

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет водогосподарської інженерії та екології

Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Зав. кафедрою екології

доц. \_\_\_\_\_ Вікторія КАЦЕВИЧ

« \_\_\_\_\_ » грудня 2024р.

**Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «магістр»

на тему: **«Оцінка стресового впливу техногенного навантаження на  
агробіогенні системи Дніпропетровської області»**

Виконав: здобувач вищої освіти 2 курсу, групи

МгЕ-1-23 спеціальності

101 «Екологія»

\_\_\_\_\_ Сергій ПАСЮТІН

Керівник \_\_\_\_\_ доцент, к.с-г.н. Ірина ЗЛЕНКО

Рецензент \_\_\_\_\_ с. н. с., д.б.н. Олексій МІХЄЄВ

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет:** Водогосподарської інженерії та екології

**Кафедра:** Екології

**Освітньо-професійна програма:** «Екологія»

**Спеціальність:** 101 «Екологія»

**Ступінь вищої освіти:** Магістр

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою екології

\_\_\_\_\_ Вікторія КАЦЕВИЧ

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**

на підготовку кваліфікаційної роботи

Пасютіну Сергію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Оцінка стресового впливу техногенного навантаження на агробіогенні системи Дніпропетровської області

**Науковий керівник:** Зленко І.Б к.с-г.н.,доцент

затверджена наказом по ДДАЕУ від «25» жовтня 2024 р. № 3584

**2. Термін подання здобувачем роботи:** 16.12.2024 р.

**3. Вихідні дані до роботи:** Дані власних досліджень, екологічного паспорту, наукова література, статистичні звіти

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):** вступ; аналіз впливу важких металів на рослини; матеріали та методи проведення досліджень; результати досліджень та їх обговорення; охорона праці; висновок; список літератури.

**5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):** Рисунків – 3, Таблиць – 12, Використаної літератури– 81, Розділів – 4, Сторінок – 114,

6. Дата видачі завдання: « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН РОБОТИ

№ пп	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.24 – 11.10.24	Виконано
2	Аналіз впливу важких металів на рослини	11.10.24 – 20.10.24	Виконано
3	Умови та методика проведення дослідження	21.10.24 – 23.10.24	Виконано
4	Результати досліджень та їх обговорення	25.10.24 – 16.11.24	Виконано
5	Охорона праці	16.11.24 – 18.11.24	Виконано
6	Висновок	20.11.24 – 25.11.24	Виконано

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Сергій ПАСЮТІН  
(Ім'я та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ірина ЗЛЕНКО  
(Ім'я та прізвище)

## УМОВНЕ СКОРОЧЕННЯ

ROS – реактивні форми кисню

SOD - супероксиддисмутаза

CAT - каталаза

POD - пероксидаза

HSP – білки теплового шоку

MTs - металотіонеїни ,

GSH-депедентні пептиди

ABA - абсцизова кислота

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань. Повний обсяг роботи – 113 сторінок друкованого тексту, включаючи 3 рисунків та 12 таблиць. Перелік посилань містить 81 найменувань.

Метою даної роботи є вивчення розподілу важких металів, зокрема кадмію, цинку нікелю та хрому в різних агробіогенних рослинах.

Об'єкт дослідження – розподіл та вміст важких металів (кадмію, нікелю, хрому, цинку) у сільськогосподарських рослинах, їх акумуляція в різних органах рослин, а також взаємозв'язок між концентрацією металів у ґрунті та рослинності.

Предмет досліджень – Предметом дослідження є вплив важких металів (кадмію, цинку, нікелю та хрому VI) на фізіологічні процеси та продуктивність сільськогосподарських культур.

Основними завданнями є:

1. Проаналізувати наукову літературу, пов'язану з впливом важких металів на рослинність.;
2. Охарактеризувати вплив важких металів на сільськогосподарські культури, зокрема на проростання, ріст, врожайність та якість продукції.

Ключові слова: ВАЖКІ МЕТАЛИ, КАДМІЙ, НІКЕЛЬ, ХРОМ, ЦИНК, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ КУЛЬТУРИ.

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА РОСЛИННИ	10
1.1 Фітотоксичні важкі метали та їх вплив на рослини	10
1.2 Мікроелементи в ґрунті: роль бору в рослинництві	11
1.3 Механізми токсичного впливу важких металів на рослини	14
1.4 Адаптаційні механізми рослин до впливу важких металів	16
1.5 Аналіз сучасних досліджень з впливу техногенного забруднення на посівні культури	21
1.6 Моно- і комплексні добрива: хімічний склад, роль і властивості	24
1.7 Взаємодія добрив з важкими металами в ґрунті	26
1.8 Вплив важких металів на фізіологічні процеси та механізми адаптації рослин	28
2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	38
2.1 Характеристика природно-кліматичних умов Дніпропетровської області	38
2.2 Джерела техногенного забруднення важкими металами	41
2.3 Вміст важких металів у ґрунтах регіону	45
2.4 Заходи зниження техногенного впливу	48
2.5 Загальна характеристика рослин, що досліджуються: соя,	50

	кукурудза, горох, пшениця, ріпак, соняшник	
3.	РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	60
3.1	Фітотоксичність сполук кадмію, цинку, нікелю та хрому за сумісної дії на проростки гібридів кукурудзи і гороху	60
3.2	Вплив важких металів на проростки пшениці та ріпаку	78
3.3	Вплив важких металів на проростки соняшника та сої	85
4.	ОХОРОНА ПРАЦІ.	91
4.1	Інструкція з пожежної безпеки для лабораторії	91
4.2	Інструкція з охорони праці для лаборанта хімічного аналізу	95
	ВИСНОВКИ	105
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	106

## ВСТУП

Сучасний стан агроecosистем України перебуває під значним впливом техногенних факторів, зокрема забруднення важкими металами, яке є одним із найгостріших екологічних викликів. Індустріалізація, інтенсивне сільське господарство, урбанізація та інші антропогенні процеси сприяють накопиченню у ґрунтах токсичних елементів, таких як кадмій, свинець, цинк, мідь, нікель та хром. Це призводить до зниження родючості ґрунту, порушення фізіологічних процесів у рослинах і погіршення якості врожаю, що становить небезпеку для екосистем і здоров'я людини.

Особливу актуальність ця проблема має для Дніпропетровської області — одного з найбільших промислових регіонів України. Значна частина сільськогосподарських угідь регіону піддається постійному впливу забруднення від металургійних, гірничодобувних і енергетичних підприємств, а також транспорту. Ці фактори зумовлюють потребу у дослідженні масштабів забруднення ґрунтів і рослинності, а також впливу важких металів на фізіологічний стан і продуктивність основних сільськогосподарських культур.

Токсична дія важких металів проявляється у порушенні обмінних процесів, індукції окислювального стресу, зниженні фотосинтетичної активності, руйнуванні хлоропластів і зменшенні біомаси рослин. Наприклад, кадмій і хром, які легко накопичуються у тканинах рослин, можуть значно знижувати врожайність і якість продукції. Крім того, ці елементи через харчовий ланцюг впливають на безпеку споживання продукції.

Актуальність цього дослідження обумовлена необхідністю розробки підходів до зменшення негативного впливу техногенного забруднення на агроecosистеми. Вивчення впливу важких металів на стан ґрунтів і



рослинності дозволить не лише оцінити поточний стан екосистем, але й запропонувати ефективні шляхи для покращення продуктивності та екологічної безпеки агровиробництва.

Мета роботи полягає у визначенні впливу важких металів на агроекосистеми Дніпропетровської області, оцінці їхнього впливу на фізіологічні процеси в рослинах.

# 1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА РОСЛИНИ

## 1.1 Фітотоксичні важкі метали та їх вплив на рослини

Важкі метали, такі як мідь, кадмій та свинець, відіграють суттєву роль у формуванні екологічних ризиків для агроecosystem. Вони потрапляють у ґрунт з промисловими відходами, атмосферними опадами, добривами і пестицидами, що негативно позначається на життєдіяльності рослин.

Мідь є важливим мікроелементом, який виконує кілька функцій у рослинному організмі, зокрема бере участь у фотосинтезі, диханні та синтезі білків. Однак при високих концентраціях мідь стає токсичною, спричиняючи окислювальний стрес, який може призвести до порушення функцій клітинних мембран. Дослідження показують, що мідь у надлишку знижує вміст хлорофілу та гальмує ріст рослин, що особливо помітно у польових культур, таких як кукурудза та пшениця [1].

Федорович І.М. та Коваленко Л.В. (2020) зазначають, що надмірна концентрація міді може викликати утворення вільних радикалів, які пошкоджують клітинні мембрани та пригнічують процес поглинання води кореневою системою. Це призводить до порушення водного обміну та зменшення фотосинтетичної активності, особливо в умовах техногенного навантаження [2].

Кадмій належить до дуже токсичних важких металів, які легко поглинаються кореневою системою рослин і накопичуються у їхніх тканинах. Це призводить до мутагенних і цитотоксичних ефектів, а також зменшення врожайності, особливо у польових культур, таких як соняшник та ячмінь [3]. Кадмій негативно впливає на дихання рослин, окислювальні процеси та метаболізм азоту, знижуючи кількість хлорофілу та гальмуючи фотосинтез [4].

Дослідження Петрової О.М. та Іващенко Н.В. (2019) підтверджують, що навіть незначне збільшення концентрації кадмію викликає стресові реакції у рослин і знижує продуктивність, особливо на забруднених ділянках. Крім того, кадмій легко мігрує через ґрунт і може накопичуватись у продукції, що становить небезпеку для харчового ланцюга [5].

Свинець також є одним із найнебезпечніших металів для системи ґрунт-рослина. Він поглинається кореневою системою рослин та накопичується у різних органах, викликаючи порушення обміну речовин, зниження фотосинтетичної активності та пошкодження структури клітин. За даними досліджень Шевченка О.О. та Рябчука В.М. (2019), свинець має значний токсичний вплив на кореневу систему, знижуючи здатність рослин до поглинання води та поживних речовин. Це призводить до зменшення врожайності і погіршення стійкості до абіотичних стресів [6].

## 1.2 Мікроелементи в ґрунті: роль бору в рослинництві

Бор (В) є одним із найважливіших мікроелементів для рослинництва, оскільки він бере участь у багатьох життєво важливих процесах рослин. Хоча рослини потребують бору у відносно невеликих кількостях, його дефіцит або надлишок може спричинити серйозні порушення у фізіології та морфології рослин. Нестача бору є частим явищем на кислих ґрунтах, а також на ґрунтах з низьким вмістом органічної речовини.

Бор є важливим для процесу поділу клітин, а також формування клітинних стінок. Дослідження показують, що бор впливає на синтез пектинових речовин, які забезпечують міцність клітинних стінок і з'єднують клітини між собою. Це особливо важливо для підтримання стабільності тканин, особливо у молодих органах рослин [7]. Бор є критично важливим для генеративного розвитку рослин, зокрема для формування пилку та

запліднення. Дефіцит бору може призвести до деформації квіток, зменшення життєздатності пилку, порушення запліднення і, як наслідок, зниження врожайності. У зернових культурах, таких як пшениця та кукурудза, дефіцит бору може суттєво знизити кількість і якість зерен [8]. Бор впливає на поглинання та метаболізм азоту, який є важливим для росту та розвитку рослин. Вміст бору в рослині регулює синтез нуклеїнових кислот і білків, що підтримує високий рівень метаболічної активності, особливо під час активного росту [9]. Бор забезпечує стабільність клітинних мембран, що впливає на водний баланс рослин. За даними досліджень, бор також підвищує стійкість рослин до посухи, оскільки підтримує оптимальний водний режим у клітинах, захищаючи рослини від втрат вологи в стресових умовах [10].

Основними симптомами нестачі бору є порушення росту кореневої системи, деформація листків і квіток, загальне зниження вмісту хлорофілу та гальмування росту рослин. Дефіцит бору також викликає зниження опірності рослин до захворювань, оскільки він порушує процеси, пов'язані з синтезом структурних компонентів клітинних стінок [11]. Наприклад, у соняшнику та ріпаку нестача бору може спричинити погану форму плодів і значне зниження врожайності. Хоча нестача бору є більш поширеною проблемою, його надлишок також може викликати токсичність у рослин, яка проявляється в пожовтінні країв листків, некротичних плямах і загальному ослабленні рослинного організму. Цей ефект посилюється на сухих ґрунтах і в умовах високої температури, коли бор не вимивається з ґрунту і накопичується в кореневій зоні [7].

Для пшениці бор є важливим на стадії генеративного розвитку, оскільки впливає на життєздатність пилку і формування зерна. Дослідження вказують, що борна недостатність може знизити врожайність зернових культур до 15% за рахунок меншого утворення насіння і зниження його якості [8]. У соняшнику і ріпаку бор необхідний для розвитку генеративних органів і запобігання деформації кошиків і стручків. Недостатність бору

може призвести до деформації плодів, зменшення розміру кошика та зниження вмісту олії, що впливає на економічну цінність урожаю [9]. У кукурудзи бор є важливим для розвитку стебла і листків. Дефіцит бору може призвести до зменшення розмірів листків, зниження фотосинтетичної активності та загального пригнічення росту. Дослідження вказують, що кукурудза є однією з культур, яка особливо чутлива до нестачі бору в період активного вегетативного росту [10].

На кислих ґрунтах бор є менш доступним, що може призвести до його дефіциту. Рівень рН, який забезпечує найкращу доступність бору для рослин, зазвичай варіюється в межах 5,5–7,0 [7].

Ґрунти з низьким вмістом органічної речовини зазвичай мають менший рівень біодоступного бору, оскільки органічна речовина є джерелом бору в процесі розкладання. Внесення органічних добрив може підвищити рівень бору та покращити його доступність для рослин [9]. За умов посухи доступність бору значно знижується, оскільки бор є відносно нерухомим елементом і потребує достатньої кількості вологи для транспортування до коренів. Тому на сухих ґрунтах дефіцит бору стає більш вираженим, що потребує додаткового внесення добрив [10].

Борні добрива використовуються для забезпечення достатнього рівня цього елемента в ґрунтах, що мають його дефіцит. Внесення бору може бути ефективним заходом для підвищення врожайності, особливо для культур, чутливих до його нестачі. Вибір борних добрив, таких як борна кислота або борат натрію, залежить від типу культури, характеристик ґрунту та потреби в борі.

Таким чином, бор є життєво важливим мікроелементом для багатьох польових культур, що впливає на їх ріст, стійкість до стресів та продуктивність. Дефіцит або надлишок бору можуть призвести до серйозних змін у фізіології та морфології рослин, тому контроль його рівня у ґрунті є важливим для стабільного і високого врожаю.

### 1.3 Механізми токсичного впливу важких металів на рослини

Важкі метали, такі як мідь, кадмій, свинець та інші, внаслідок накопичення у ґрунті та воді, можуть негативно впливати на фізіологічні процеси рослин і порушувати їхній ріст і розвиток. Механізми токсичного впливу важких металів складні й різноманітні; вони охоплюють структурні, метаболічні та генетичні порушення у рослинах.

Одним із основних механізмів токсичного впливу важких металів є індукція окислювального стресу, який призводить до утворення реактивних форм кисню (ROS), таких як супероксид-аніон ( $O_2^-$ ), пероксид водню ( $H_2O_2$ ) і гідроксильний радикал ( $OH^\cdot$ ). Підвищений рівень ROS викликає пошкодження ліпідів клітинних мембран, білків і ДНК. Цей процес порушує клітинну структуру та функцію, призводячи до загального пригнічення росту та розвитку рослин [12].

ROS можуть пошкоджувати мембрани клітин, викликаючи процес ліпідної пероксидації, що призводить до втрати проникності клітинних мембран. Це порушує обмін речовин та порушує захисні механізми клітин. Такі метали, як кадмій і мідь, є потужними індукторами окислювального стресу та посилюють утворення ROS навіть у низьких концентраціях [13].

Важкі метали порушують фотосинтетичну активність, знижуючи продуктивність хлоропластів та зменшуючи вміст хлорофілу в листках. Це відбувається через заміщення основних іонів (таких як  $Mg^{2+}$ , що є центром хлорофілу) важкими металами, такими як кадмій та свинець. Вони інгібують синтез хлорофілу, пригнічують активність фотосинтетичних ферментів і знижують ефективність фотосинтетичного електронного транспорту. Дослідження підтверджують, що за наявності важких металів зменшується здатність рослин до фотосинтезу, що негативно впливає на врожайність [14].

Накопичення важких металів у ґрунті та в кореневій зоні рослин порушує здатність коренів до поглинання води, що призводить до

осмотичного стресу. Такий метал, як свинець, має тенденцію накопичуватися в кореневій системі, порушуючи поглинання поживних речовин, таких як калій, магній та кальцій. Це обмежує транспорт поживних речовин і води до надземних частин рослини, що призводить до пригнічення росту та висихання тканин [15].

Кадмій також має сильний вплив на водний баланс рослин, оскільки він накопичується у вакуолях та порушує обмін іонів між клітинами. Це створює умови для розвитку осмотичного стресу, що посилюється в умовах посухи або інших стресових факторів. Рослини з порушеним водним обміном швидше в'януть, особливо в умовах високих температур.

Важкі метали мають здатність інгібувати активність важливих ферментів, що беруть участь у метаболічних процесах рослин. Наприклад, кадмій блокує активність нітратредуктази, яка бере участь у метаболізмі азоту, що призводить до зменшення синтезу білків і порушення метаболізму азоту в рослинах [16]. Крім того, свинець інгібує активність ключових ферментів дихання і фотосинтезу, що знижує енергетичний потенціал клітин та уповільнює ріст рослин.

Метали також можуть змінювати структуру ферментів за рахунок заміщення основних іонів (наприклад, Zn або Mg) у їхньому активному центрі. Це призводить до зниження ефективності біохімічних реакцій у рослинах, таких як синтез амінокислот та обмін вуглеводів [17].

Наявність важких металів, таких як кадмій і мідь, у ґрунті впливає на обмін азоту, що критично важливо для синтезу білків і амінокислот. Інгібування ферментів, відповідальних за метаболізм азоту, призводить до зниження вмісту білків у рослинних тканинах. Відомо, що кадмій здатен блокувати процес засвоєння амонію, що викликає дисбаланс у процесах синтезу амінокислот і, як наслідок, порушує загальний білковий обмін [18].

Деякі важкі метали мають генотоксичні властивості, тобто здатні викликати пошкодження ДНК, що призводить до мутацій і порушень у процесі поділу клітин. Кадмій, зокрема, здатен викликати зміни в

генетичному матеріалі клітин, що призводить до порушення росту і розвитку рослин. Встановлено, що кадмій і свинець спричиняють утворення «мікроядер» у клітинах, які є маркерами генетичних ушкоджень і можуть спричинити порушення нормальної морфології рослин [19].

Надмірне накопичення важких металів може активувати апоптоз (програмовану клітинну смерть) у рослинних клітинах. Апоптоз є захисним механізмом, який запускається для усунення пошкоджених клітин, однак у випадку хронічного впливу металів цей процес може стати неконтрольованим і призвести до масштабної загибелі клітин. Механізм апоптозу активується під впливом ROS та окислювального стресу, викликаного важкими металами, що призводить до деградації клітинного матеріалу і зупинки росту [17].

Важкі метали також впливають на синтез фітогормонів, таких як ауксини, цитокініни та гібереліни, що контролюють ріст і розвиток рослин. Наявність кадмію та свинцю може пригнічувати вироблення ауксинів, що призводить до порушення росту кореневої системи та пагонів. Наприклад, кадмій знижує рівень ауксину, який контролює поділ клітин і розвиток корневих волосків, що призводить до скорочення кореневої системи і зниження поглинання води та поживних речовин [13].

#### 1.4 Адаптаційні механізми рослин до впливу важких металів

Рослини здатні розвивати різноманітні адаптаційні механізми для захисту від токсичного впливу важких металів, таких як мідь, кадмій, свинець та інші. Ці механізми можна умовно поділити на три основні категорії: ексклюзія (запобігання поглинанню металів), внутрішньоклітинна ізоляція (детоксикація) та активація антиоксидантної системи.



Перший рівень захисту рослин від токсичного впливу важких металів – це запобігання їхньому надходженню в кореневу систему. Деякі рослини здатні зменшувати проникнення металів через кореневу поверхню, використовуючи механізм ексклюзії. Це може досягатися шляхом. Рослини можуть змінювати структуру мембран кореневих клітин, що обмежує надходження іонів металів у клітини. Дослідження показують, що на поверхні коренів утворюється шар слизу або екзополісахаридів, які знижують доступність металів для кореневих клітин. Деякі види рослин виділяють органічні кислоти, такі як малінова або лимонна кислота, які здатні зв'язувати важкі метали в ґрунті, знижуючи їхню рухливість і доступність для коренів [20].

Рослини, що не можуть уникнути надходження важких металів, використовують різні стратегії для їхньої ізоляції та детоксикації на внутрішньоклітинному рівні. Основними механізмами є накопичення металів у вакуолях та утворення хелатних комплексів. Важкі метали, які потрапляють у клітину, часто транспортуються у вакуолі – органели, що можуть зберігати токсичні речовини без впливу на цитоплазму. Це ізолює метали від основних метаболічних процесів клітини і дозволяє зберігати їх у нетоксичній формі. Наприклад, кадмій часто накопичується у вакуолях як нетоксичний комплекс з органічними кислотами або амінокислотами [21]. Одним із основних методів детоксикації є зв'язування металів з органічними молекулами – хелатами, такими як фітохелатини та металотіонеїни. Ці сполуки створюють стійкі комплекси з важкими металами, зменшуючи їх токсичність. Наприклад, фітохелатини – це короткі пептиди, які зв'язуються з металами і утворюють нетоксичні комплекси, що легко транспортуються у вакуолі для подальшої ізоляції [22].

