослідження використано насіння сої звичайної (*Glycine max.*) сорту «Аполон» вітчизняної селекції. Оцінку морфометричних показників проводили на 16 добу після пророщення та визначали такі показники як довжина пагонів, коренів, загальна довжина рослин та сира маса. Активність фотосинтетичних пігментів, зокрема хлорофілів *a* і *b* та суми каротиноїдів визначали спектрофотометричним методом за довжин хвиль 663 нм, 646 нм та 470 нм відповідно.

Дослідження проведено на рослинах наступних дослідних груп: № 1 - моделювання посухи без використання GO, № 2 – GO 10 мкл/мл з моделюванням посухи, № 4 - GO 25 мкл/мл з моделюванням посухи, № 4 – GO 50 мкл/мл з моделюванням посухи. Насіння сої проб № 2-4 було попередньо замочене у водному розчині оксиду графену відповідної концентрації на 12 годин. Зразок № 1 замочували у воді на 12 годин. До зразків з моделюванням посухи застосовували обмежений режим поливу: один раз на 7 діб.

*Результати дослідження.*

На 16 добу вегетації було проведено оцінку морфо-фізіологічного стану рослин сої. Для цього проведено візуальне порівняльне дослідження рослин різних груп з вимірюванням довжини пагона та кореня, діаметра стебла, кількості листків та маси паростків. Вибірка з кожної дослідної групи становила 5 рослин.

Було встановлено, що зразки, які обробляли різними концентраціями карбонових наночастинок з паралельним моделюванням посушливих умов (№ 2-4) показали позитивну динаміку росту та кращі морфометричні параметри вегетативних органів у порівнянні зі зразком (№1), де рослинам створювали виключно посушливі умови. Така тенденція може свідчити про позитивний вплив карбонових наночастинок на посилення стійкості культури до абіотичного стресу, викликаного засухою.

В подальшому методом спектрофотометрії були проведені аналізи дослідних проб на вміст фотосинтетичних пігментів, зокрема хлорофілу *a* і *b* та суми каротиноїдів. Результати спектрофотометричного аналізу показали, що в умовах модельованої посухи додавання карбонових наночастинок сприяло накопиченню фотосинтетичних пігментів (хлорофілу *a*, пігментів, порівняно із рослинами, вирощеними у сприятливих умовах. Числове їх значення