Токсичний вплив важких металів часто призводить до утворення реактивних форм кисню (ROS), які пошкоджують клітинні мембрани, білки та ДНК. Для боротьби з цим рослини активують антиоксидантні системи, що нейтралізують ROS і захищають клітини від окислювального стресу. Рослини

активують ферменти-антиоксиданти, такі як супероксиддисмутаза (SOD), каталаза (CAT) та пероксидаза (POD), які каталізують розпад ROS до менш токсичних форм. Супероксиддисмутаза перетворює супероксид-аніон на пероксид водню, а каталаза розкладає пероксид водню до води і молекулярного кисню, зменшуючи токсичне навантаження на клітину [23]. Крім ферментів, рослини використовують неферментативні антиоксиданти, такі як аскорбат (вітамін С), глутатіон та токоферол (вітамін Е), які зв'язують і нейтралізують вільні радикали. Глутатіон, наприклад, є основним антиоксидантом, що бере участь у процесі детоксикації кадмію і свинцю, захищаючи клітини від оксидативного пошкодження [24]. Важкі метали здатні викликати індукцію білків активацію генів, що кодують синтез білків теплового шоку (HSP), які виконують важливу захисну функцію, сприяючи адаптації клітин до несприятливих умов. HSP-білки беруть участь у стабілізації білкових молекул, запобігають агрегації денатурованих білків та сприяють відновленню клітинних структур, пошкоджених токсичним впливом важких металів. Дослідження показують, що різні класи HSP (HSP70, HSP90, HSP100) активуються під впливом кадмію (Cd), свинцю (Pb), нікелю (Ni) та інших металів. Наприклад, Wang et al. (2004) продемонстрували підвищення рівня HSP70 у клітинах рослин за умов кадмієвого стресу [25]. Kosová et al. (2011) вказують на те, що HSP-білки відіграють ключову роль у формуванні адаптаційних механізмів рослин, таких як регуляція осмотичного потенціалу та підтримка клітинного метаболізму [26]. Крім того, Mittler (2002) зазначає, що HSP-білки функціонують у взаємодії з антиоксидантними ферментами (каталазою, супероксиддисмутазою), що знижує оксидативний стрес, спричинений металами [27]. Аналогічно, Gupta et al. (2013) акцентують увагу на ролі HSP90 у підтримці функцій білкових комплексів та захисті клітинної структури під час впливу металів [28]. Hasanuzzaman et al. (2013) також повідомляють, що важкі метали викликають утворення не лише HSP, а й інших білків стресу, таких як металотіонеїни (MTs), які допомагають

зв'язувати та нейтралізувати токсичні метали [29]. Ці білки діють спільно з HSP, сприяючи підвищенню стійкості рослин до абіотичних стресів. Kültz (2005) пояснює, що молекулярний механізм дії HSP включає полегшення правильної згортки білків (шаперонна функція) та деградацію пошкоджених білків через убіквітин-протеасомну систему [30]. Деякі рослини адаптуються до високих концентрацій важких металів шляхом регуляції метаболічних процесів, включаючи зміну поглинання та транспорту поживних речовин. Така адаптація дозволяє рослинам зменшити токсичний вплив металів і підтримувати життєздатність навіть у забруднених умовах.

Рослини, що зростають у середовищах із високим вмістом важких металів, часто змінюють пріоритетність поглинання іонів. Наприклад, вони можуть знижувати поглинання кадмію, свинцю та інших токсичних металів на користь основних елементів, таких як калій, магній, та кальцій, щоб зберегти баланс поживних речовин [31].

Huang et al. (2008) показали, що рослини *Oryza sativa* в умовах високого вмісту кадмію активують системи, які перешкоджають його транспорту в клітини, водночас підтримуючи поглинання калію [32]. Подібно до цього, Schützendübel et al. (2001) зазначили, що у *Picea abies* під впливом важких металів змінюється механізм поглинання фосфору та калію для зменшення метаболічних порушень [33].

Токсичний вплив важких металів змушує рослини активувати антиоксидантні системи, щоб зменшити оксидативний стрес. Mittler (2002) вказує, що підвищення активності ферментів, таких як супероксиддисмутаза (SOD) та глутатіонредуктаза, є важливим механізмом для захисту від пошкодження, спричиненого важкими металами [27].

Додатково, рослини адаптують обмін речовин шляхом синтезу хелаторів, таких як фітохелатини та органічні кислоти, які зв'язують іони важких металів та зменшують їх токсичність [20]. Наприклад, фітохелатини (GSH-депедентні пептиди) зв'язують кадмій та інші метали в клітині, ізолюючи їх у вакуолях [21].

Rucińska-Sobkowiak (2016) відзначає, що одним із важливих адаптаційних механізмів є зміна активності плазматичних мембранних транспортерів, які регулюють потік іонів між клітиною та навколишнім середовищем. Наприклад, під впливом цинку активуються транспортні системи, які знижують надлишкове накопичення металу, що сприяє захисту клітин [34].

Дослідження Shahid et al. (2014) показують, що під впливом свинцю рослини накопичують значну кількість органічних кислот у кореневій системі, які беруть участь у зв'язуванні токсичних металів і полегшують їх ізоляцію [35].

Деякі види рослин здатні до гіперакумуляції важких металів, накопичуючи їх у високих концентраціях без прояву токсичних симптомів. Це є рідкісним адаптаційним механізмом, але деякі види рослин, наприклад, *Thlaspi caerulescens* (гіпернакопичувач цинку і кадмію), здатні накопичувати метали, перетворюючи їх на нетоксичні форми і зберігаючи їх у надземних частинах [36]. Така здатність дозволяє рослинам виживати на сильно забруднених ділянках і навіть використовуватися в фітотехнологіях для очищення ґрунтів

Гормони, такі як ауксини, абсцизова кислота (АВА) та етилен, відіграють важливу роль у регуляції адаптаційних реакцій рослин на стрес, спричинений важкими металами. Наприклад, АВА активує захисні реакції, зменшуючи транспірацію (випаровування води з листків) і підтримуючи водний баланс у клітинах. Це знижує ризик надмірного накопичення металів у рослинах і сприяє збереженню ресурсів для боротьби зі стресом [37].

Ці адаптаційні механізми дозволяють рослинам виживати в умовах високих концентрацій важких металів, підтримуючи баланс клітинних процесів і знижуючи токсичний вплив на клітини. Використання таких природних механізмів може бути перспективним для розробки методів очищення забруднених територій.

## 1.5 Аналіз сучасних досліджень з впливу техногенного забруднення на посівні культури

Збільшення техногенного навантаження на агроєкосистеми спричиняє накопичення важких металів, залишків пестицидів та інших забруднювачів у ґрунтах, що негативно впливає на розвиток та врожайність посівних культур. Різні джерела забруднень – від промислових викидів і сільськогосподарських добрив до транспорту та нераціонального використання пестицидів – погіршують стан ґрунтів, що є критично важливим для сталого ведення сільського господарства. Останні дослідження свідчать, що техногенні забруднювачі впливають на фізіологію, продуктивність і якість харчової продукції зернових та олійних культур. За даними Gupta et al. (2013), кадмій є одним з найнебезпечніших металів через його високу токсичність навіть у низьких концентраціях. Кадмій легко проникає в кореневу систему рослин і може досягати надземних органів, таких як листя і зерно, що збільшує ризик його потрапляння в харчовий ланцюг. Дослідження показують, що за концентрації кадмію у ґрунті понад 0,5 мг/кг продуктивність пшениці знижується на 20-30% через зниження фотосинтетичної активності та порушення обміну речовин [28]. Свинець є одним із найпоширеніших важких металів у ґрунтах, забруднених через промислові викиди та транспорт. За дослідженням Sharma et al. (2016), концентрація свинцю в ґрунті вище 10 мг/кг призводить до зниження вмісту білка у зернових культурах на 15-20%, що негативно впливає на якість врожаю. Крім того, свинець порушує баланс поживних речовин і знижує поглинання кальцію і калію, що призводить до погіршення стійкості рослин до стресових умов [38]. Мідь, хоча і є необхідним мікроелементом, стає токсичною в підвищених концентраціях. Дослідження Li et al. (2014) демонструють, що концентрації міді понад 50 мг/кг викликають у посівних культур (соняшник, кукурудза) зниження фотосинтетичної активності та погіршення водного балансу. Це, в свою

чергу, призводить до зменшення продуктивності на 10-15% і впливає на якість зерна через накопичення вільних радикалів у клітинах [39]. Органофосфатні сполуки, такі як малатіон, є широко вживаними у сільському господарстві, але їхнє накопичення в ґрунті та воді створює загрозу для посівних культур. Hernandez & D'Andrea (2018) вказують, що тривале застосування органофосфатів у ґрунті знижує врожайність кукурудзи на 15% через зниження біодоступності макроелементів і зменшення активності корневих мікроорганізмів. Органофосфати також пригнічують активність ферментів, таких як нітратредуктаза, яка є ключовою для метаболізму азоту у рослинах [40]. Хоча нітратні добрива є важливим джерелом азоту, їх надлишок призводить до кислотності ґрунту та накопичення нітратів у рослинах. За даними Miller et al. (2017), у випадках високого використання азотних добрив рівень нітратів у ґрунті перевищує 50 мг/кг, що негативно впливає на врожайність культур, таких як пшениця і ячмінь. Нітрати, що залишаються в ґрунті, потрапляють у харчовий ланцюг і можуть становити загрозу здоров'ю людини, особливо якщо використовуються на ділянках з надмірним зрошенням [41].

Техногенне забруднення ґрунтів важкими металами і пестицидами спричиняє значне зниження біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів, що є важливими для забезпечення здоров'я агроєкосистеми та розвитку рослин. Дослідження Singh et al. (2015) свідчать, що у ґрунтах, забруднених кадмієм на рівні 1 мг/кг, чисельність азотфіксуючих бактерій знижується на 40-50%. Це зменшує доступність азоту для рослин і призводить до зниження врожайності культур, таких як соя і горох, які мають високі потреби в азоті [42]. Мікоризні гриби є важливими для ефективного поглинання рослинами фосфору, калію та інших поживних речовин. Проте, за даними Fomina et al. (2017), накопичення важких металів у ґрунтах (зокрема, свинцю і кадмію) знижує активність мікоризних грибів до 30%, що негативно впливає на ріст і розвиток культур. Це явище особливо помітне у зернових культур, які

потребують високу ефективність поглинання поживних речовин для стабільної продуктивності [43].

Для адаптації до умов техногенного навантаження рослини активують ряд захисних механізмів, таких як посилення антиоксидантної активності, утворення хелатуючих сполук і накопичення важких металів у вакуолях. За даними Foyer et al. (2019), рослини підвищують активність антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза та каталаза, що дозволяє знижувати рівень окислювального стресу. Це допомагає зберегти функціональність клітин і знижувати пошкодження, викликане надмірним накопиченням важких металів [44]. Техногенне забруднення рідко включає лише один вид забруднювача; частіше відбувається комбінація важких металів і залишків пестицидів. Liu et al. (2020) зазначають, що комбінований вплив кадмію, свинцю і орґанофосфатів знижує врожайність *Zea mays* на 20-30%. Такий сукупний ефект значно погіршує метаболізм рослин та ефективність фотосинтезу [45]. За дослідженням Khan et al. (2017), при високих концентраціях важких металів у ґрунті знижується вміст білка, вітамінів і мінералів у зерні. Наприклад, концентрація білка у *Triticum aestivum* знижується на 12-15% при забрудненні ґрунту кадмієм, що негативно впливає на якість продуктів харчування і має економічні наслідки для аграрного сектора [46].

Більшість дослідників пропонують інтегровані стратегії управління техногенним забрудненням, серед яких: Використання орґанічних добрив для підвищення біодоступності макро- та мікроелементів, зокрема орґанічні добрива покращують ґрунтову структуру та знижують токсичність важких металів. Введення біоремедіаційних технологій, таких як застосування гіперакумуляторів, що дозволяє очищати ґрунт від важких металів, використовуючи рослини, які накопичують метали у надземних частинах [47]. Обмеження використання пестицидів та перехід на екологічно безпечні засоби захисту рослин, що дозволить знизити кількість стійких до розкладу речовин у ґрунтах.

## 1.6 Моно- і комплексні добрива: хімічний склад, роль і властивості

Добрива є основним джерелом поживних речовин для рослин, і їх використання є ключовим для підтримки родючості ґрунту та підвищення врожайності. За складом добрива можна поділити на моно- (однокомпонентні) та комплексні (багатокомпонентні) добрива, кожен з яких має свої особливості та застосовується залежно від потреб культур.

Моно-добрива містять один основний елемент живлення, що дозволяє коригувати кількість одного конкретного елемента залежно від характеристик ґрунту та культури.

Азотні добрива, такі як аміачна селітра ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), сечовина ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) і сульфат амонію ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), є основними джерелами азоту, що стимулює синтез амінокислот і білків, необхідних для активного росту і розвитку рослин [28]. Азот покращує утворення хлорофілу, що сприяє фотосинтетичній активності і загальному зростанню рослинної маси [7]. Азотні добрива зазвичай вносять на початку вегетаційного періоду, особливо у фази активного росту, однак важливо контролювати їх рівень, оскільки надмірне застосування може призвести до фітотоксичні реакції [48].

Основними фосфорними добривами є суперфосфат ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ), діамоній фосфат ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) і фосфоритне борошно. Фосфор необхідний для енергетичного обміну в рослинах і розвитку кореневої системи, сприяє утворенню плодів та підвищує стійкість до стресових факторів [8]. Фосфорні добрива рекомендується вносити перед посівом або на початку вегетаційного періоду. Вони особливо ефективні на ґрунтах із низьким вмістом органічних речовин та у посушливих умовах, де важливо забезпечити розвиток кореневої системи [10].

Калійні добрива, зокрема хлористий калій ( $\text{KCl}$ ) і сульфат калію ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), містять калій, який покращує водний баланс у рослинах, підвищує їхню стійкість до посухи та стресових умов, а також сприяє синтезу



вуглеводів [49]. Калійні добрива є особливо ефективними на піщаних ґрунтах та в регіонах із частими посухами, оскільки калій підвищує стійкість до абіотичних стресів і покращує обмін речовин у рослинах [7].

Комплексні добрива включають у свій склад два або більше ключових елементів живлення, таких як азот, фосфор і калій, що дозволяє забезпечити рослини збалансованим живленням. NPK-добрива є найбільш поширеними комплексними добривами і містять азот, фосфор та калій у різних пропорціях (наприклад, 10-10-10 або 15-15-15). Такі добрива забезпечують комплексне живлення, що стимулює ріст, коренеутворення, розвиток плодів і загальну стійкість до хвороб [50]. Комплексні добрива є ефективними для внесення на етапах, коли культура потребує збалансованого живлення, наприклад, у період цвітіння або початку плодоношення. Їх зручно застосовувати на великих площах, де потрібне одночасне внесення кількох елементів [51]. Комплексні добрива можуть додатково містити мікроелементи, такі як бор, цинк або мідь, що покращують засвоєння основних елементів і стимулюють ріст рослин. Наприклад, додавання бору у комплексні добрива сприяє утворенню квітів та стійкості до стресів. Такі добрива підходять для ґрунтів, де є дефіцит певних мікроелементів, або для культур з підвищеними потребами в конкретних елементах, як-от олійні культури, для яких важливий бор [52].

Переваги та недоліки моно- та комплексних добрив. Моно-добрива переваги: дозволяють точніше контролювати рівень окремого елемента в ґрунті, що є ефективним при дефіциті конкретного елемента [17]. Недоліки: при використанні на великих площах може бути складним і дорогим, оскільки потрібно застосовувати кілька добрив для забезпечення повного живлення [8]. Комплексні добрива переваги: забезпечують одночасне внесення кількох елементів, що зручно для великих площ та прискорює процес внесення [47]. Недоліки: надмірне внесення може призвести до накопичення окремих елементів у ґрунті, особливо азоту, що може спричинити забруднення води та екологічні проблеми [51].

## 1.7 Взаємодія добрив з важкими металами в ґрунті

Використання добрив у сільському господарстві має важливий вплив на врожайність культур, однак їхня взаємодія з важкими металами в ґрунті може мати значні екологічні наслідки. Важкі метали, такі як кадмій, свинець і мідь, які накопичуються в ґрунті через техногенне навантаження, можуть взаємодіяти з елементами добрив, що впливає на їхню біодоступність, токсичність і переміщення в ґрунтовому профілі. Добрива можуть впливати на біодоступність важких металів у ґрунті залежно від їхнього хімічного складу.

Азотні добрива, дослідження показують, що амонійні форми азотних добрив, такі як аміачна селітра ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), можуть збільшувати біодоступність важких металів у ґрунті через підкислення ґрунтового розчину, що сприяє розчиненню металів [1]. Xie et al. (2016) відзначають, що підвищення кислотності внаслідок внесення амонійних добрив збільшує рухомість кадмію в ґрунті на 25%, що підвищує ризик його поглинання рослинами [53].

Фосфорні добрива, внесення фосфорних добрив, таких як суперфосфат ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ), може знижувати біодоступність важких металів шляхом утворення нерозчинних фосфатів. Gupta & Gupta (1998) зазначають, що фосфорні добрива здатні зв'язувати важкі метали, такі як свинець та кадмій, у вигляді нерозчинних фосфатів, що зменшує їх доступність для рослин [54]. Дослідження показують, що застосування фосфору може знизити накопичення кадмію у пшениці на 15-20% .

Органічні добрива, такі як компост і гній, містять органічні кислоти і гумінові сполуки, які можуть зв'язувати важкі метали в ґрунті та знижувати їхню токсичність. Компост і біочари містять хелатуючі агенти, які зв'язують іони важких металів, зменшуючи їх токсичність і рухливість. Smith et al. (2018) досліджували вплив компосту на ґрунтах, забруднених свинцем, і

встановили, що використання компосту на 30% знижує рухомість свинцю, сприяючи утворенню стабільних комплексів [47]. Використання біочарів зменшує біодоступність кадмію на 15–20%, що призводить до зниження його поглинання рослинами [55].

Гній і гумінові кислоти, органічний гній містить гумінові кислоти, які здатні зв'язувати важкі метали, утворюючи стабільні комплекси. Це дозволяє знизити ризик надмірного накопичення металів у рослинах. Дослідження Wang & Chen (2021) показали, що внесення гною на ґрунтах із підвищеним вмістом свинцю знижує його доступність для кореневої системи рослин на 25-30%.

Калійні добрива, зокрема хлористий калій (KCl), мають іонообмінну дію, що може впливати на розчинність важких металів у ґрунті. Калійні добрива здатні знижувати біодоступність важких металів через іонний антагонізм між іонами калію ( $K^+$ ) та іонами важких металів, таких як кадмій ( $Cd^{2+}$ ) і свинець ( $Pb^{2+}$ ). Li et al. (2019) зазначають, що калій здатен конкурувати з кадмієм за абсорбцію коренями рослин, знижуючи поглинання кадмію кукурудзою на 10-15% у ґрунтах з високим вмістом цього металу [39].

Комплексні добрива, що містять мікроелементи, такі як бор або цинк, здатні впливати на поглинання важких металів через конкурентне поглинання. Комплексні добрива з бором можуть знижувати токсичність кадмію та свинцю в ґрунті через конкурентне поглинання. За даними Kravchenko et al. (2021), внесення бору в ґрунт може знизити поглинання кадмію на 15-18% у культурах, таких як соняшник і ріпак. Це пов'язано з тим, що бор конкурує з кадмієм за активні поглинальні центри у кореневій системі рослин [56].

Надмірне використання фосфорних та органічних добрив може сприяти накопиченню важких металів, таких як кадмій, у ґрунті, що призводить до кумулятивного ефекту. Накопичення кадмію, дослідження показують, що фосфорні добрива можуть містити невеликі кількості кадмію, який при

надмірному застосуванні накопичується в ґрунті та збільшує ризик його потрапляння у рослини. Alloway (1995) зазначає, що фосфорні добрива можуть сприяти накопиченню кадмію в ґрунті на 0,5-1,0 мг/кг щорічно, що призводить до його довгострокового накопичення [57]. Проблема довготривалого накопичення металів через органічні добрива. Органічні добрива, зокрема гній, також можуть містити важкі метали в низьких концентраціях, які накопичуються при щорічному внесенні. За даними Smith et al. (2019), щорічне внесення органічного гною збільшує концентрацію свинцю у верхньому шарі ґрунту на 0,2 мг/кг [48].

#### 1.8 Вплив важких металів на фізіологічні процеси та механізми адаптації рослин

Внесення добрив може суттєво впливати на біодоступність важких металів у ґрунті, знижуючи їхню токсичність і підвищуючи стійкість рослин до шкідливого впливу металів. Залежно від складу, добрива можуть сприяти стабілізації важких металів, знижуючи їх рухомість, або зменшувати їхню доступність для рослин шляхом хімічної взаємодії.

Фосфорні добрива, такі як суперфосфат, ефективні для зменшення токсичності важких металів завдяки утворенню нерозчинних фосфатних комплексів з металами, такими як свинець і кадмій. Зниження біодоступності кадмію та свинцю, за даними Gupta & Gupta (1998), фосфорні добрива можуть знижувати біодоступність важких металів через утворення стабільних фосфатних осадів [54]. Це підтверджується дослідженням Alloway (1995), де зазначено, що фосфорні добрива знижують біодоступність свинцю на 20-30% та кадмію на 15-20%, що допомагає зменшити токсичний вплив на зернові культури [57]. Зниження ризику накопичення у рослинах, Wagner (2016) встановив, що внесення фосфорних добрив на ґрунтах з підвищеним

вмістом кадмію знижує його накопичення у рослинних тканинах на 18-25%, що позитивно впливає на якість врожаю пшениці та зменшує ризик потрапляння кадмію у харчовий ланцюг.

Органічні добрива, зокрема компост і біочари, мають здатність утворювати хелатні комплекси з важкими металами, що зменшує їх токсичність і знижує ризик поглинання рослинами. Компост і біочари як стабілізатори металів: Smith et al. (2018) повідомляють, що компост знижує біодоступність свинцю на 30%, зв'язуючи його у стабільні комплекси з органічними кислотами, що містяться в компості [47]. Дослідження Gomez-Eyles et al. (2013) також показує, що внесення біочарів може знизити біодоступність кадмію на 15-20%, оскільки біочари містять функціональні групи, що активно зв'язують метали [55].

Покращення стійкості рослин до важких металів, за результатами Wang & Chen (2021), використання органічного гною на забруднених кадмієм ґрунтах зменшує біодоступність кадмію на 25%, що допомагає підтримувати нормальний ріст культур і знижує токсичний вплив металу на рослинні клітини [52].

Калійні добрива можуть знижувати поглинання важких металів через іонний антагонізм між калієм і кадмієм. Іонний антагонізм між калієм і кадмієм: Li et al. (2019) виявили, що внесення хлористого калію (KCl) на ґрунтах з високим вмістом кадмію знижує його біодоступність для рослин на 10-15% завдяки конкурентному поглинанню калію замість кадмію. Це підвищує загальну стійкість рослин і знижує ризик токсичного впливу кадмію на культури, такі як кукурудза [39].

Комплексні добрива, що містять мікроелементи (бор, цинк), можуть знижувати токсичність важких металів завдяки конкурентному поглинанню та поліпшенню обміну речовин. Конкуренція з важкими металами за поглинальні центри, за даними Kravchenko et al. (2021), внесення комплексних добрив з додаванням бору знижує поглинання кадмію рослинами на 15-18%, оскільки бор конкурує з кадмієм за активні

поглинальні центри на коренях [56]. Це покращує захист рослин від накопичення токсичних металів і підвищує якість врожаю. Поліпшення стійкості рослин через додаткове живлення, дослідження Foy et al. (1978) показує, що застосування комплексних добрив з цинком знижує токсичність свинцю, оскільки цинк покращує стійкість рослин до окислювального стресу і стабілізує ферментативні системи, необхідні для росту [17].

Застосування добрив може також збільшувати буферну здатність ґрунту, що зменшує рухливість важких металів та запобігає їхньому вимиванню у глибокі шари. Підвищення рН та зменшення розчинності металів, фосфорні та калійні добрива можуть підвищувати рН ґрунту, що знижує рухливість таких металів, як кадмій і свинець. Marschner (2012) відзначає, що підвищення рН на одиницю за рахунок добрив знижує біодоступність кадмію на 20-25%, що дозволяє контролювати токсичність металів на тривалий період [7].

Таким чином, різні типи добрив – фосфорні, органічні, калійні та комплексні – ефективно знижують біодоступність важких металів у ґрунті. Використання фосфорних добрив та органічних матеріалів, таких як компост, є особливо ефективним для стабілізації свинцю і кадмію, а комплексні добрива з мікроелементами сприяють захисту рослин від токсичних металів, підвищуючи їхню стійкість та якість врожаю

Мідь (Cu) є важливим мікроелементом для рослин, необхідним для багатьох ферментативних процесів і синтезу білків. Проте надмірне накопичення міді в ґрунті призводить до токсичних ефектів, які негативно впливають на ріст та розвиток культур. Дослідження показують, що підвищені концентрації міді можуть порушувати структуру клітин, знижувати біомасу кореневої системи і надземних частин, а також викликати окислювальний стрес у рослин. За даними Li et al. (2014), високі концентрації міді (понад 50 мг/кг) у ґрунті призводять до затримки росту кореневої системи у кукурудзи, що знижує її загальну продуктивність на 12%. Це пов'язано з тим, що мідь, накопичуючись у клітинах кореня, порушує їхню

структуру, знижуючи активність корневих ферментів [39]. Дослідження Wagner (2016) показує, що у пшениці при концентрації міді у ґрунті 20-40 мг/кг спостерігається зменшення кореневої біомаси на 15-20%. Це зниження пов'язане із пошкодженням клітинних мембран та зниженням водопоглинальної здатності корневих волосків, що зменшує стійкість рослини до посухи. У дослідженнях Sharma et al. (2016) встановлено, що при високих концентраціях міді (понад 30 мг/кг) у ґрунті відбувається порушення формування корневих волосків у соняшника, що ускладнює поглинання поживних речовин і знижує ефективність використання води [38]. Це негативно впливає на розвиток усієї рослини. Зниження фотосинтетичної активності, мідь, накопичуючись у листі, може заміщувати магній у молекулі хлорофілу, що призводить до порушення фотосинтезу. Mousavi et al. (2011) вказують, що надлишок міді у ґрунті (понад 40 мг/кг) знижує вміст хлорофілу в кукурудзі на 15-20%, що призводить до зниження фотосинтетичної продуктивності та уповільнення росту рослини [14]. Зменшення листкової біомаси, за даними Gupta et al. (2013), високий вміст міді знижує біомасу листкової частини пшениці на 10-15% через порушення процесу клітинного поділу та посилення окислювального стресу, що призводить до пошкодження мембранних структур клітин [28]. Накопичення міді у надземних частинах, мідь має тенденцію накопичуватись у надземних органах рослин, що особливо помітно у соняшника, здатного поглинати високі концентрації металів із ґрунту. Це робить соняшник перспективною культурою для фітореMediaції, але накопичення металів у тканинах призводить до зниження врожайності на 18-22% [47].

Індукція окислювального стресу, надмірний вміст міді викликає окислювальний стрес, який призводить до утворення реактивних форм кисню (ROS), що пошкоджують клітинні структури, такі як ліпіди, білки і ДНК. Gill & Tuteja (2010) зазначають, що підвищені концентрації міді підвищують активність антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза і каталаза, які захищають клітини від стресу, але надмірна активність ROS

може знижувати продуктивність рослини [23]. Активація антиоксидантних ферментів, Для боротьби з окислювальним стресом рослини активують антиоксидантну систему, яка нейтралізує надлишок ROS. Дослідження Clemens et al. (2006) показують, що при високому вмісті міді у ґрунті активність антиоксидантних ферментів збільшується на 30%, що допомагає рослинам адаптуватися, але потребує значних енергетичних витрат, що негативно впливає на ріст рослини [20]. Зниження загальної продуктивності накопичення міді у ґрунті негативно впливає на врожайність. За даними Jones et al. (2015), при високих рівнях міді (понад 25 мг/кг) у ґрунті врожайність ячменю знижується на 20%, що пов'язано із загальним порушенням фізіологічних процесів, зокрема фотосинтезу та водного обміну [58]. Зменшення якості врожаю, високий вміст міді у тканинах рослин знижує вміст білків та інших поживних речовин у зерні, що впливає на його якість. Foy et al. (1978) відзначають, що підвищення рівня міді знижує вміст білка у зернах пшениці на 10-12%, що має негативний вплив на харчову цінність [17].

Кадмій (Cd) є одним із найбільш токсичних важких металів, що легко поглинається кореневою системою і накопичується у тканинах рослин. Він чинить негативний вплив на різні фізіологічні процеси, зокрема на фотосинтетичну активність і вміст хлорофілу, що безпосередньо впливає на продуктивність рослин. Порушення обміну речовин, окислювальний стрес та пошкодження клітинних структур є основними механізмами токсичної дії кадмію.

Зниження фотосинтетичної ефективності, Кадмій пригнічує фотосинтетичну активність рослин, оскільки він заміщує основні мікроелементи, такі як магній, у молекулі хлорофілу. Gupta & Sandalio (2010) повідомляють, що при концентрації кадмію понад 5 мг/кг у ґрунті фотосинтетична активність у пшениці знижується на 20-25% [59]. Це пов'язано з порушенням фотосинтетичного електронного транспорту і зменшенням ефективності використання світла рослинами. Порушення



структури хлоропластів, кадмій накопичується у хлоропластах і викликає структурні зміни, що порушують функціонування фотосинтетичного апарату. Дослідження Sharma et al. (2016) вказують, що при високих концентраціях кадмію (10 мг/кг) у кукурудзі спостерігається руйнування мембран хлоропластів, що знижує загальну фотосинтетичну активність на 30% [38].

Зниження рівня хлорофілу, кадмій знижує вміст хлорофілу у листі рослин, що негативно впливає на фотосинтез. За даними Gill & Tuteja (2010), кадмій (5-10 мг/кг) у ґрунті знижує вміст хлорофілу в листі соняшника на 15-20%, що зменшує здатність рослини поглинати та використовувати світлову енергію [23]. Заміщення магнію у хлорофілі: Кадмій має здатність заміщувати магній у молекулі хлорофілу, що призводить до дестабілізації молекули та прискореного розкладання хлорофілу. Mousavi et al. (2011) зазначають, що підвищення рівня кадмію знижує концентрацію хлорофілу в кукурудзі на 10-15%, оскільки порушується стабільність хлорофілу і його синтез [14].

Зниження біомаси і врожайності, кадмій знижує загальну біомасу рослин, оскільки впливає на основні фізіологічні процеси, включаючи фотосинтез і дихання. Jones et al. (2015) встановили, що при високих концентраціях кадмію (понад 8 мг/кг) врожайність ячменю знижується на 20-25% через загальне порушення обміну речовин та зниження фотосинтетичної продуктивності [58]. Вплив на якість урожаю, кадмій накопичується у зерні та знижує вміст білка і поживних речовин. Дослідження Fou et al. (1978) показують, що за умови кадмієвого забруднення (5 мг/кг) вміст білка в зернах пшениці знижується на 10-15%, що негативно впливає на якість харчової продукції та знижує її харчову цінність [17].

Індукція окислювального стресу, кадмій спричиняє утворення реактивних форм кисню (ROS), які викликають окислювальний стрес у рослин. Це призводить до пошкодження клітинних мембран, білків та ДНК. Clemens et al. (2006) зазначають, що при високих концентраціях кадмію активність антиоксидантних ферментів зростає на 35%, однак надмірне

утворення ROS призводить до пошкодження клітинних структур і зниження життєздатності рослин [20]. Активація антиоксидантної системи, рослини реагують на кадмієвий стрес, активуючи антиоксидантні ферменти, такі як супероксиддисмутаза і каталаза, для зменшення токсичного впливу ROS. Однак, за даними Wagner (2016), активність цих ферментів часто недостатня для нейтралізації стресу, що призводить до поступового зниження продуктивності рослин.

Свинець (Pb) є одним із найбільш токсичних важких металів для рослин, який негативно впливає на основні фізіологічні процеси, такі як обмін речовин, водний баланс та здатність рослин протистояти стресовим умовам. Через високу біоаккумуляцію у тканинах рослин свинець чинить токсичний вплив на клітинному та організменному рівні, знижуючи їхню продуктивність та життєздатність. Інгібування ферментів обміну речовин, Свинець блокує активність багатьох ферментів, що беруть участь у метаболічних процесах, зокрема у диханні та синтезі білків. Gupta & Sandalio (2010) зазначають, що високий рівень свинцю (понад 5 мг/кг) знижує активність ферментів, таких як нітратредуктаза, на 30%, що призводить до порушення метаболізму азоту та зниження продуктивності рослин [59]. Зниження синтезу білків і амінокислот, Свинець заміщує необхідні мікроелементи, такі як кальцій та магній, що порушує синтез білків. За даними Sharma et al. (2016), при концентрації свинцю в ґрунті понад 10 мг/кг вміст білка у зернових культурах знижується на 15-20%, що впливає на їхню якість та харчову цінність [38]. Зменшення водопоглинальної здатності коренів, свинець накопичується у кореневій системі рослин, що порушує транспорт води та поживних речовин. Дослідження Li et al. (2014) показує, що при концентраціях свинцю понад 8 мг/кг у ґрунті поглинання води коренями кукурудзи зменшується на 20%, що робить рослини менш стійкими до посухи [39]. Підвищення осмотичного стресу, свинець знижує вміст калію і кальцію в клітинах, що порушує осмотичний баланс. Marschner (2012) відзначає, що підвищені концентрації свинцю викликають втрату води через

порушення клітинних мембран, що збільшує осмотичний стрес і знижує тургор клітин, особливо у посушливих умовах [7].

Індукція окислювального стресу, свинець сприяє утворенню реактивних форм кисню (ROS), що пошкоджують клітинні мембрани, білки і ДНК. За даними Gill & Tuteja (2010), підвищені концентрації свинцю у ґрунті індують окислювальний стрес, що знижує стійкість рослин до абіотичних факторів і викликає деградацію клітинних мембран [23]. Активація антиоксидантної системи, у відповідь на стрес, спричинений свинцем, рослини активують антиоксидантні ферменти, такі як супероксиддисмутаза і каталаза. Дослідження Clemens et al. (2006) показують, що активність цих ферментів підвищується на 25-30% у присутності свинцю, але це потребує додаткових енергетичних витрат, що пригнічує ріст і знижує продуктивність рослин [20].

Зниження врожайності, накопичення свинцю у ґрунті та тканинах рослин впливає на продуктивність культур. Jones et al. (2015) повідомляють, що при концентрації свинцю понад 10 мг/кг у ґрунті врожайність пшениці знижується на 20-25% через зменшення фотосинтетичної активності та порушення обміну речовин [28]. Погіршення якості врожаю, високий рівень свинцю у ґрунті призводить до накопичення металу в зернах, що знижує їхню якість та безпечність для споживання. Foy et al. (1978) зазначають, що свинець у концентраціях понад 5 мг/кг може призвести до зниження вмісту поживних речовин у зернах на 10-15% [17].

Бор (В) є важливим мікроелементом для рослин, який бере участь у структурі клітинних стінок, процесах запліднення та розвитку кореневої системи. У природі бор є відносно рідкісним, і його поглинання рослинами залежить від рН ґрунту та наявності органічної речовини. Крім того, бор відіграє значну роль у підвищенні стійкості рослин до важких металів, зокрема кадмію та свинцю, допомагаючи зменшувати токсичний вплив цих елементів. Фізико-хімічні властивості бору, бор у ґрунті зазвичай присутній у вигляді борної кислоти ( $H_2BO_3$ ), яка легко розчиняється у воді і стає

доступною для поглинання кореневою системою рослин. За даними Marschner (2012), оптимальний рН для поглинання бору – 5,0-7,5; при нижчих або вищих значеннях рН біодоступність бору знижується [7]. Взаємодія з іншими елементами, поглинання бору залежить від взаємодії з іншими елементами. Наприклад, високий рівень кальцію може знижувати біодоступність бору, оскільки кальцій стабілізує клітинні стінки і зменшує проникність для бору. Gupta et al. (2013) відзначають, що на піщаних ґрунтах, які зазвичай мають низький вміст органічних речовин, поглинання бору ускладнюється через нестабільність його розчинних форм [28]. Захист клітинних структур, бор відіграє важливу роль у зміцненні клітинних стінок через утворення складних ефірів з пектинами, що стабілізує клітинні мембрани і знижує проникність для іонів важких металів. Brown et al. (2002) зазначають, що підвищення концентрації бору у рослинах покращує структурну цілісність клітин і знижує проникнення таких металів, як кадмій і свинець, що зменшує їхню токсичність [8]. Конкуренція з важкими металами, бор конкурує з кадмієм і свинцем за поглинальні центри на кореневій системі, що обмежує накопичення цих металів у тканинах рослин. Дослідження Kravchenko et al. (2021) показують, що при внесенні бору у ґрунт концентрація кадмію у кореневій системі соняшника зменшується на 15-18%, оскільки бор знижує біодоступність кадмію [56].

Бор підвищує стійкість рослин до окислювального стресу, викликаного важкими металами. При високих концентраціях кадмію і свинцю бор стимулює вироблення антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза (SOD) та каталаза (CAT), які нейтралізують реактивні форми кисню (ROS). Gill & Tuteja (2010) відзначають, що при додаванні бору активність антиоксидантних ферментів збільшується на 20-25%, що зменшує пошкодження клітин і покращує стійкість рослин до токсичних металів [23]. Бор знижує поглинання свинцю рослинами, оскільки обмежує його мобільність у ґрунті. Дослідження Foy et al. (1978) показують, що внесення бору в ґрунт знижує поглинання свинцю пшеницею на 10-15%, що зменшує

його накопичення у листі та коренях рослин і знижує загальну токсичність [17]. За умов забруднення важкими металами бор сприяє стабільному розвитку рослин за рахунок зміцнення клітинних структур і захисту від окислювального стресу. Wagner (2016) вказує, що додавання бору у ґрунти, забруднені кадмієм, дозволяє підвищити врожайність кукурудзи на 12-15% через покращення росту кореневої системи та надземних частин. Завдяки захисту від важких металів, бор сприяє підвищенню якості врожаю, зокрема, збільшує вміст білка та знижує накопичення токсичних металів у зерні. Jones et al. (2015) зазначають, що застосування бору на ґрунтах, забруднених свинцем, дозволяє знизити його накопичення у зернах пшениці на 10%, що підвищує їхню якість і безпечність для споживання [58].

## 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Характеристика природно-кліматичних умов Дніпропетровської області

Дніпропетровська область розташована в центральній частині України і є однією з найбільших областей країни за площею. Займаючи територію площею близько 31,9 тис. км<sup>2</sup>, область простягається приблизно з північного заходу на південний схід. Вона межує з шістьма іншими областями: Запорізькою, Донецькою, Полтавською, Харківською, Кіровоградською та Миколаївською. Географічне положення області значно впливає на її природні ресурси, кліматичні умови та сільськогосподарський потенціал.

Розташування на межі степової та лісостепової зон створює особливі умови для розвитку рослинного і тваринного світу, що значно варіює в залежності від природних чинників та антропогенного впливу. Регіон знаходиться в межах двох великих фізико-географічних зон: Придніпровської височини, яка охоплює більшу частину області, та Придніпровської низовини, що займає її південну і центральну частини [60].

Основною водною артерією регіону є річка Дніпро, яка протікає територією області з північного заходу на південний схід. Її численні притоки, такі як Оріль, Самара, Вовча та інші, відіграють важливу роль у формуванні гідрологічного режиму, зволоженні ґрунтів та підтриманні екологічної рівноваги регіону. Річкова система регіону також є важливим джерелом водопостачання для сільського господарства, промисловості та населення.

Рельєф Дніпропетровської області переважно рівнинний з помірними височинами. Північна частина регіону більш горбиста, що пов'язано з впливом Придніпровської височини, тоді як південна частина, розташована на Придніпровській низовині, має здебільшого рівнинний характер. Рельєф суттєво впливає на розподіл ґрунтових типів і умови їхнього формування [61].

Клімат Дніпропетровської області є помірно континентальним, із чітко вираженими сезонними змінами. Він характеризується жарким літом та м'якою зимою, що є типовим для степової зони України. Середньорічна температура повітря становить близько  $+8^{\circ}\text{C}$  -  $+9^{\circ}\text{C}$ , при цьому середня температура липня досягає  $+22^{\circ}\text{C}$  -  $+24^{\circ}\text{C}$ , а середня температура січня коливається в межах  $-3^{\circ}\text{C}$  -  $-5^{\circ}\text{C}$ . Найнижчі температури можуть сягати  $-20^{\circ}\text{C}$ , а влітку максимуми можуть підвищуватися до  $+35^{\circ}\text{C}$  і вище.

Тривалий безморозний період, який триває близько 180-200 днів, дозволяє вирощувати широкий спектр сільськогосподарських культур, включаючи пшеницю, кукурудзу, соняшник, ячмінь та інші зернові й технічні культури. Однак кліматичні умови регіону також характеризуються періодами посухи, особливо в літні місяці, що є однією з основних проблем для місцевих аграріїв. Недостатня кількість опадів, що в середньому становить 400–500 мм на рік, причому більша їх частина випадає у весняно-літній період, істотно впливає на ріст рослин та рівень урожайності сільськогосподарських культур. Для мінімізації ризику посух застосовується зрошення, особливо в південних районах області, де посухи трапляються найчастіше [62].

Зима в Дніпропетровській області здебільшого малосніжна, що створює певні труднощі з накопиченням вологи у ґрунті. Це особливо важливо для підготовки ґрунтів під весняну сівбу, оскільки брак снігового покриву може призвести до дефіциту вологи на початку вегетаційного періоду. Відлиги, які трапляються в зимові місяці, можуть спричинити часткове танення снігу, що, у свою чергу, призводить до утворення льодової

кірки на поверхні ґрунту. Це явище негативно впливає на озимі культури, оскільки може пошкоджувати їхню кореневу систему та спричиняти загибель рослин.

Кліматичні умови впливають на формування ґрунтового покриву області, сприяючи розвитку різних типів ґрунтів в залежності від рельєфу, гідрологічного режиму та типу рослинності. Зміна температури та опадів, а також режим вітрового переносу матеріалу впливають на утворення гумусового горизонту, збереження структури ґрунту та його родючість.

Дніпропетровська область характеризується значним різноманіттям ґрунтового покриву, що обумовлено її географічним положенням та природними умовами. Основними типами ґрунтів є чорноземи звичайні, південні чорноземи, лучно-чорноземні та солонцюваті ґрунти. Кожен із цих типів має свої унікальні властивості, які впливають на їх родючість та придатність для сільськогосподарського використання .

Чорноземи звичайні займають більшу частину території області і є одними з найродючіших ґрунтів не лише України, але й світу. Вони утворилися в умовах помірного зволоження і переважно трав'янистої рослинності, яка протягом тривалого часу сприяла накопиченню органічних речовин. Гумусовий горизонт чорноземів звичайних може сягати 60-100 см, а вміст гумусу становить 4-6%. Вони характеризуються високою вологозатримувальною здатністю, хорошою структурою та високим вмістом поживних речовин, що робить їх ідеальними для вирощування зернових культур та технічних культур. Однак важливим фактором для підтримання їхньої родючості є раціональне використання, внесення органічних і мінеральних добрив, а також заходи щодо запобігання ерозії.

Південні чорноземи відрізняються від звичайних меншим вмістом гумусу (3-4%) і більш тонким гумусовим горизонтом (50-60 см). Вони утворилися в умовах меншої кількості опадів і частіше піддаються ерозійним процесам, особливо в місцях з ухилом рельєфу. Для цих ґрунтів характерна необхідність у додатковому зволоженні, оскільки влітку вони швидко



пересихають, що може негативно вплинути на врожайність. Для підвищення родючості південних чорноземів необхідно застосовувати зрошення, особливо в посушливі роки, а також вносити органічні та мінеральні добрива для відновлення балансу поживних речовин.

Лучно-чорноземні ґрунти зустрічаються переважно в заплавах річок та характеризуються підвищеною вологістю. Вони мають середній вміст гумусу (3-5%) і відрізняються хорошими водно-фізичними властивостями, що робить їх придатними для вирощування кормових культур та багаторічних трав. Ці ґрунти менш схильні до ерозії завдяки рівнинному характеру рельєфу, однак потребують постійного контролю за рівнем зволоження для уникнення заболочування.

Солонцюваті ґрунти формуються в умовах значного випаровування та високої концентрації натрієвих солей, що негативно впливає на їх агровиробничу цінність. Вони часто мають низький вміст гумусу (до 2-3%) і слабку структуру, що знижує їхню родючість. Солонцюваті ґрунти потребують проведення меліоративних заходів, таких як гіпсування, яке допомагає зменшити вплив натрію та покращити фізико-хімічні властивості ґрунту. Вирощування сільськогосподарських культур на цих ґрунтах вимагає особливих агротехнічних заходів, спрямованих на покращення їхньої родючості та зменшення негативного впливу солонцюватості [63].

## 2.2 Джерела техногенного забруднення важкими металами

Техногенне забруднення важкими металами у Дніпропетровській області є однією з найгостріших екологічних проблем, пов'язаних із високою концентрацією промислових підприємств, які здійснюють значний вплив на навколишнє середовище. Основними джерелами забруднення є гірничодобувна промисловість, металургійна галузь, енергетичний сектор і

транспорт. Сюди також можна віднести антропогенні фактори, які сприяють накопиченню важких металів у ґрунтах та водних ресурсах [64].

Гірничодобувна промисловість є основним джерелом забруднення важкими металами на території Дніпропетровської області. Регіон відомий своїми багатими запасами залізної руди, вугілля та інших корисних копалин, що зумовило виникнення великих гірничодобувних центрів, таких як Кривий Ріг, Павлоград і інші. Саме гірничодобувні підприємства здійснюють суттєвий вплив на забруднення повітря, ґрунту та води [64].

Кривий Ріг – це центр гірничодобувної промисловості України, де здійснюється видобуток і збагачення залізної руди. У процесі видобутку руди утворюються відвали та шахтні води, які містять високі концентрації важких металів, таких як кадмій, свинець, мідь, хром і нікель. Ці речовини потрапляють до ґрунтів та поверхневих вод, що призводить до їх забруднення і негативно впливає на рослинний і тваринний світ регіону. Крім того, пил від відвалів також може переноситися вітром на значні відстані, поширюючи забруднення на сусідні території.

Підприємства збагачення залізної руди у Кривому Розі викидають у повітря значні обсяги пилу, який містить важкі метали. Під час процесу збагачення відбувається розпилення тонко подрібнених мінералів, що створює екологічні проблеми, зокрема забруднення повітря та ґрунту. Шламові відходи, що залишаються після збагачення, містять важкі метали і можуть потрапляти в ґрунт та водойми, створюючи довготривалий негативний вплив на навколишнє середовище [65].

Павлоград – це центр вугільної промисловості Дніпропетровської області. Вугільні шахти створюють значний обсяг відходів, таких як відвали пустої породи та шахтні води, які часто містять важкі метали (ртуть, свинець, цинк) та інші токсичні речовини. Забруднення ґрунтів і поверхневих вод відбувається через витіки шахтних вод, які можуть мати підвищену кислотність і містити розчинені важкі метали, що призводить до деградації ґрунтів і зменшення їхньої родючості.

Крім того, під час видобутку вугілля викидається пил, який також містить домішки важких металів. Цей пил поширюється на значні території, що сприяє забрудненню ґрунтів і рослинності. Скупчення вугільних відходів у відвалах призводить до тривалого зберігання важких металів у природному середовищі, що також створює екологічну загрозу [64].

Дніпро, як один із найбільших промислових центрів України, має численні підприємства, що займаються гірничо-збагачувальною та металургійною діяльністю. Серед основних джерел техногенного забруднення важкими металами є підприємства металургійного комплексу, які працюють на базі видобутої руди. В процесі переробки корисних копалин викидаються у навколишнє середовище значні обсяги важких металів, таких як свинець, ртуть, мідь, нікель.

Металургійна промисловість є однією з найбільших галузей економіки Дніпропетровської області, але водночас вона є і одним із головних забруднювачів навколишнього середовища. Основними металургійними підприємствами області є заводи в містах Дніпро, Кривий Ріг та Нікополь. Їх виробнича діяльність супроводжується викидами важких металів у атмосферу, ґрунти та водні ресурси.

У місті Дніпро працюють великі металургійні заводи, які виплавляють сталь і інші метали. В процесі виплавки використовуються різні види руди та хімічних реагентів, що сприяє утворенню значних обсягів шлаку та інших відходів, які містять важкі метали, зокрема свинець, кадмій, мідь, цинк. Металургійні заводи викидають в атмосферу пил, який містить важкі метали, що осідають на поверхню ґрунту та водойми, створюючи ризик для здоров'я людей і довкілля.

У Кривому Розі також працюють численні металургійні підприємства, які спеціалізуються на виплавці чавуну і сталі. Виробничі процеси супроводжуються утворенням великої кількості шкідливих викидів, включаючи оксиди важких металів. Забруднення повітря, спричинене викидами металургійних підприємств, має серйозний вплив на якість ґрунтів

і водних ресурсів, а також на здоров'я населення регіону. Тяжкі метали, осідаючи на ґрунт, накопичуються у рослинності, зокрема в сільськогосподарських культурах, що створює загрозу для харчового ланцюга [66,67].

Енергетичні підприємства області, такі як теплоелектростанції, також є значними джерелами забруднення важкими металами. Спалювання вугілля та інших видів палива призводить до викидів у атмосферу різноманітних забруднювальних речовин, зокрема важких металів, таких як ртуть, свинець і кадмій. Теплоелектростанції, які працюють на вугіллі, створюють відходи у вигляді золошлаків, які містять високу концентрацію важких металів. Ці відходи часто зберігаються у відкритих відвалах, що сприяє їхньому потраплянню в навколишнє середовище.

Транспорт також є важливим джерелом забруднення важкими металами. Вихлопні гази автомобілів містять свинець (у випадках, коли використовуються паливні добавки), а також інші важкі метали, які виділяються в процесі зношування двигунів і шин. Забруднення, спричинене транспортними засобами, особливо інтенсивне в містах, де висока щільність автомобільного руху. Це створює додатковий негативний вплив на якість повітря, ґрунтів і водних ресурсів у населених пунктах.

До антропогенних факторів, що сприяють накопиченню важких металів у ґрунтах і водних ресурсах Дніпропетровської області, належать:

1. Нераціональне землекористування – це використання земельних ресурсів без врахування їх екологічної стійкості та особливостей ґрунтового покриву. Зокрема, відсутність протиерозійних заходів на землях, що межують з промисловими територіями, сприяє поширенню важких металів на сільськогосподарські угіддя.

2. Сільське господарство – застосування мінеральних добрив і пестицидів, які можуть містити важкі метали (наприклад, кадмій, мідь), також призводить до їх накопичення в ґрунтах. Інтенсивне використання добрив без проведення відповідних агрохімічних аналізів

може призвести до накопичення токсичних елементів у ґрунтах, а також до їх потрапляння у підземні води.

3. Накопичення промислових відходів – на території області є численні промислові відвали та склади відходів, які містять важкі метали. Ці відходи можуть роками зберігатися на відкритих територіях, піддаючись впливу атмосферних опадів, що сприяє вимиванню токсичних речовин і їх проникненню у ґрунт і водні джерела.

4. Комунальні відходи – сміттєзвалища, особливо несанкціоновані, також можуть бути джерелами забруднення важкими металами, оскільки відходи, що містять метали, потрапляють у довкілля. Наприклад, викидання старих батарейок, електроніки та інших предметів, що містять важкі метали, сприяє їх накопиченню у ґрунті та воді [68].

Таким чином, техногенне забруднення важкими металами у Дніпропетровській області має комплексний характер і зумовлене діяльністю багатьох галузей промисловості, енергетики, транспорту та нераціональним веденням господарської діяльності. Це створює значні екологічні ризики, що вимагають впровадження заходів з екологічного моніторингу, рекультивациі земель і зниження антропогенного навантаження на навколишнє середовище.

### 2.3 Вміст важких металів у ґрунтах регіону

Техногенне забруднення важкими металами є однією з основних екологічних проблем Дніпропетровської області, яка зумовлена високою концентрацією промислових підприємств. Забруднення ґрунтів важкими металами (свинець – Pb, кадмій – Cd, цинк – Zn, мідь – Cu, нікель – Ni, хром – Cr) спостерігається у різних районах регіону і має свої особливості в кожному з них.

Результати досліджень показують, що найбільш забрудненими важкими металами ґрунтами є райони, де зосереджені промислові об'єкти, зокрема металургійна і гірничодобувна промисловість. Для підтвердження даних було проведено аналіз ґрунтів у різних районах та визначено вміст Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr.

Таблиця 2.1. Концентрація важких металів у ґрунтах окремих районів Дніпропетровської області.

Район	Pb, мг/кг	Cd, мг/кг	Zn, мг/кг	Cu, мг/кг	Ni, мг/кг	Cr, мг/кг
Криворізький	89	1.2	180	40	30	45
Дніпровський	70	1.0	150	35	25	40
Павлоградський	60	1.1	130	30	20	35
Нікопольський	55	0.9	120	28	18	30
Синельниківський	50	0.8	110	25	15	28

Гранично допустимі концентрації (ГДК) важких металів у ґрунтах встановлені для забезпечення екологічної безпеки та мінімізації ризиків для здоров'я населення. У таблиці 2.1 наведено ГДК для кожного з досліджуваних металів та перевищення цих норм у різних районах області.

Таблиця 2.2. Перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів у ґрунтах районів Дніпропетровської області

Метал	ГДК, мг/кг	Перевищення ГДК у різних районах (рази)
Свинець (Pb)	32	Криворізький (2.8), Дніпровський (2.2), Павлоградський (1.9)
Кадмій (Cd)	0.7	Криворізький (1.7), Дніпровський (1.4), Павлоградський (1.6)
Цинк (Zn)	100	Криворізький (1.8), Дніпровський (1.5)
Мідь (Cu)	23	Криворізький (1.7), Дніпровський (1.5)
Нікель (Ni)	20	Криворізький (1.5), Дніпровський (1.3)
Хром (Cr)	30	Криворізький (1.5), Дніпровський (1.3)

Як видно з таблиці 2.2, найвищі концентрації важких металів зафіксовано у Криворізькому районі, що пов'язано з високою концентрацією промислових підприємств, особливо гірничо-збагачувальних комбінатів. Свинець, кадмій, цинк та мідь мають значне перевищення ГДК, що свідчить про необхідність вжиття заходів для зменшення техногенного навантаження на довкілля.

Просторовий розподіл забруднення ґрунтів Дніпропетровської області залежить від розташування промислових об'єктів, транспортної інфраструктури та особливостей рельєфу. Найвищий рівень забруднення спостерігається у промислово розвинутих районах, таких як Криворізький та Дніпровський, тоді як менш забруднені ґрунти характерні для Синельниківського та Нікопольського районів.

Забруднення важкими металами має локальний характер, але через природні процеси (вітрова ерозія, стік вод) воно може поширюватися на значні території. Це створює ризики для сільського господарства, оскільки важкі метали можуть накопичуватися в сільськогосподарських культурах, що вирощуються на забруднених ґрунтах, і, відповідно, потрапляти в харчовий ланцюг [69].

Для кращого розуміння рівня забруднення та впливу промисловості було проведено порівняння концентрацій важких металів у різних районах області. У таблиці 3 наведено відносні концентрації металів у ґрунтах районів відносно ГДК.

Таблиця 2.3. Рівень забруднення ґрунтів важкими металами відносно гранично допустимих концентрацій у районах Дніпропетровської області

Район	Pb (відносно ГДК)	Cd (відносно ГДК)	Zn (відносно ГДК)	Cu (відносно ГДК)	Ni (відносно ГДК)	Cr (відносно ГДК)
Криворізький	2.8	1.7	1.8	1.7	1.5	1.5
Дніпровський	2.2	1.4	1.5	1.5	1.3	1.3
Павлоградський	1.9	1.6	1.3	1.3	1.0	1.2
Нікопольський	1.7	1.3	1.2	1.2	0.9	1.0
Синельниківський	1.6	1.1	1.1	1.1	0.8	0.9

Порівняння показує, що Криворізький район має найвищі концентрації всіх досліджуваних важких металів, тоді як у Синельниківському районі показники найнижчі. Це свідчить про безпосередній зв'язок між рівнем техногенного навантаження та вмістом важких металів у ґрунті.

Забруднення ґрунтів важкими металами у Дніпропетровській області є серйозною екологічною проблемою, що потребує негайного вирішення. Найвищі рівні забруднення спостерігаються у промислово розвинутих районах, таких як Криворізький та Дніпровський, де концентрації свинцю, кадмію, цинку та міді перевищують гранично допустимі концентрації в декілька разів.

Для зменшення техногенного навантаження необхідно вжити заходів щодо модернізації промислових підприємств, покращення систем очищення викидів, а також проведення екологічного моніторингу і рекультивації забруднених територій. Крім того, важливим є підвищення екологічної свідомості населення та впровадження стійких практик землекористування, що дозволить зменшити ризики для довкілля і здоров'я людини.

#### 2.4 Заходи зниження техногенного впливу

Рекультивація ґрунтів є важливим заходом з відновлення забруднених земель і зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище. Ефективні методи рекультивації включають механічні, хімічні та біологічні підходи. Серед них:

1. Механічна рекультивація – передбачає вирівнювання території, видалення забрудненого шару ґрунту та заміну його чистим субстратом. Це дозволяє зменшити концентрацію важких металів у верхньому горизонті ґрунту.



2. Хімічна рекультивація – використовується для нейтралізації токсичних речовин шляхом додавання хімічних реагентів, таких як вапно, яке знижує кислотність ґрунту і сприяє осадженню важких металів, зменшуючи їх рухомість.

3. Біологічна рекультивація – включає використання рослин-фіторемедіаторів, які здатні накопичувати важкі метали у своїх тканинах, що дозволяє поступово очищати ґрунт від забруднювачів. До таких рослин належать соняшник, гірчиця та інші види, які мають високу здатність до поглинання металів [70].

Біологічні та хімічні сорбенти є ефективними засобами для зниження концентрації важких металів у ґрунтах. До біологічних сорбентів відносяться органічні матеріали, такі як торф, компост, біовугілля, які здатні зв'язувати важкі метали і знижувати їх рухомість у ґрунті. Хімічні сорбенти, такі як цеоліти, глинисті мінерали, також використовуються для фіксації важких металів і зменшення їх доступності для рослин.

Використання біологічних та хімічних сорбентів є перспективним методом для зменшення забруднення ґрунтів, оскільки вони забезпечують довготривалу стабілізацію важких металів і можуть бути інтегровані у загальну стратегію рекультивації земель.

Впровадження сталих агротехнологій є важливим напрямком для зменшення техногенного навантаження на ґрунти та підвищення їх родючості. Основними перспективами впровадження сталих агротехнологій у Дніпропетровській області є:

1. Мінімізація обробітку ґрунту – зменшення інтенсивності обробітку ґрунту дозволяє знизити ризики ерозії та деградації ґрунтів, що сприяє збереженню його структури і родючості.

2. Сівозміна та сидерація – використання сівозмін із включенням сидератів (рослин, які покращують структуру ґрунту і підвищують його родючість) дозволяє зменшити накопичення важких металів та покращити загальний стан ґрунтів.

3. Органічне землеробство – використання органічних добрив замість мінеральних дозволяє зменшити надходження важких металів у ґрунт та підвищити його екологічну безпеку.

4. Фіторемедіація – вирощування рослин, здатних акумулювати важкі метали, є ефективним способом очищення ґрунтів і може бути використане як частина стратегії сталого агровиробництва.

5. Використання мульчування – мульчування ґрунту органічними матеріалами дозволяє зменшити випаровування вологи, захищає ґрунт від ерозії та покращує його мікробіологічну активність, що сприяє природному очищенню від забруднень.

6. Застосування прецизійного землеробства – використання сучасних технологій для контролю за станом ґрунту, включаючи сенсори та дрони, дозволяє оптимізувати внесення добрив та зменшити накопичення важких металів, покращуючи ефективність агровиробництва [71].

Впровадження сталих агротехнологій у Дніпропетровській області дозволить не лише зменшити техногенне навантаження на ґрунти, але й забезпечити тривалу стабільність агроecosystem, підвищити їх продуктивність і зберегти здоров'я населення. Це є особливо важливим для регіону з високим рівнем індустріалізації, де забруднення ґрунтів важкими металами становить серйозну загрозу для навколишнього середовища та здоров'я людей.

2.5 Загальна характеристика рослин, що досліджуються: соя, кукурудза, горох, пшениця, ріпак, соняшник

Для оцінки впливу важких металів на агробіогенні системи важливо враховувати особливості основних посівних культур, які широко

вирощуються в різних регіонах і потребують специфічних умов для росту та розвитку. Культури, що досліджуються, мають свої біологічні та агротехнічні особливості, які визначають їхню стійкість до техногенного навантаження та здатність накопичувати важкі метали.

*Glycine max* є однією з основних бобових культур, що використовується для отримання білка та олії. Соя має добре розвинену кореневу систему, здатну вступати у симбіоз із азотфіксуючими бактеріями. Це дозволяє культурі накопичувати азот у ґрунті, що сприяє підвищенню його родючості. *Glycine max* має високу вимогливість до вологи, особливо в період цвітіння та формування бобів. Оптимальна температура для її росту – від 20 до 30°C. *Glycine max* також добре реагує на внесення фосфорних та калійних добрив. *Glycine max* може накопичувати кадмій та мідь у кореневій системі та листі. Надлишок металів знижує вміст білка в зерні, пригнічує ростові процеси, а також може викликати окислювальний стрес, що призводить до пошкодження клітинних мембран і зниження продуктивності рослини [72].

Соя сорту "Діона" є ультрараннім різновидом, рекомендованим для вирощування в Лісостепу та Поліссі України. Вегетаційний період становить 81–85 днів, що дозволяє використовувати цей сорт як у основних, так і в післяюкісних та пожнивних посівах. Рослини характеризуються високою стійкістю до вилягання та осипання, а також до основних хвороб. Сорт демонструє підвищену адаптаційну здатність до несприятливих умов вирощування, зокрема до посухи. Вміст білка в зерні становить 37–42%, олії — 19–23%. Урожайність коливається від 25 до 35 ц/га, з максимальною зафіксованою — 38 ц/га. Маса 1000 насінин — 150–175 г. Висота кріплення нижнього стручка — 12–14 см, що сприяє зручності збирання врожаю. Сорт "Діона" внесений до Реєстру сортів України і рекомендований для вирощування в усіх кліматичних зонах країни.

Сорт сої 'Муза' внесений до Державного реєстру сортів рослин України у 2015 році. Оригінатором є Національний науковий центр "Інститут

землеробства Національної академії аграрних наук України". Сорт призначений для використання в кормовиробництві та харчовій промисловості. 'Муза' належить до скоростиглих сортів із вегетаційним періодом 100–102 дні. Рослини досягають висоти 85–90 см, з висотою прикріплення нижніх бобів 13–14 см. Тип росту — проміжний, суцвіття — багатоквіткова китиця з 14–15 фіолетовими квітками, опушення рослини руде. Насіння овальне, жовте, з коричневим овальним рубчиком; маса 1000 насінин становить 235–245 г. Вміст білка в насінні — 41–42%, олії — 21%. Потенційна врожайність сорту сягає 5 т/га. Підходить для вирощування у регіонах Полісся, Лісостепу та Степу України.

*Zéa máys* є універсальною культурою, що використовується як харчова, кормова та технічна сировина. *Zéa máys* а має потужну кореневу систему, яка активно поглинає воду та поживні речовини, що робить її стійкою до посушливих умов. Вона добре реагує на високий вміст азоту в ґрунті, що сприяє збільшенню врожайності. Оптимальна температура для її вирощування – від 18 до 30°C. Продуктивність культури залежить від родючості ґрунту та достатнього вмісту макроелементів, таких як азот, фосфор і калій. *Zéa máys* може накопичувати кадмій і мідь, особливо у коренях і листі. Надлишок металів викликає окислювальний стрес, що негативно впливає на фотосинтетичну активність, знижує інтенсивність дихання і може призвести до порушення метаболізму рослини [73].

ДМС Тріумф — середньостиглий гібрид кукурудзи української селекції з вегетаційним періодом 110–115 днів, що характеризується високою врожайністю та стабільністю. Гібрид має зубоподібний тип зерна, висоту рослин 260–280 см і висоту кріплення качана 90–100 см качани мають конусоподібну форму з великою кількістю рядів зерен, при цьому маса 1000 зерен варіюється в межах 320–350 г.

Середня врожайність гібриду сягає 10–12 т/га, з потенціалом до 14–15 т/га за оптимальних умов. ДМС Тріумф демонструє високу посухостійкість, стійкість до хвороб, таких як фузаріоз і пухирчаста сажка, а також міцне

стебло, що знижує ризик вилягання. Рекомендований для вирощування в зонах Степу та Лісостепу України, густина стояння варіюється: 70–75 тис. рослин/га для Лісостепу та 55–60 тис. рослин/га для Степу. Гібрид має високу енергію стартового росту, підходить для різних типів ґрунтів, включаючи менш родючі, і є придатним для механізованого збирання завдяки рівномірному дозріванню та низькій вологовіддачі. ДМС Триумф — ідеальний вибір для фермерів, які прагнуть стабільних і високих урожаїв навіть у складних умовах.

ДМ Експенсів — середньостиглий простий міжлінійний гібрид кукурудзи, створений українською селекційною компанією «Маїс». Гібрид призначений для вирощування на зерно і характеризується високою врожайністю, адаптивністю до різних агрокліматичних умов та стійкістю до стресових факторів. ФАО становить 320, а вегетаційний період триває 117–122 дні, залежно від зони вирощування. Висота рослини сягає 260 см, а висота кріплення качана — близько 110 см. Зерно зубоподібного типу, жовто-помаранчевого кольору, із середньою швидкістю висихання після дозрівання.

Гібрид демонструє високий потенціал врожайності: у Степу до 12,1 т/га, у Лісостепу до 14,8 т/га. Стійкість до посухи, спеки, хвороб, таких як пухирчаста та летюча сажка, кукурудзяний метелик і вилягання оцінюється в 8–9 балів. Особливістю є синхронність цвітіння волоті та качана навіть за умов гідротермічного стресу.

Оптимальна густина рослин перед збором урожаю становить: для Степу — 40–50 тис./га, для Лісостепу — 50–60 тис./га, а для Полісся — 65–75 тис./га. Гібрид підходить для вирощування в Лісостепу та Степу України, забезпечуючи стабільну врожайність та високу якість зерна.

ДМС Оріон — середньостиглий простий гібрид кукурудзи з ФАО 300, розроблений компанією «Маїс Дніпро». Гібрид підходить для вирощування в усіх агрокліматичних зонах України, включаючи Південний Степ, Лісостеп і Полісся, демонструючи потенціал урожайності до 15 т/га. Висота рослини

складає 245 см, а висота кріплення качана — 110 см. Качан має 14–16 рядів зубоподібного жовтого зерна. Мінімальна температура ґрунту для посіву — 8–10°C.

Гібрид характеризується високою стійкістю до стресових факторів, зокрема посухостійкість оцінюється на 8 з 9 балів, стійкість до спеки — 9 з 9 балів. Він також має стійкість до основних захворювань, таких як пухирчаста та летюча сажка, і шкідників, включаючи кукурудзяного метелика. Рівень стійкості до вилягання становить 9 з 9 балів. Рекомендована густина рослин перед збиранням: для Південного Степу — 35–40 тис./га, Північного Степу — 45–50 тис./га, Лісостепу — 60–70 тис./га, Полісся — 70–80 тис./га.

Гібрид характеризується помірною холодостійкістю, високою стійкістю до посухи та стресових факторів, а також демонструє ефект «Stay Green», що сприяє збереженню активного фотосинтезу на пізніх стадіях розвитку. ДМС Орion є надійним вибором для агровиробників, які прагнуть отримати стабільно високі врожаї в різних регіонах України.

ДМ Петрос — це середньоранній простий модифікований гібрид кукурудзи з ФАО 260, розроблений компанією «Маїс». Гібрид демонструє високий потенціал урожайності до 14,8 т/га та добре адаптується до різних ґрунтово-кліматичних умов України, зокрема Лісостепу та Степу. Висота рослини становить близько 240 см, а висота кріплення качана — 95 см. Качан конусно-циліндричної форми має 14–16 рядів зубоподібного жовтого зерна.

ДМ Петрос характеризується високою посухостійкістю, стійкістю до захворювань, таких як пухирчаста та летюча сажка, а також до кукурудзяного метелика. Гібрид має середню холодостійкість і високу стабільність урожаю навіть у складних агрокліматичних умовах. Оптимальна густина рослин перед збором урожаю варіюється в межах 50–80 тис./га, залежно від специфіки регіону вирощування. ДМ Петрос є надійним вибором для отримання стабільно високих врожаїв, що робить його популярним серед агровиробників України.

ДМС Корал — ранньостиглий простий гібрид кукурудзи з ФАО 190, розроблений українською селекційною компанією «МАІС гібрид» вирізняється значним потенціалом урожайності, який може досягати 14,5 т/га, швидким розвитком на початкових етапах росту та чудовою здатністю віддавати вологу.

Зерно має зубоподібну форму та жовтий колір. Рослини досягають висоти 230 см, з висотою кріплення качана 90 см. Гібрид стійкий до вилягання, основних хвороб, посухи та холоду, що робить його придатним для вирощування в зонах Полісся, Лісостепу та Степу України. Оптимальна густина посіву перед збором врожаю складає: для Полісся — 70–80 тис./га, для Лісостепу — 60–70 тис./га, а для Степу — 45–50 тис./га.

*Pisum sativum* є цінною бобовою культурою, яка використовується як харчовий продукт і кормова база. Горох має слабо розвинену кореневу систему з вузькою адаптацією до вологих і родючих ґрунтів. Він добре адаптується до помірного клімату, оптимальна температура для його росту – від 15 до 20°C. *Pisum sativum* має здатність вступати в симбіоз із азотфіксуючими бактеріями, що дозволяє йому підвищувати вміст азоту в ґрунті, зменшуючи потребу у внесенні азотних добрив. *Pisum sativum* чутливий до кадмію та свинцю. Надлишок металів може знижувати схожість насіння, а також впливати на біохімічний склад рослини, зокрема на вміст білка та амінокислот. Також металевий стрес може порушувати водний баланс рослини, що негативно впливає на її розвиток [74].

Сорт гороху Саксон є середньостиглим зерновим сортом, внесеним до Державного реєстру сортів України у 2021 році. Він рекомендований для вирощування в Лісостепу та Поліссі, де демонструє стабільну врожайність і високу якість зерна. Вегетаційний період становить 84–85 днів, а висота рослин коливається від 83,8 до 88,5 см. Рослини мають компактну форму з міцним стеблом, що забезпечує високу стійкість до вилягання. Насіння сорту кругле, гладке, зеленого кольору, з 5–7 зернами у бобі. Сорт характеризується високою стійкістю до хвороб, таких як аскохітоз,

борошниста роса та фузаріоз, а також добре переносить помірні посушливі умови. Урожайність досягає 4,5–5 т/га за оптимальних умов вирощування. Сорт створено чеськими компаніями «Селген, а.с.» та «Вузкумне центрум СЕЛТОН, с.р.о.», які спеціалізуються на селекції високопродуктивних сортів. Завдяки високій врожайності, стійкості до несприятливих умов і гарній якості зерна, сорт Саксон є надійним вибором для фермерів.

Сорт гороху «Адагумський» — середньостиглий луцильний різновид, що характеризується високою врожайністю та відмінними смаковими якостями. Вегетаційний період триває 68–73 дні. Рослина досягає висоти 70–80 см і формує 8–14 прямих темно-зелених бобів довжиною до 7 см, кожен з яких містить 6–9 темно-зелених зерен. Сорт стійкий до борошнистої роси та аскохітозу, що забезпечує дружнє плодоношення та придатність до одноразового механізованого збирання врожаю. «Адагумський» підходить для споживання у свіжому вигляді, консервування та заморожування, зберігаючи при цьому свої смакові якості.

Сорт гороху Глянс — середньоранній безлисточковий (вусатий) луцильний сорт української селекції, призначений для вирощування в Лісостепу, Степу та Поліссі України. Вегетаційний період становить 75–78 днів, висота рослин — 65–80 см. Стручки середньої довжини, містять 5–7 жовтих зерен округлої форми. Насіння відзначається підвищеним вмістом білка, який становить 21–22%, а маса 1000 насінин коливається в межах 260–280 г.

Сорт Глянс вирізняється високою стійкістю до вилягання, осипання та хвороб, таких як аскохітоз і борошниста роса. Середня врожайність становить 4,0–4,5 т/га, а потенційна — до 6,0 т/га. Завдяки своїй універсальності та зручності в збиранні Глянс є ідеальним вибором для фермерів, які прагнуть отримати стабільно високі врожаї та якісне зерно.

*Triticum aestivum* є однією з основних зернових культур, що забезпечує потреби у хлібопекарській промисловості. *Triticum aestivum* має добре розвинену кореневу систему, що дозволяє ефективно поглинати поживні



речовини з ґрунту. Рослина формує щільний покрив, що знижує ризик ерозії. Оптимальна температура для росту та розвитку пшениці – від 15 до 25°C. Пшениця потребує достатнього зволоження в період куціння та формування зерна. Внесення азотних і фосфорних добрив сприяє підвищенню врожайності та покращенню якості зерна. *Triticum aestivum* схильна до накопичення кадмію та свинцю у зерні при вирощуванні на забруднених ґрунтах. Надмірне забруднення металами може призвести до зниження вмісту білка та загальної продуктивності культури. Крім того, важкі метали можуть пригнічувати активність ферментів, що впливають на синтез амінокислот та білків [75].

Подолька — популярний сорт озимої м'якої пшениці української селекції, розроблений Інститутом фізіології рослин і генетики НАН України. Це середньоранній сорт з вегетаційним періодом 280–285 днів, висотою рослини 85–95 см і високою врожайністю, яка досягає 10–11 т/га за оптимальних умов. Зерно червоного кольору, з масою 1000 зерен 45–50 г, належить до сильних пшениць із високим вмістом білка (12–14%) і клейковини (28–30%). Подолька відзначається високою морозо- та посухостійкістю, стійкістю до хвороб, таких як борошниста роса, бура іржа, септоріоз і фузаріоз. Сорт рекомендований для вирощування в Лісостепу, Степу і Поліссі України, забезпечуючи стабільну врожайність навіть за несприятливих погодних умов. Завдяки своїй універсальності, якості зерна та надійності сорт здобув популярність серед аграріїв.

*Brassica napus* є важливою олійною культурою, яка використовується для виробництва харчових і технічних олій. *Brassica napus* характеризується швидким ростом і високою врожайністю, його коренева система проникає на значну глибину, що дозволяє поглинати поживні речовини з нижніх шарів ґрунту. Оптимальна температура для росту – 15-20°C. Для розвитку рослина потребує достатнього вмісту бору та калію, що впливає на формування якісного насіння. *Brassica napus* також чутливий до забезпечення ґрунтовою вологою під час критичних фаз росту, таких як цвітіння та налив насіння.

Ріпак чутливий до надлишку кадмію та свинцю. Підвищений рівень цих металів у ґрунті може знижувати якість і кількість олії, а також негативно впливати на морфологічні параметри рослини. Важкі метали можуть викликати зниження вмісту хлорофілу, що призводить до зниження фотосинтетичної активності та загальної продуктивності [76].

Атлант — високоврожайний сорт озимого ріпаку, який вирізняється стабільністю врожаїв, високою зимостійкістю та адаптивністю до різних агрокліматичних умов України. Сорт має середньостиглий вегетаційний період, висоту рослини 150–160 см, добре розвинену кореневу систему, яка забезпечує високу посухостійкість, і міцні стручки, стійкі до розтріскування. Зерно дрібне, з високим вмістом олії (до 46–48%). Атлант демонструє високу зимостійкість, витримуючи температури до  $-15^{\circ}\text{C}$  без снігового покриву, та стійкість до вилягання завдяки міцному стеблу. Він толерантний до фомозу, альтернاریозу, склеротиніозу та інших хвороб. Середня врожайність становить 4,5–5,5 т/га, а за сприятливих умов — до 6 т/га. Сорт підходить для вирощування в зонах Лісостепу, Степу та Полісся, з рекомендованою густотою посіву 50–55 рослин на  $1\text{ м}^2$ . Атлант потребує добре дренованих ґрунтів з нейтральною або слабнокислою реакцією та не рекомендується для посіву після інших хрестоцвітих культур. Завдяки високій олійності та стійкості до стресових умов сорт є надійним вибором для фермерів, які прагнуть отримати стабільний та якісний урожай.

*Heliánthus ánnuus* є основною олійною культурою, яка має високу здатність до поглинання важких металів. *Heliánthus ánnuus* має потужну кореневу систему, що дозволяє йому рости на різноманітних типах ґрунтів, включаючи бідні. Найсприятливіший температурний діапазон для розвитку становить від  $20$  до  $28^{\circ}\text{C}$ .

Культура потребує добре аерованих ґрунтів і сонячного світла, а також є стійкою до посухи завдяки своїй глибокій кореневій системі. *Heliánthus ánnuus* добре реагує на внесення фосфорних та калійних добрив, що сприяє збільшенню врожайності та вмісту олії в насінні. Соняшник накопичує

свинець і кадмій, особливо в кореневій системі. Це робить його перспективною культурою для фіторемедіації, але також викликає проблеми при вирощуванні на забруднених ґрунтах, оскільки токсини можуть потрапити у харчовий ланцюг. Надмірне накопичення важких металів може знижувати вміст олії та погіршувати її якість, а також пригнічувати ріст рослин через порушення метаболізму та зниження фотосинтетичної активності.

Соняшник «Ясон» — ранньостиглий трилінійний гібрид, розроблений Інститутом рослинництва імені В. Я. Юр'єва НААН України та зареєстрований у 2007 році. Рекомендований для вирощування в Степу та Лісостепу України, цей гібрид має вегетаційний період 105–108 днів. Рослини досягають висоти 175–180 см, з плескатими кошиками діаметром 18–24 см. 'Ясон' характеризується високою стійкістю до вилягання, осипання та посухи, а також толерантністю до гнилей кошика. Лушпинність становить 21,0–22,0%, маса 1000 насінин — 60–61 г, а вміст олії в насінні — 50,1%. Потенційна врожайність гібриду перевищує 4,2 т/га, із середньою врожайністю до 32 ц/га. Рекомендована густина посіву перед збиранням — 50 тис. рослин/га.

Соняшник «Заграва» — це простий ранньостиглий гібрид, розроблений Всеукраїнським науковим інститутом селекції (ВНІС). Вегетаційний період становить 100–108 днів. Рослини досягають висоти 160–180 см, мають опуклий кошик діаметром 21–24 см з напівнахиленим нахилом. Вміст олії в насінні становить 50–52%. Гібрид характеризується відмінною стійкістю до вилягання, засухи та осипання, а також проявляє стійкість до вовчка соняшникового рас А–Е. Рекомендована густина під час збирання: 55–60 тис. рослин/га для Лісостепу та 50–55 тис. рослин/га для Степу.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Фітотоксичність сполук кадмію, цинку, нікелю та хрому за сумісної дії на проростки гібридів кукурудзи і гороху

Останні роки характеризуються значним зростанням кількості наукових публікацій, які досліджують вплив елементів, що вважаються неесенціальними, таких як кадмій (Cd) та хром (Cr), на ріст і розвиток рослин, особливо за умов їх надмірного накопичення. За даними бази PubMed, лише за останнє десятиліття було опубліковано понад 6000 наукових робіт, які містять слова «cadmium» та «plants». Більше половини цих досліджень з'явилися в останні три роки. Така увага до цієї тематики пояснюється тим, що рослинна продукція є одним із ключових джерел потрапляння важких металів в організм людини. За різними джерелами, від 40% до 80% важких металів людина отримує з їжею, тоді як з повітрям і водою – лише 20–40%.

Основна частина досліджень була спрямована на вивчення акумуляції та фізіологічних ефектів окремих елементів, тоді як їх комплексний вплив вивчався обмеженою кількістю робіт. Наприклад, експерименти з вивчення впливу  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  і  $\text{Zn}^{2+}$  на люцерну показали, що концентрації 10 мг/л  $\text{Cd}^{2+}$  і  $\text{Cr}^{6+}$ , а також 20 мг/л  $\text{Cu}^{2+}$  і  $\text{Ni}^{2+}$  суттєво знижували показники схожості насіння і приросту біомаси. Водночас цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ ) за концентрації до 40 мг/л не мав помітного впливу на схожість насіння [78].

Додавання до поживного середовища 3 мг/л  $\text{Cd}^{2+}$  і 4 мг/л  $\text{Ni}^{2+}$  дозволило встановити, що гібриди кукурудзи мають дещо вищу стійкість до комбінованої дії цих елементів у порівнянні із сортами гороху. Дослідження

механізмів акумуляції показало, що проникнення кадмію ( $\text{Cd}^{2+}$ ) до корневих тканин проростків кукурудзи відбувається приблизно в 2,8 раза швидше, ніж нікелю ( $\text{Ni}^{2+}$ ).

Наші попередні дослідження показали, що на початкових етапах онтогенезу проростки кукурудзи демонструють більш виражений негативний вплив іонів нікелю на приріст головного кореня та надземної частини, а також на утворення сирої та сухої маси. Цей вплив на 15% перевищує вплив іонів хрому (III). У разі спільного внесення іонів нікелю та хрому (III) спостерігається посилення фітотоксичної дії, причому найбільше страждає коренева система рослин, тоді як надземна частина залишається менш ураженою. Це підкреслює важливість вивчення ростових реакцій кукурудзи під впливом комбінацій важких металів, зокрема  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  та  $\text{Zn}^{2+}$ , для кращого розуміння механізмів стійкості рослин [79].

Аналіз отриманих результатів (табл. 3.1 та табл. 3.2) вказує, що вплив мінімальної концентрації важких металів (1 ГДК  $\text{Cd}^{2+}$  +  $\text{Ni}^{2+}$  +  $\text{Zn}^{2+}$  +  $\text{Cr}^{6+}$ ) сприяє статистично достовірному підвищенню схожості зернівок до 5% у гібридів ДМ Петрос і ДМ Експенсів. Водночас для інших гібридів цей показник не відрізняється від контрольного. Подібна закономірність спостерігається і для швидкості проростання насіння: у більшості гібридів вона залишається на рівні контрольного варіанта або зростає на 8%, як у гібриду ДМ Експенсів. Проте у цього гібриду спостерігається уповільнення початкового етапу проростання, що підтверджується зниженням енергії проростання на 7%.

При підвищенні концентрації іонів важких металів до 5 ГДК у більшості гібридів відзначено суттєве уповільнення проростання насіння. Гібриди умовно розділено на дві групи. До першої групи належать ДМС Тріумф, ДМ Експенсів і ДМС Корал, у яких схожість зернівок зменшується до 21%. До другої групи входять ДМС Оріон і ДМ Петрос, для яких вплив важких металів у концентрації 5 ГДК не призводить до статистично достовірного зниження схожості. У першій групі гібридів швидкість

проростання та енергія проростання знижуються в середньому на 23% і 31% відповідно, тоді як у другій ці показники зменшуються лише до 10% або залишаються на рівні контрольних значень [80].

Комбінована дія іонів важких металів за концентрації 10 ГДК викликала значно сильніше пригнічення процесу проростання насіння кукурудзи порівняно з попередніми дослідними умовами. Зокрема, у гібридів ДМ Петрос і ДМС Тріумф рівень схожості зернівок зменшився на 40% і 44% відповідно. Найбільш виражене уповільнення процесів проростання було зафіксовано у гібриду ДМ Експенсів, що свідчить про його підвищену чутливість до впливу іонів металів у даній концентрації.

Таблиця 3.1. – Показники схожості насіння гібридів кукурудзи, n=100

Варіант досліду	Енергія проростання		Швидкість проростання		Схожість	
	М± m	% до контролю	М	% до контролю	М±m	% до контролю
ДМС Тріумф						
Контроль	88±2	—	14	—	97±1	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	93±2*	105,7	14	100,0	97±1	100,0
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	71±2*	80,7	12	85,7	82±1*	84,5
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	64±1*	72,7	12	85,7	81±2*	83,5
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	61±1*	69,3	9	64,3	66±1*	68,0
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	44±2*	50,0	8	57,1	55±2*	56,7
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	74±4*	84,1	12	85,7	83±3*	85,6
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	47±2*	53,4	8	57,1	54±1*	55,7
ДМ Експенсів						
Контроль	85±1	—	13	—	92±2	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	81±2*	93,3	14	108,0	97±1*	105,4
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	48±1*	56,5	8	61,5	80±1*	87,0
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	45±5*	52,9	11	84,6	59±3*	64,1
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	18±1*	21,2	6	46,2	43±2*	46,7
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	27±2*	31,8	5	38,5	34±1*	37,0
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	74±4*	84,1	7	53,8	46±2*	50,0
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	47±2*	53,4	4	30,8	31±3*	33,7
ДМС Опіон						
Контроль	91±2	—	13	—	92±2	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	91±3	100,0	13	100,0	94±2	102,2
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	82±2*	90,1	12	92,3	87±2	90,1
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	87±1	95,6	13	100,0	92±1	100,0
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	64±3*	70,3	10	76,9	71±2*	77,2
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	56±4*	61,5	10	76,9	69±2*	75,0
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	84±1*	92,3	13	100,0	89±2	96,7
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	63±3*	69,2	10	76,9	73±3*	79,3

Комбінована дія іонів важких металів при концентрації 10 ГДК спричиняла набагато сильніше гальмування проростання насіння кукурудзи порівняно з попередніми варіантами досліджень. Зокрема, у гібридів ДМ Петрос та ДМС Триумф схожість зернівок знижувалась на 40% та 44% відповідно, тоді як максимальне пригнічення процесу проростання спостерігалось у гібриду ДМ Експенсів (зменшення втричі). Насіння цього гібриду також демонструвало найменшу швидкість проростання, яка знижувалась на 70%.

Водночас сумісний вплив іонів металів у найвищій концентрації спричиняв лише часткове гальмування проростання зернівок у гібридів ДМС Оріон і ДМС Корал, знижуючи схожість на 20–25%. Однак реакція цих гібридів мала певні відмінності: у ДМС Оріон швидкість і енергія проростання зменшувались на 30%, тоді як у ДМС Корал початкові етапи проростання були значно сильніше пригнічені — енергія проростання зменшувалась більш ніж на 50%.

Особливо важливо було оцінити вплив різних комбінацій двох типів іонів металів у максимальних концентраціях, які відповідно до досліджень інших науковців та чинних стандартів класифікуються як високонебезпечні (кадмій і цинк) і помірно небезпечні (хром і нікель). Аналіз результатів дозволив виявити, що максимальна концентрація  $\text{Cd}^{2+}$  більшою мірою пригнічувала проростання насіння кукурудзи порівняно з відповідними варіантами для  $\text{Zn}^{2+}$ . Крім того, у більшості гібридів спостерігався подібний негативний вплив на схожість, коли  $\text{Zn}^{2+}$  у максимальній концентрації поєднувався з  $\text{Ni}^{2+}$  або  $\text{Cr}^{6+}$  на фоні 5 ГДК  $\text{Cd}^{2+}$  і  $\text{Cr}^{6+}$  чи 5 ГДК  $\text{Cd}^{2+}$  і  $\text{Ni}^{2+}$ . Проте у гібриду ДМ Експенсів було встановлено, що у варіанті з 5 ГДК  $\text{Cd}^{2+} + \text{Ni}^{2+} + 10$  ГДК  $\text{Zn}^{2+} + \text{Cr}^{6+}$  схожість зернівок була на 22% вищою, ніж у варіанті з 5 ГДК  $\text{Cd}^{2+} + \text{Cr}^{6+} + 10$  ГДК  $\text{Zn}^{2+} + \text{Ni}^{2+}$ .



Таблиця 3.2 – Показники схожості насіння гібридів кукурудзи, n=100

ДМ Петрос						
Варіант досліду	Енергія проростання		Швидкість проростання		Схожість	
	M± m	% до контролю	M	% до контролю	M± m	% до контролю
Контроль	90±2	—	14	—	96±1	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	98±1*	108,9	14	100,0	99±1*	103,1
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	83±1*	92,2	14	100,0	97±1	101,0
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	83±1*	92,2	13	92,9	89±1*	92,7
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	64±1*	71,1	11	78,6	76±2*	79,2
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	66±2*	73,3	11	78,6	77±2*	80,2
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	47±3*	52,2	13	92,9	92±2	95,8
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	31±3*	34,4	8	57,1	59±1*	61,5
ДМС Корал						
Контроль	82±1	—	12	—	85±2	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	85±1	103,7	12	100,0	86±1	101,2
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	57±3*	69,5	10	83,3	67±3*	78,8
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	50±3*	61,0	10	83,3	67±1*	78,8
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	57±2*	69,5	10	83,3	70±1*	82,4
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	35±3*	42,7	6	50,0	45±2*	52,9
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	39±2*	47,6	9	75,0	64±4*	75,3
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	33±2*	40,2	9	75,0	64±2*	75,3

Для гібридів ДМС Триумф, ДМ Експенсів і ДМС Корал виявлено більш виражену негативну дію на схожість насіння, коли Cd<sup>2+</sup> і Cr<sup>6+</sup> були в максимальній концентрації на фоні 5 ГДК Zn<sup>2+</sup> і Cr<sup>6+</sup> чи 5 ГДК Zn<sup>2+</sup> і Ni<sup>2+</sup>.

Водночас для гібридів ДМС Оріон і ДМ Петрос значущої різниці між цими варіантами дослідів не спостерігалось — схожість зернівок залишалась на рівні 71% і 69%, а також 76% і 77% відповідно.

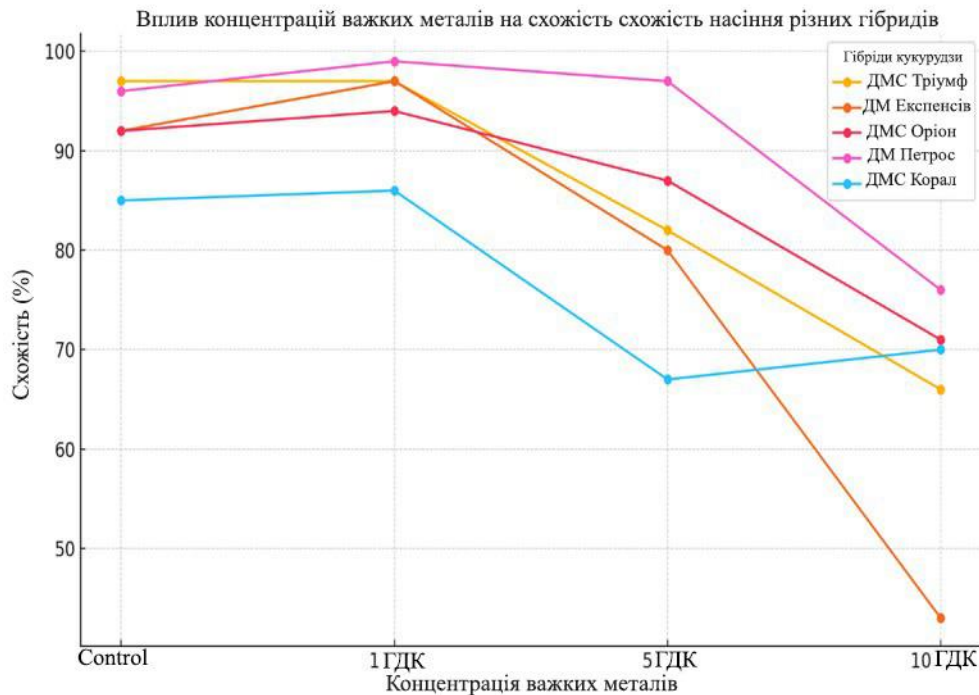


Рис.3.1 Вплив конентрацій важких металів на схожість насіння різних гібридів кукурудзи.

Таким чином, загальна закономірність для гібридів кукурудзи полягає в тому, що підвищення концентрації іонів металів призводить до пригнічення проростання насіння. У разі мінімальних концентрацій вплив або відсутній (гібриди ДМС Тріумф, ДМС Оріон, ДМ Петрос і ДМС Корал), або, навпаки, сприяє підвищенню схожості (гібриди ДМ Петрос і ДМ Експенсів). Було доведено, що іони кадмію у максимальних концентраціях викликають сильніше пригнічення проростання порівняно з іонами цинку.

Для сортів гороху експерименти показали, що навіть на початкових етапах проростання спостерігається певна закономірність впливу металів. За мінімальних концентрацій  $Cd^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  і  $Cr^{6+}$  гальмування проростання не відзначалося. У сорту Глянс, навпаки, енергія проростання збільшувалась на

42%. При концентрації іонів у 5 ГДК проявлялась сортова специфіка реакцій. Наприклад, у сорту Самсон енергія проростання знижувалась на 24%, тоді як у сорту Адагумський цей показник залишався на рівні контролю. У сорту Глянс енергія проростання, навпаки, зростала на 26% навіть при комбінації максимальних концентрацій  $Zn^{2+}$  і  $Cr^{6+}$  (10 ГДК) та нижчих концентрацій  $Cd^{2+}$  і  $Ni^{2+}$  (5 ГДК).

Аналізуючи результати, можна стверджувати, що швидкість проростання насіння сортів гороху знижується зі збільшенням концентрації іонів важких металів у середовищі.

Таблиця 3.3 – Показники схожості насіння сортів гороху

Варіант досліджу	Енергія проростання		Швидкість проростання		Схожість	
	M±m	% до контролю	M	% до контролю	M±m	% до контролю
<b>сорт Саксон</b>						
Контроль	93±2	—	14	—	97±2	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	96 ±2	103,0	14	100,0	97±2	100,0
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	71±1*	76,3	11	78,6	74±1*	76,3
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	64±1*	68,82	10	71,4	72±2*	74,2
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	50±2*	53,8	8	57,1	55±3*	56,7
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	49±2*	52,7	8	57,1	57±2*	58,8
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	51±2*	54,8	10	71,4	71±1*	73,2
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	40±2*	43,0	7	50,0	46±2*	47,4
<b>сорт Адагумський</b>						
Контроль	95±3	—	14	—	96±2	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	96±2	101,1	14	100,0	96±1	100,0
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	90±2	94,7	13	92,9	91±1	94,8
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	82±1*	86,3	12	85,7	82±1*	85,4
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	73±2*	76,8	10	71,4	73±2*	76,0
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	78±1*	82,1	11	78,6	78±2*	81,3
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	84±2*	88,4	12	85,7	85±1*	88,5
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	59±2*	62,1	8	57,1	59±2*	62,1
<b>сорт Глянс</b>						
Контроль	31±2	—	13	—	85±2	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	44±2*	141,9	13	108,3	89±2	104,0
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	39±1*	125,8	12	100,0	88±1	103,5
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	35±2*	112,9	13	91,7	83±2	97,6
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	26±1	83,9	10	91,7	79±2*	92,9
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	19±3*	61,3	10	83,3	73±3*	85,9
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	35±1*	112,9	13	91,7	80±2	94,1
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	26±1	90,3	10	83,3	71±3*	83,5

Аналіз швидкості проростання насіння сортів гороху показав, що вона значно зменшується зі збільшенням концентрації іонів важких металів у середовищі. Найбільш виражене зниження швидкості проростання спостерігалось за умов внесення металів у максимальних концентраціях. Зокрема, у сортів Адагумський та Саксон швидкість проростання зменшувалася на 43% і 50% порівняно з контролем відповідно. Водночас у сорту Глянс цей показник залишався стабільнішим, навіть при максимальних концентраціях іонів кадмію і нікелю (табл. 3.3).

Результати дослідження схожості насіння сортів гороху свідчать, що іони Cd, Ni, Zn і Cr у мінімальній концентрації (1 ГДК) практично не впливали на схожість насіння. Однак збільшення концентрації до 5 ГДК викликало статистично достовірне зниження схожості у сорту Саксон. Найсильніше пригнічення спостерігалось за внесення важких металів у концентрації 10 ГДК. Так, у сорту Саксон схожість знижувалася до 46% від контролю, у сорту Адагумський — до 62%, тоді як у сорту Глянс — лише на 16,5%. Загалом, кадмій у максимальних концентраціях викликав сильніше зниження схожості, ніж цинк. Наприклад, у сорту Адагумський при внесенні 10 ГДК  $Cd^{2+}+Ni^{2+}$  або  $Cd^{2+}+Cr^{6+}$  схожість зменшувалась на 24% і 19% відповідно, а при  $Zn^{2+}+Ni^{2+}$  або  $Zn^{2+}+Cr^{6+}$  — лише на 12% і 15%. У сорту Саксон ці відмінності були ще більш вираженими: схожість насіння зменшувалась на 27% і 26% при  $Cd^{2+}$ , а на 43% і 41% при  $Zn^{2+}$ .

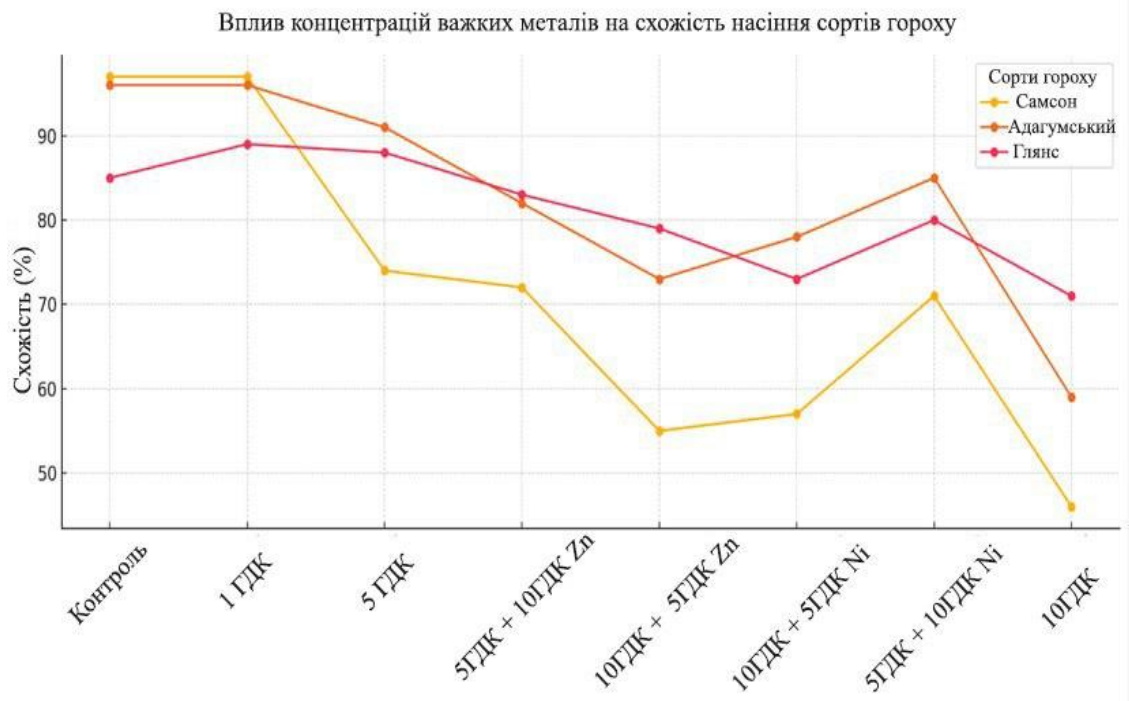


Рис.3.2 Вплив конентрацій важких металів на схожість сортів гороху

Таким чином, сорти гороху можна умовно поділити на дві групи за ступенем чутливості до дії важких металів. До першої групи належать сорти Самсон і Адагумський, у яких схожість насіння знижувалася більш ніж на 35%. До другої групи входить сорт Глянс, схожість якого зменшувалася не більше ніж на 20%. Мінімальні концентрації важких металів (1 ГДК) не спричиняли значущих змін у схожості насіння. Зниження схожості супроводжувалося зменшенням інших показників, таких як енергія та швидкість проростання.

Одними з ключових індикаторів токсичного впливу надлишкових концентрацій важких металів є уповільнення росту та зменшення біомаси. У міжнародній практиці запропоновано кілька підходів для оцінки впливу токсикантів на рослини. Серед них індекс толерантності M. Lenka , індекс ростового інгібування L. Leita та кореневий індекс (KI), запропонований D.

Wilkinson . Ці показники є ефективними для оцінки фітотоксичності іонів металів та визначення ступеня стійкості рослин до стресових факторів.

У нашому дослідженні для оцінки впливу комбінованої дії іонів кадмію, цинку, нікелю та хрому (VI) використовували показники довжини головного кореня та кореневого індексу (КІ). Порівнюючи фітотоксичність різних металів, слід враховувати гібридоспецифічність реакцій рослин. Результати експериментів, наведені в таблиці 3.4 та 3.5, свідчать, що вже за мінімального вмісту металів у середовищі проростки кукурудзи розподілилися на дві групи. До першої увійшли гібриди, у яких відзначалося зменшення довжини головного кореня та КІ.

До цієї групи увійшли гібриди ДМ Експенсів, ДМ Петрос і ДМС Корал, причому для останніх двох спостерігалось найбільш виражене зменшення показників — до значень 0,77 та 0,76 відповідно.

Таблиця 3.4 – Фітотоксична дія іонів кадмію, цинку, хрому (VI) і нікелю на проростки кукурудзи за сумісного внесення до середовища вирощування,

Варіант досліду	Довжина головного кореня, мм			КІ
	M±m	V, %	Tst	
ДМС Триумф				
Контроль	43,04±1,09	24,9	—	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	41,00±1,03 <sup>x*</sup>	24,7	1,4	0,95
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	10,89±0,30 <sup>x*</sup>	24,9	29,0	0,25
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	9,04±0,27 <sup>x</sup>	24,9	30,0	0,21
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	9,02±0,27 <sup>x</sup>	24,4	30,3	0,21
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	8,70±0,29	22,1	30,5	0,20
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	8,73±0,27	27,4	30,6	0,20
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	8,17±0,27	23,3	31,1	0,19
ДМС Оріон				
Контроль	56,60±1,43	24,5	—	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	57,45±1,49 <sup>x*</sup>	25,2	0,41	1,02
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	18,21±0,51 <sup>x*</sup>	25,0	25,3	0,32
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	16,36±0,43 <sup>x*</sup>	24,9	26,9	0,29
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	13,98±0,43 <sup>x*</sup>	24,7	28,5	0,25
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	12,25±0,41	24,8	29,8	0,22
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	16,79±0,49 <sup>x*</sup>	27,0	26,3	0,30
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	12,71±0,39	24,4	29,6	0,22
ДМ Експенсів				
Контроль	38,30±1,02	24,9	—	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	34,82±0,92 <sup>x*</sup>	26,1	2,5	0,91
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	13,67±0,43 <sup>x</sup>	24,5	22,3	0,36
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	11,96±0,31	23,5	24,8	0,31
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	12,51±0,45	23,8	23,2	0,33
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	12,41±0,53	24,7	22,6	0,32
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	13,74±0,53 <sup>*</sup>	25,2	21,5	0,36
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	11,81±0,31 <sup>*</sup>	14,8	24,9	0,31



Для другої групи гібридів, що включала ДМС Оріон і ДМС Триумф, не зафіксовано статистично значущого зменшення довжини головного кореня, і значення кореневого індексу (КІ) коливалися в межах від 0,95 до 1,02.

Збільшення концентрації іонів металів у середовищі до 5 ГДК викликало помітне скорочення довжини головного кореня. Найменший рівень гальмування спостерігався у проростків гібриду ДМ Експенсів (зменшення на 35,7% порівняно з контролем), тоді як найбільше зниження було у ДМС Триумф (на 25,3% від контролю).

Подальше підвищення рівня іонів важких металів до 10 ГДК спричинило ще значніше скорочення довжини кореня, яке було статистично достовірним у порівнянні з варіантом 5 ГДК для всіх гібридів. Найсильніше гальмування росту кореня у відношенні до контролю спостерігалось у гібриду ДМС Триумф, де цей показник знизився на 81%. У той же час, найменше пригнічення росту кореня зафіксовано у ДМ Експенсів — на 69,2%.

Таблиця 3.5 – Фітотоксична дія іонів кадмію, цинку, хрому (VI) і нікелю на проростки кукурудзи за сумісного внесення до середовища вирощування,

Варіант дослідю	Довжина головного кореня, мм			КІ
	M±m	V, %	Tst	
ДМ Петрос				
Контроль	59,83±1,52	24,7	—	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	45,89±1,09 <sup>x*</sup>	23,5	7,5	0,77
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	16,88±0,44 <sup>*</sup>	25,0	27,1	0,28
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	17,14±0,44 <sup>x*</sup>	23,8	26,9	0,29
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	16,66±0,49 <sup>*</sup>	24,7	27,0	0,28
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	14,72±0,48	26,7	28,2	0,25
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	17,71±0,47 <sup>x*</sup>	25,2	26,4	0,30
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	15,72±0,54	25,7	27,3	0,26
ДМС Корал				
Контроль	43,68±1,19	24,7	—	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	33,28±0,89 <sup>x*</sup>	24,7	7,0	0,76
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	13,35±0,44 <sup>x*</sup>	24,8	23,9	0,31
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	13,56±0,49 <sup>x*</sup>	25,7	23,4	0,31
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	13,51±0,45 <sup>x*</sup>	25,3	23,7	0,31
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	10,0±0,38	24,3	27,0	0,23
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	13,76±0,56 <sup>x*</sup>	24,9	22,8	0,32
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	10,54±0,35	26,0	26,8	0,24

Статистичний аналіз отриманих даних також виявив специфічність реакції гібридів на дію іонів металів. Наприклад, у гібридів ДМС Орion, ДМС Корал, ДМ Експенсів і ДМС Триумф значення довжини кореня у варіанті з 10 ГДК Cd<sup>2+</sup>+Cr<sup>6+</sup>+5 ГДК Zn<sup>2+</sup>+Ni<sup>2+</sup> не відрізнялися від варіанта з максимальною концентрацією металів, демонструючи однаковий сильний негативний ефект. Водночас інші комбінації металів, коли кадмій і цинк перебували у максимальній концентрації на фоні нижчих концентрацій Ni<sup>2+</sup> і Cr<sup>6+</sup>, спричиняли менш виражене пригнічення росту.

Металоспецифічність у гібридів ДМ Експенсів і ДМС Триумф проявилася в однаковому негативному ефекті на ріст кореня як за умов максимальної концентрації кадмію і цинку, так і за інших варіантів, незалежно від концентрації іонів нікелю чи хрому.

Результати таблиці 3.6 показують, що мінімальні концентрації іонів важких металів не викликали статистично достовірних змін довжини головного кореня у проростків гороху всіх досліджених сортів. Водночас фітотоксичність металів ставала помітною при підвищенні їх концентрації до 5 ГДК, особливо у сорту Саксон, тоді як у інших варіантах спостерігались різні прояви впливу залежно від сорту та комбінації металів.

Таблиця 3.6 – Токсичний вплив важких металів (кадмію, цинку, хрому та нікелю) на проростки гороху за умов їхнього комбінованого внесення

Варіант дослідю	Довжина головного кореня, мм			КІ
	M±m	V, %	Tst	
сорт Саксон				
Контроль	37,73±1,11	20,6	—	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	35,02±0,87 <sup>x*</sup>	19,8	1,9	0,93
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	10,01±0,27	26,4	24,5	0,27
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	9,63±0,29	22,7	26,2	0,26
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	8,01±0,27*	22,0	26,0	0,21
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	9,39±0,20	25,8	25,1	0,25
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	8,87±0,30	27,6	25,1	0,24
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	9,09±0,31	23,2	24,9	0,24
сорт Адагумський				
Контроль	33,08±1,05	29,6	—	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	32,05±0,87 <sup>x*</sup>	23,7	1,0	0,97
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	16,51±0,51 <sup>x*</sup>	19,7	13,9	0,50
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	12,23±0,31 <sup>x</sup>	24,3	19,0	0,37
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	12,59±0,40	24,0	18,2	0,38
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	13,55±0,33 <sup>x</sup>	20,2	12,8	0,41
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	12,61±0,29 <sup>x*</sup>	18,7	18,8	0,38
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	9,66±0,21	22,1	21,9	0,29
сорт Глянс				
Контроль	23,03±0,71	22,5	—	—
1 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	24,80±0,63 <sup>x*</sup>	24,7	1,9	1,08
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	17,18±0,41 <sup>x*</sup>	23,9	7,1	0,75
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	14,92±0,42 <sup>x*</sup>	24,8	9,8	0,65
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Cr <sup>6+</sup>	11,97±0,34 <sup>x*</sup>	25,9	14,0	0,52
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +5 ГДК Zn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup>	10,23±0,30*	20,8	16,6	0,44
5 ГДК Cd <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup> +10 ГДК Zn <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup>	16,90±0,27 <sup>x*</sup>	20,1	8,1	0,73
10 ГДК Cd <sup>2+</sup> +Ni <sup>2+</sup> +Zn <sup>2+</sup> + Cr <sup>6+</sup>	14,10±0,36	26,9	8,9	0,61

Метали в різних комбінаціях за концентрації 10 ГДК чинили виражений негативний вплив на ріст головного кореня, що відображалось у значеннях кореневого індексу (КІ), які варіювалися в межах 0,24–0,26. У проростків іншого сорту з групи найбільш чутливих до впливу  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  і  $\text{Ni}^{2+}$  (сорт Адагумський) значення КІ були дещо вищими і коливалися від 0,29 до 0,37. Для сортів цієї групи не було виявлено металоспецифічного впливу іонів Cd і Zn, навіть за умов їх максимальної концентрації в поєднанні з іншими металами.

Для більш стійкого сорту Глянс виявлено виразну металоспецифічність: комбінація  $\text{Cd}^{2+}$  з  $\text{Cr}^{6+}$  або  $\text{Ni}^{2+}$  у максимальній концентрації викликала суттєвіше гальмування росту головного кореня, ніж у випадках, коли  $\text{Zn}^{2+}$  входив до подібних комбінацій з  $\text{Cr}^{6+}$  або  $\text{Ni}^{2+}$ . Значення КІ у першому випадку варіювалися від 0,44 до 0,52, тоді як у другому — від 0,65 до 0,73. У менш стійкого сорту Адагумський схожа залежність проявлялася тільки в комбінації  $\text{Cd}^{2+}$  з  $\text{Cr}^{6+}$ .

Загальні результати дослідження підтверджують, що підвищення концентрації іонів металів призводить до пригнічення процесу проростання насіння кукурудзи. При цьому мінімальні концентрації металів або не впливали на схожість насіння (наприклад, у гібридів ДМС Тріумф, ДМС Оріон, ДМ Петрос і ДМС Корал), або сприяли її підвищенню (як у гібридів ДМ Петрос і ДМ Експенсів). Металоспецифічність дії кадмію та цинку проявлялася у сильнішому пригніченні схожості зернівок за максимальної концентрації кадмію порівняно з аналогічними концентраціями цинку.

Гібриди ДМС Тріумф, ДМ Експенсів і ДМС Корал зазнавали більшого негативного впливу на схожість насіння за умов максимальної концентрації  $\text{Cd}^{2+}$  і  $\text{Cr}^{6+}$  на фоні 5 ГДК  $\text{Zn}^{2+}$  і  $\text{Cr}^{6+}$  або 5 ГДК  $\text{Zn}^{2+}$  і  $\text{Ni}^{2+}$ . Для гібридів ДМС Оріон і ДМ Петрос ці варіанти дослідів не спричинили статистично значущих змін.

За мінімального вмісту іонів металів у середовищі вирощування гібриди кукурудзи розподілилися на дві групи. У гібридів першої групи (ДМ

Експенсів, ДМ Петрос і ДМС Корал) відзначено зменшення довжини головного кореня та зниження КІ. У другій групі (ДМС Оріон і ДМС Тріумф) статистично достовірних змін у довжині кореня не виявлено.

Серед сортів гороху також спостерігався розподіл на дві групи за рівнем негативного впливу важких металів на проростання насіння. До першої групи належали сорти Саксон і Адагумський, у яких схожість знижувалася більш ніж на 35%, тоді як у сорту Глянс зменшення становило не більше 20% порівняно з контролем. Мінімальні концентрації металів (1 ГДК) не викликали значущого зниження схожості насіння. Однак підвищення концентрації до 5 ГДК супроводжувалося зниженням інших показників проростання, таких як енергія та швидкість проростання.

Для сорту Глянс встановлено, що комбінація  $\text{Cd}^{2+}$  з  $\text{Cr}^{6+}$  або  $\text{Ni}^{2+}$  у максимальних концентраціях спричиняла більше гальмування росту головного кореня, ніж комбінації  $\text{Zn}^{2+}$  з  $\text{Cr}^{6+}$  або  $\text{Ni}^{2+}$ . Значення КІ для цих варіантів становили 0,44–0,52 і 0,65–0,73 відповідно.

### 3.2. Вплив важких металів на проростки пшениці та ріпаку

Результати досліджень показали, що важкі метали впливають на енергію проростання, швидкість проростання та схожість насіння. Наведені дані ілюструють зміни цих параметрів для пшениці та ріпаку під дією різних концентрацій металів.

Аналіз даних, представлених у таблиці 3.7 дозволяє оцінити вплив важких металів (Cd, Ni, Zn, Cr) у різних концентраціях на показники проростання насіння двох культур — пшениці та ріпаку. Розглядаються такі параметри, як енергія проростання, швидкість проростання та схожість

насіння, а також їхні зміни у відсотковому співвідношенні до контрольних значень.

Контрольний варіант, у якому насіння проростало без впливу важких металів, демонстрував високі показники проростання: енергія проростання становила 93%, швидкість проростання — 14, а схожість насіння — 96%. Ці дані прийняті за 100% для порівняння з іншими варіантами дослід.

Таблиця 3.7 Показники схожості насіння пшениці та ріпаку під впливом важких металів (n=100)

Варіант дослід	Енергія проростання	% до контролю	Швидкість проростання (M±m)	% до контролю	Схожість (M±m)	% до контролю
Пшениця						
Контроль	93 ± 2	100	14 ± 1	100	96 ± 1	100
1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	91 ± 2	98	13 ± 1	93	95 ± 2	99
5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	75 ± 1	81	12 ± 1	86	84 ± 2	88
10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	60 ± 3	65	10 ± 1	71	72 ± 3	75
Ріпак						
Контроль	90 ± 1	100	14 ± 1	100	93 ± 2	100
1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	88 ± 2	98	13 ± 1	93	90 ± 2	97
5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	72 ± 2	80	11 ± 1	79	80 ± 2	86
10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	50 ± 3	56	8 ± 1	57	65 ± 3	70

1 ГДК (мінімальна концентрація металів): Незначний вплив на показники проростання пшениці. Енергія проростання знизилася до 91% (98% від контролю), швидкість проростання — до 13 (93% від контролю), а схожість насіння склала 95%, що становить 99% від контрольного рівня. Отже, у цьому варіанті вплив металів був мінімальним і майже не відображався на життєздатності насіння.

5 ГДК (підвищена концентрація): Тут вже помітно негативний вплив. Енергія проростання зменшилася до 75% (81% від контролю), швидкість проростання впала до 12 (86%), а схожість насіння знизилася до 84%, що становить 88% від контрольного показника. Це свідчить про помітний токсичний вплив підвищеного рівня важких металів на насіння пшениці.

10 ГДК (максимальна концентрація): Спостерігається суттєве погіршення всіх показників. Енергія проростання впала до 60% (65%), швидкість проростання зменшилася до 10 (71%), а схожість насіння знизилася до 72% (75%). Ці дані вказують на сильну фітотоксичну дію важких металів за високих концентрацій, що значно пригнічує проростання насіння пшениці.

Контрольний варіант для ріпаку також демонстрував високі показники проростання: енергія проростання становила 90%, швидкість проростання — 14, а схожість насіння — 93%. Ці значення також прийняті за 100% для порівняння.

1 ГДК (мінімальна концентрація металів), як і у випадку пшениці, ріпак виявляв незначні зміни під впливом мінімальної концентрації металів. Енергія проростання склала 88% (98% від контролю), швидкість проростання — 13 (93%), а схожість насіння — 90% (97%). Цей варіант показує, що ріпак є досить стійким до мінімального рівня забруднення важкими металами.

5 ГДК (підвищена концентрація), тут уже спостерігається помітне зниження показників. Енергія проростання становила 72% (80% від контролю), швидкість проростання — 11 (79%), а схожість насіння — 80% (86%). Хоча ці значення кращі, ніж у пшениці за аналогічних умов, вони все одно свідчать про токсичний вплив металів.

10 ГДК (максимальна концентрація), ріпак демонстрував найбільше зниження показників за максимальної концентрації металів. Енергія проростання впала до 50% (56% від контролю), швидкість проростання — до 8 (57%), а схожість насіння — до 65% (70%). Це свідчить про сильний



токсичний вплив металів, хоча ріпак все ж проявив дещо вищу стійкість порівняно з пшеницею.

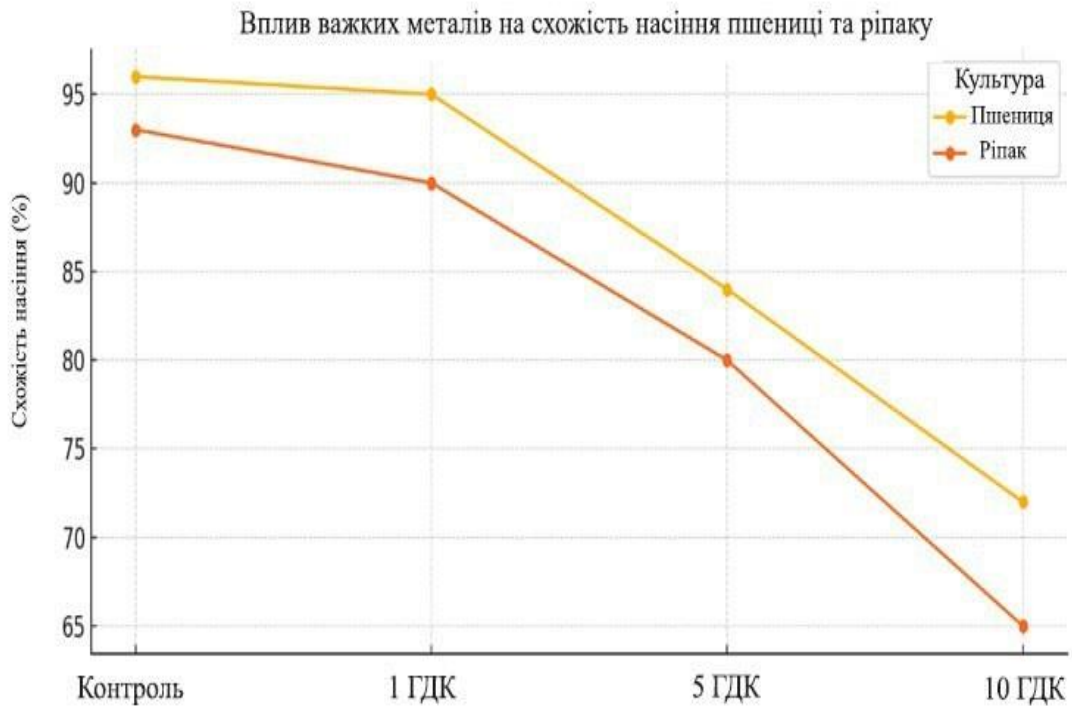


Рис 3.3 Вплив важких металів на схожість пшениці та ріпаку

**Вплив концентрації металів:** Обидві культури демонструють закономірне зниження показників проростання із підвищенням концентрації важких металів. Мінімальні концентрації (1 ГДК) спричиняли незначний або відсутній негативний ефект, тоді як максимальні концентрації (10 ГДК) викликали значне зниження всіх показників. **Стійкість культур:** Ріпак виявився більш стійким до токсичного впливу важких металів, ніж пшениця, особливо за умов мінімальних концентрацій. Однак за максимальних концентрацій (10 ГДК) обидві культури зазнавали значного пригнічення процесу проростання. **Ефективність показників:** Енергія проростання, швидкість проростання та схожість насіння є надійними індикаторами для оцінки токсичності важких металів і стійкості рослин до стресових факторів.

Накопичення кадмію, нікелю, цинку та хрому у рослинах пшениці та ріпаку вивчали в кореневій системі та надземних органах.

Таблиця 3.7 Вміст важких металів у вегетативних органах пшениці та ріпаку (мг/кг сухої маси)

Культура	Орган	Cd	% до контролю	Ni	% до контролю	Zn	% до контролю	Cr	% до контролю
Пшениця	Корені	18	100	12	100	50	100	8	100
	Надземні органи	4	22	3	25	20	40	2	25
Ріпак	Корені	22	100	15	100	60	100	10	100
	Надземні органи	5	23	4	27	25	42	3	30

Аналіз вмісту важких металів у вегетативних органах пшениці та ріпаку показує закономірний розподіл металів між коренями та надземними частинами рослин. У коренях обох культур спостерігається значно вищий рівень накопичення важких металів порівняно з надземними органами. Для пшениці вміст кадмію (Cd) становив 18 мг/кг, нікелю (Ni) — 12 мг/кг, цинку (Zn) — 50 мг/кг, а хрому (Cr) — 8 мг/кг, що відповідає 100% контрольних значень. У надземних органах пшениці вміст металів був значно нижчим: кадмій — 4 мг/кг (22% до рівня в коренях), нікель — 3 мг/кг (25%), цинк — 20 мг/кг (40%), хром — 2 мг/кг (25%).

Ріпак також демонстрував вищу акумуляцію металів у коренях: кадмій — 22 мг/кг, нікель — 15 мг/кг, цинк — 60 мг/кг, хром — 10 мг/кг, що відповідає 100% до контролю. У надземних частинах ріпаку вміст металів був дещо вищим, ніж у пшениці, але все ж значно поступався їх концентрації

у коренях. Кадмій у надземних органах ріпаку становив 5 мг/кг (23% до рівня в коренях), нікель — 4 мг/кг (27%), цинк — 25 мг/кг (42%), а хром — 3 мг/кг (30%).

Таким чином, корені обох культур виступають основним місцем накопичення важких металів, зокрема цинку, який досягав найвищих концентрацій серед досліджуваних металів. Ріпак виявився більш здатним до акумуляції кадмію та цинку порівняно з пшеницею, але частка перенесення металів у надземні органи у нього також була дещо вищою. Ці дані свідчать про важливість врахування культури та органу рослини при оцінці забруднення важкими металами.

Довжина коренів проростків пшениці та ріпаку за різних концентрацій металів значно змінювалася, особливо за підвищення концентрацій до 10 ГДК.

Таблиця 3.8 Вплив важких металів на довжину коренів проростків, n=100

Культура	Варіант досліджу	Довжина кореня (M±m), мм	% до контролю	КІ
Пшениця	Контроль	45 ± 1.2	100	1.00
	1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	42 ± 1.3	93	0.93
	5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	30 ± 1.4	68	0.68
	10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	20 ± 1.0	44	0.44
Ріпак	Контроль	40 ± 1.0	100	1.00
	1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	36 ± 1.1	90	0.90
	5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	25 ± 1.2	63	0.63
	10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	15 ± 0.8	38	0.38

Аналіз даних таблиці 3.8 дозволяє оцінити фітотоксичну дію важких металів (Cd, Ni, Zn, Cr) на довжину коренів проростків пшениці та ріпаку при різних концентраціях металів. Розглядаються довжина кореня, відсоткове

співвідношення до контрольного варіанта та кореневий індекс (КІ), який є відносним показником пригнічення росту коренів.

Контрольний варіант показав максимальну довжину кореня — 45 мм із КІ, рівним 1.00 (100% до контролю). 1 ГДК (мінімальна концентрація), довжина кореня зменшилася до 42 мм, що становить 93% від контрольного значення, КІ — 0.93. Це свідчить про помірний вплив важких металів при мінімальній концентрації. 5 ГДК (підвищена концентрація), довжина кореня скоротилася до 30 мм (67% до контролю), КІ — 0.67. Відчутний токсичний вплив металів значно пригнічував ріст коренів. 10 ГДК (максимальна концентрація), довжина кореня впала до 20 мм, що становить 44% до контролю, КІ — 0.44. Цей варіант демонструє сильний токсичний ефект, який різко гальмує розвиток кореневої системи.

Контрольний варіант для ріпаку показав довжину кореня 40 мм із КІ, рівним 1.00 (100% до контролю). 1 ГДК (мінімальна концентрація), довжина кореня зменшилася до 36 мм (90% до контролю), КІ — 0.90. Подібно до пшениці, цей рівень металів мав помірний негативний вплив. 5 ГДК (підвищена концентрація), довжина кореня скоротилася до 25 мм (63% до контролю), КІ — 0.63. Цей варіант демонструє більш виражену токсичність металів, ніж у мінімальній концентрації. 10 ГДК (максимальна концентрація), довжина кореня впала до 15 мм, що становить лише 38% до контролю, КІ — 0.38. Ріпак зазнав сильного пригнічення росту коренів при високій концентрації металів.

Пшениця продемонструвала сильніший токсичний вплив важких металів порівняно з ріпаком. У варіанті з 10 ГДК довжина кореня зменшилася на 56% порівняно з контролем, тоді як у ріпаку цей показник зменшився на 62%. Ріпак виявився більш чутливим до впливу важких металів у підвищених концентраціях (5 ГДК і 10 ГДК), але його коренева система зберігала відносно кращу стійкість у мінімальній концентрації (1 ГДК). Залежність від концентрації, у обох культур спостерігалася закономірність — із підвищенням концентрації важких металів довжина кореня зменшувалася,

а КІ поступово знижувався, що свідчить про прогресуючу токсичність. Кореневий індекс (КІ) є зручним і інформативним показником для оцінки фітотоксичності важких металів, адже дозволяє кількісно оцінити пригнічення росту коренів у порівнянні з контрольним варіантом.

### 3.3. Вплив важких металів на проростки соняшника та сої

Результати досліджень показують, що важкі метали суттєво впливають на енергію проростання, швидкість проростання та схожість насіння соняшника і сої. У дослідженнях розглядали вплив різних концентрацій важких металів (1, 5, 10 ГДК).

Таблиця 3.9 Показники схожості насіння соняшника та сої під впливом важких металів (n=100)

Сорт	Варіант досліджу	Енергія проростання (M±m)	% до контролю	Швидкість проростання (M±m)	% до контролю	Схожість (M±m)	% до контролю
<b>Соняшник</b>							
Ясон	Контроль	92 ± 2	100	14 ± 1	100	96 ± 1	100
	1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	90 ± 2	98	13 ± 1	93	95 ± 2	99
	5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	70 ± 1	76	11 ± 1	79	82 ± 2	85
	10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	50 ± 3	54	8 ± 1	57	65 ± 3	68
Заграва	Контроль	91 ± 2	100	13 ± 1	100	94 ± 1	100
	1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	89 ± 1	98	12 ± 1	92	92 ± 1	98
	5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	72 ± 1	79	10 ± 1	77	80 ± 2	85
	10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	48 ± 3	53	7 ± 1	54	62 ± 3	66
<b>Соя</b>							
Діона	Контроль	88 ± 1	100	13 ± 1	100	93 ± 2	100
	1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	85 ± 2	96	12 ± 1	92	91 ± 2	98
	5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	75 ± 1	85	11 ± 1	84	85 ± 2	91
	10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	60 ± 2	68	9 ± 1	69	72 ± 3	77
Муза	Контроль	89 ± 1	100	14 ± 1	100	94 ± 1	100
	1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	86 ± 2	97	13 ± 1	93	93 ± 2	99
	5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	74 ± 1	83	10 ± 1	78	84 ± 2	89
	10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	58 ± 2	65	8 ± 1	64	70 ± 3	74

Аналіз даних таблиці демонструє вплив важких металів (Cd, Ni, Zn, Cr) у різних концентраціях (1 ГДК, 5 ГДК, 10 ГДК) на показники проростання насіння соняшника та сої, включаючи енергію проростання, швидкість проростання та схожість насіння. Для кожної культури досліджено два сорти, результати яких порівнюються із контрольним варіантом (без впливу металів).

У соняшника сорт "Ясон" у контрольному варіанті демонстрував високі показники: енергія проростання 92%, швидкість проростання 14, а схожість насіння — 96% (прийняті за 100%). При мінімальній концентрації металів (1 ГДК) спостерігались незначні зміни: енергія проростання знизилась до 90% (98%), швидкість до 13 (93%), а схожість до 95% (99%). За концентрації 5 ГДК відбулося помітне погіршення показників: енергія проростання становила 70% (76%), швидкість проростання — 11 (79%), а схожість — 82% (85%). Максимальна концентрація (10 ГДК) спричинила суттєвий негативний вплив: енергія проростання знизилася до 50% (54%), швидкість до 8 (57%), а схожість до 65% (68%). Сорт "Заграва" мав подібну тенденцію. У контрольному варіанті показники були високими: енергія проростання 91%, швидкість проростання 13, схожість 94% (100%). При 1 ГДК металів енергія проростання становила 89% (98%), швидкість — 12 (92%), схожість — 92% (98%). За концентрації 5 ГДК енергія проростання впала до 72% (79%), швидкість — до 10 (77%), а схожість до 80% (85%). Максимальна концентрація (10 ГДК) знизилася показники до 48% (53%), 7 (54%) і 62% (66%) відповідно.

У сої сорт "Діона" мав енергію проростання 88%, швидкість 13, схожість 93% у контрольному варіанті (100%). При 1 ГДК металів показники дещо знижувались: енергія проростання становила 85% (96%), швидкість — 12 (92%), схожість — 91% (98%). За 5 ГДК енергія проростання впала до 75% (85%), швидкість — до 11 (84%), а схожість — до 85% (91%). У 10 ГДК спостерігалось суттєве зниження: енергія проростання становила 60% (68%), швидкість — 9 (69%), схожість — 72% (77%). Сорт "Муза" показав

аналогічну тенденцію. У контрольному варіанті енергія проростання становила 89%, швидкість — 14, схожість — 94% (100%). При 1 ГДК показники знизились до 86% (97%), 13 (93%) та 93% (99%). За 5 ГДК енергія проростання становила 74% (83%), швидкість — 10 (78%), схожість — 84% (89%). При максимальній концентрації (10 ГДК) енергія проростання впала до 58% (65%), швидкість — до 8 (64%), а схожість — до 70% (74%).

Загалом результати показують, що підвищення концентрації важких металів призводить до закономірного зниження всіх показників проростання у соняшника та сої. Мінімальні концентрації (1 ГДК) мають незначний негативний вплив, тоді як максимальні концентрації (10 ГДК) викликають суттєве пригнічення енергії проростання, швидкості проростання та схожості. Соняшник демонструє більшу чутливість до дії металів порівняно з соєю, хоча обидві культури суттєво реагують на підвищення концентрації важких металів у середовищі проростання.

Дослідження показали, що кадмій, нікель, цинк та хром накопичуються переважно в коренях.

Таблиця 3.10 Вміст важких металів у вегетативних органах соняшника та сої (мг/кг сухої маси)

Культура	Сорт	Орган	Cd	Ni	Zn	Cr
Соняшник	Ясон	Корені	20	18	55	10
		Надземні органи	6	5	22	3
	Заграва	Корені	22	19	58	11
		Надземні органи	7	6	24	4
Соя	Діона	Корені	18	16	50	9
		Надземні органи	5	4	20	3
	Муза	Корені	19	17	52	10
		Надземні органи	6	5	22	3



Таблиця 3.10 відображає вміст важких металів (Cd, Ni, Zn, Cr) у вегетативних органах соняшника та сої, представлених двома сортами для кожної культури. Дані наводяться у мг/кг сухої маси для коренів і надземних органів.

У соняшника сорт "Ясон" акумулював найбільші концентрації важких металів у коренях: кадмій (Cd) — 20 мг/кг, нікель (Ni) — 18 мг/кг, цинк (Zn) — 55 мг/кг, хром (Cr) — 10 мг/кг. У надземних органах концентрації металів були значно нижчими: кадмій — 6 мг/кг, нікель — 5 мг/кг, цинк — 22 мг/кг, хром — 3 мг/кг. Схожий розподіл спостерігався і у сорту "Заграва", де вміст металів у коренях був навіть трохи вищим: кадмій — 22 мг/кг, нікель — 19 мг/кг, цинк — 58 мг/кг, хром — 11 мг/кг. У надземних органах цього сорту метали накопичувалися в межах: кадмій — 7 мг/кг, нікель — 6 мг/кг, цинк — 24 мг/кг, хром — 4 мг/кг.

У сої корені також виступали основним місцем накопичення важких металів. У сорту "Діона" вміст кадмію становив 18 мг/кг, нікелю — 16 мг/кг, цинку — 50 мг/кг, хрому — 9 мг/кг. У надземних органах цього сорту концентрації були значно нижчими: кадмій — 5 мг/кг, нікель — 4 мг/кг, цинк — 20 мг/кг, хром — 3 мг/кг. У сорту "Муза" показники для коренів були схожими: кадмій — 19 мг/кг, нікель — 17 мг/кг, цинк — 52 мг/кг, хром — 10 мг/кг. У надземних органах вміст металів становив: кадмій — 6 мг/кг, нікель — 5 мг/кг, цинк — 22 мг/кг, хром — 3 мг/кг.

Загалом дані свідчать, що корені обох культур накопичували значно більші концентрації важких металів порівняно з надземними органами. Сорти соняшника ("Ясон" і "Заграва") мали тенденцію до вищого рівня накопичення металів, особливо цинку та хрому, у порівнянні із соєю. Однак у всіх випадках цинк був найвищим за концентрацією серед досліджених металів, а хром мав найнижчий рівень. Ці результати підтверджують, що

корені є основним місцем акумуляції важких металів, тоді як надземні органи характеризуються значно нижчим вмістом токсичних елементів.

Сумісна дія важких металів значно впливає на ріст коренів проростків, що відображено в наступній таблиці.

Таблиця 3.11 Вплив важких металів на довжину коренів проростків, n=100

Культур а	Сорт	Варіант досліджу	Довжина кореня ( $M \pm m$ ), мм	% до контролю	КІ
Соняшник	Ясон	Контроль	45 ± 1.2	100	1.00
		1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	42 ± 1.3	93	0.93
		5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	30 ± 1.5	67	0.67
		10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	20 ± 1.0	44	0.44
Соя	Діона	Контроль	40 ± 1.0	100	1.00
		1 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	36 ± 1.1	90	0.90
		5 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	25 ± 1.2	63	0.63
		10 ГДК Cd + Ni + Zn + Cr	15 ± 0.8	38	0.38

Таблиця 3.11 ілюструє фітотоксичний вплив важких металів (Cd, Ni, Zn, Cr) у різних концентраціях (1 ГДК, 5 ГДК, 10 ГДК) на довжину коренів проростків соняшника (сорт "Ясон") та сої (сорт "Діона"). Дані представлені у вигляді середніх значень довжини кореня з похибкою ( $M \pm m$ ), відсоткового співвідношення до контрольного варіанта та кореневого індексу (КІ), який характеризує рівень пригнічення росту коренів.

У соняшника сорт "Ясон" у контрольному варіанті довжина кореня становила 45 мм, що прийнято за 100% із КІ = 1.00. При мінімальній концентрації металів (1 ГДК) довжина кореня знизилася до 42 мм (93% до контролю) з КІ = 0.93, що вказує на помірний негативний вплив. За концентрації 5 ГДК довжина кореня скоротилася до 30 мм (67% до

контролю), КІ знизився до 0.67, демонструючи відчутне пригнічення росту. У варіанті з максимальною концентрацією металів (10 ГДК) довжина кореня впала до 20 мм (44% до контролю) з КІ = 0.44, що свідчить про суттєвий токсичний ефект.

У сої сорт "Діона" контрольний варіант показав довжину кореня 40 мм, що також прийнято за 100% із КІ = 1.00. При 1 ГДК довжина кореня зменшилася до 36 мм (90% до контролю) з КІ = 0.90, демонструючи помірний токсичний вплив. За концентрації 5 ГДК довжина скоротилася до 25 мм (63% до контролю) з КІ = 0.63, вказуючи на значний негативний вплив металів. У варіанті 10 ГДК довжина кореня знизилася до 15 мм (38% до контролю) з КІ = 0.38, що вказує на сильне пригнічення росту коренів.

Загальні висновки, обидві культури демонструють закономірне зниження довжини коренів із підвищенням концентрації важких металів у середовищі проростання. Соняшник виявився дещо стійкішим до токсичного впливу за низьких концентрацій (1 ГДК), тоді як соя демонструвала подібний рівень пригнічення росту при середніх (5 ГДК) і високих (10 ГДК) концентраціях. Кореневий індекс (КІ) є інформативним показником фітотоксичності, що дозволяє кількісно оцінити ступінь впливу металів на ріст кореневої системи.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.

### 4.1 Інструкція з пожежної безпеки для лабораторії

#### 1. Загальні положення з пожежної безпеки

1.1. Забезпечення пожежної безпеки на об'єкті здійснюється відповідно до положень Кодексу цивільного захисту України, а також згідно з вимогами «Правил пожежної безпеки в Україні», затверджених наказом МВС України від 30 грудня 2014 року №1417.

1.2. Ця інструкція встановлює правила пожежної безпеки, які діють у лабораторіях та допоміжних приміщеннях Криворізького ботанічного саду НАН України, визначаючи необхідні заходи для запобігання пожежам і реагування у разі їх виникнення.

1.3. Документ містить основні положення щодо прав та обов'язків працівників, встановлює протипожежний режим у приміщеннях, регламентує організацію робочих місць, визначає дії в екстрених ситуаціях, а також правила використання засобів пожежогасіння.

1.4. Виконання вимог цієї інструкції є обов'язковим для всіх співробітників, які працюють у зазначених приміщеннях або перебувають у них під час виконання своїх обов'язків.

#### Вимоги до забезпечення пожежної безпеки

2.1. Усі співробітники лабораторій, включаючи технічний персонал Криворізького ботанічного саду НАН України, зобов'язані пройти вступний інструктаж із правил пожежної безпеки під час оформлення на роботу та підтвердити свої знання шляхом складання перевірки.

2.2. У лабораторних приміщеннях дозволяється розміщувати виключно меблі, обладнання, інструменти та матеріали, що безпосередньо потрібні для

виконання професійних завдань. Усі речі мають зберігатися у спеціально відведених місцях, зокрема в шафах, на полицях або стелажах.

2.3. По завершенню робочого дня всі горючі речовини та матеріали мають бути перенесені у спеціальні приміщення, обладнані відповідно до вимог пожежної безпеки, для забезпечення їхнього надійного та безпечного зберігання.

2.4. Електроприлади, електромережі та інше електрообладнання дозволяється використовувати виключно в технічно справному стані. Усі дії з цими пристроями повинні відповідати інструкціям виробників і встановленим нормам безпеки.

2.5. У разі виявлення несправностей у роботі електричних мереж, розеток, вимикачів або іншого обладнання слід негайно знеструмити їх, повідомити про проблему відповідальну особу та організувати ремонт для запобігання виникненню небезпечних ситуацій.

2.6. Евакуаційні шляхи та виходи повинні бути постійно вільними від сторонніх предметів і не захарашені. Це необхідно для забезпечення швидкої та безпечної евакуації у разі виникнення пожежі або іншої надзвичайної ситуації.

2.7. Кожен працівник лабораторії зобов'язаний володіти навичками використання первинних засобів пожежогасіння, таких як вогнегасники, а також знати їхнє точне місцезнаходження у приміщеннях, де вони працюють.

Додаткові вимоги до пожежної безпеки

2.8. У лабораторіях категорично забороняється:

- Використання побутових електроприладів, таких як кип'ятильники чи електронагрівачі, поза межами спеціально обладнаних зон.
- Експлуатація тимчасових електромереж або прокладка кабелів і проводів на основі з легкозаймистих матеріалів.

- Блокування евакуаційних виходів або їх закриття за допомогою замків, болтів чи інших пристроїв, які ускладнюють швидке відкривання зсередини.

- Зберігання документів, матеріалів або будь-яких предметів у щитових або інших елементах електричної та комунікаційної інфраструктури.

- Паління у приміщеннях.

- Виконання робіт зі зварювання чи інших операцій з відкритим вогнем без попереднього оформлення наряду-допуску.

2.9. Після завершення робочого дня відповідальна за пожежну безпеку особа повинна:

- Перевірити всі приміщення, щоб упевнитися у відсутності порушень, які можуть спричинити пожежу.

- Вимкнути освітлення та знеструмити всі електроприлади й обладнання, які не потребують постійного живлення.

Основні причини виникнення пожеж

3.1. Пожежі найчастіше виникають через такі причини:

- Недотримання норм пожежної безпеки під час проведення робіт із застосуванням зварювальних апаратів.

- Небезпечне поводження з відкритим вогнем або джерелами підвищеної температури.

- Використання саморобних або несправних електроприладів, таких як кип'ятильники, подовжувачі чи електрочайники.

- Порушення правил поводження з легкозаймистими матеріалами та їх неналежне зберігання.

- Недотримання "Правил технічної експлуатації електроустановок", використання несправного обладнання, що може спричинити коротке замикання або інші аварійні ситуації.

Обов'язки та дії працівників у разі пожежі

4.1. У разі пожежі першочерговими діями є забезпечення безпеки людей, організація їх евакуації та вжиття заходів для недопущення поширення вогню.

4.2. Якщо виявлено пожежу, необхідно:

- Швидко оцінити ситуацію. Якщо загоряння неможливо загасити самостійно, слід негайно повідомити пожежну службу за номером 101 або місцевим номером 35-10-53. При цьому слід чітко повідомити:

- точну адресу (вул. Маршака, 6, будівля 50);
- поверхи, які охоплені вогнем;
- місце початку пожежі;
- кількість людей у будівлі;
- свої контактні дані (ім'я та посаду).

- Попередити всіх присутніх у будівлі про небезпеку.
- Вимкнути від електромережі всі прилади й обладнання.
- Організувати евакуацію людей та, за можливості, винести цінні речі, дотримуючись правил безпеки.

- Розпочати гасіння пожежі доступними засобами. У разі неможливості гасіння слід залишити приміщення, щільно зачинити за собою двері для обмеження доступу кисню, і виконувати вказівки відповідальних осіб.

- Не відкривати вікна та двері, щоб не спричинити посилення тяги та поширення вогню.

4.3. Після прибуття пожежної команди відповідальний працівник повинен:

- Надати старшому підрозділу повну інформацію про місце загоряння, стан будівлі та кількість людей, які можуть перебувати всередині.

- Дотримуватись усіх вказівок пожежної служби для забезпечення ефективного гасіння.

## 4.2 Інструкція з охорони праці для лаборанта хімічного аналізу

### 1. Загальні положення

1.1. Ця інструкція визначає вимоги з охорони праці для лаборантів хімічного аналізу (далі – лаборантів).

1.2. До роботи лаборантами допускаються особи, які досягли 18-річного віку, ознайомилися з цією інструкцією, пройшли обов'язковий медичний огляд і отримали вступний та первинний інструктаж із питань безпеки праці та пожежної безпеки.

1.3. У процесі роботи лаборанти зобов'язані проходити повторний інструктаж безпосередньо на робочому місці один раз на пів року.

### 1.4. Обов'язки лаборанта

Лаборант зобов'язаний:

- Виконувати всі встановлені правила з охорони праці, дотримуючись вимог інструкцій і регламентів.
- Працювати лише з тими матеріалами й обладнанням, для яких пройдено відповідний інструктаж і отримано дозвіл.
- Проходити регулярні медичні огляди відповідно до графіка, затвердженого роботодавцем.
- Дбати про власну безпеку та здоров'я, а також не створювати загрози для інших осіб під час роботи чи перебування на території закладу.
- У разі аварії, пожежі або нещасного випадку негайно повідомити керівництво, надати першу допомогу постраждалим і забезпечити їх транспортування до медичного закладу.
- Зберігати робоче місце та стан обладнання без змін до завершення розслідування інциденту, якщо це не загрожує безпеці людей.



- Утриматися від виконання робіт до повного усунення причин аварії чи небезпечної ситуації.
- Дотримуватися правил внутрішнього розпорядку, норм пожежної безпеки та інших обов'язкових вимог.

**1.6.** Лаборанту, який працює у шкідливих або небезпечних умовах, а також у роботах, пов'язаних із забрудненням чи несприятливими температурами, надаються безкоштовно спеціальні засоби захисту за встановленими нормами:

- Бавовняний халат.
- Респіратор типу «Пелюстка» або його аналог.
- Гумові рукавички.

Крім цього, працівник забезпечується милом за встановленими нормами.

Інструкція з охорони праці для лаборанта хімічного аналізу

#### 1. Загальні положення

1.7. Лаборант, виконуючи роботи з агресивними хімічними речовинами (кислоти, луги тощо), зобов'язаний використовувати спеціальний захисний одяг, виготовлений із матеріалів, що забезпечують надійний захист від їхнього впливу.

1.8. У разі виникнення небезпечної ситуації, яка може становити загрозу життю чи здоров'ю, лаборант має право відмовитися від виконання завдання до усунення небезпеки.

1.9. Заборонено приступати до роботи в стані алкогольного чи наркотичного сп'яніння, а також за наявності ознак фізичного виснаження або поганого самопочуття.

1.10. Порушення вимог цієї інструкції та правил охорони праці може стати підставою для притягнення до відповідальності відповідно до чинного законодавства та правил внутрішнього трудового розпорядку.

#### 2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Перед початком роботи лаборант повинен перевірити стан засобів індивідуального захисту, впевнитися в їхній справності та правильно використовувати їх за призначенням.

2.2. За 10–15 хвилин до початку виконання завдань необхідно ввімкнути припливно-витяжну вентиляцію, щоб забезпечити належний рівень повітрообміну та створити безпечні умови праці.

2.3. У робочій зоні слід розміщувати лише ті реактиви, інструменти та обладнання, які потрібні для виконання конкретного завдання.

2.4. Лаборант зобов'язаний перевірити справність обладнання, а також запустити загальнообмінну вентиляцію чи вентиляцію у витяжній шафі, якщо це передбачено.

2.5. Перед виконанням робіт із використанням вакуумного обладнання потрібно перевірити його герметичність.

2.6. У разі виявлення несправностей у роботі обладнання або засобів колективного захисту лаборант повинен негайно повідомити керівника й утриматися від виконання роботи до повного усунення недоліків.

### 3. Вимоги безпеки під час виконання роботи

3.1. Роботи з токсичними, їдкими, вибухонебезпечними речовинами або речовинами із сильним запахом слід виконувати у витяжній шафі, використовуючи засоби індивідуального захисту.

3.2. Нагрівання горючих або легкозаймистих рідин відкритим полум'ям заборонено.

3.3. Усі роботи, під час виконання яких виділяється тепло, мають здійснюватися виключно в термостійкому або порцеляновому посуді, здатному витримувати високі температури.

3.4. Нагріваючи рідини у пробірках, слід спрямовувати отвір у бік, протилежний від себе та інших.

3.5. Для струшування розчинів у колбах чи пробірках необхідно використовувати спеціальні пробки.

3.6. Забороняється відбирати речовини безпосередньо з великих ємностей, таких як бутлі чи бочки.

3.7. Лаборант зобов'язаний:

- Не залишати нагрівальні прилади чи інше обладнання без нагляду.
- Зберігати лише марковані речовини, а невідомі зразки утилізувати.
- Відпрацьовані рідини (ефіри, бензол, кислоти, луги) зливати у спеціальні контейнери для утилізації.

3.8. Правила безпеки при роботі зі скляним посудом:

- Перед використанням оглянути посуд на наявність пошкоджень.
- Не застосовувати скляний посуд із тріщинами чи іншими дефектами.
- Для обробки чи різання скляних трубок використовувати рукавиці.
- Уникати перевантаження стінок великих скляних ємностей.

Дотримання цих вимог є обов'язковим для запобігання небезпечним ситуаціям і забезпечення безпечних умов праці.

Інструкція з охорони праці для лаборанта хімічного аналізу

3.8. Вимоги безпечної роботи зі скляним посудом

3.8.1. Під час збирання скляних апаратів або приєднання до них гумових трубок слід використовувати рушник для захисту рук, щоб уникнути можливих травм.

3.8.2. Під час роботи слід враховувати тип і марку скла, щоб переконатися у відповідності посуду характеру виконуваних завдань.

3.8.3. Не допускається нагрівати нетерmostійкий посуд (колби, склянки) на відкритому полум'ї або електроплитці, а також піддавати його різкому охолодженню після нагрівання, щоб уникнути пошкоджень.

3.8.4. Використання скляного посуду в умовах підвищеного тиску категорично заборонено, якщо цей посуд не призначений для таких навантажень та не має відповідних технічних характеристик.

3.8.5. Нагрівання рідин здійснюється виключно у відкритих ємностях або за допомогою обладнання, яке забезпечує постійний обмін із атмосферою. Такий підхід унеможливорює небезпечне підвищення тиску всередині посудин і значно знижує ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

3.8.6. При перенесенні посуду з гарячими рідинами необхідно тримати ємність обома руками, підкладаючи рушник під дно для безпеки.

3.8.7. Під час закривання тонкостінного посуду пробкою слід тримати ємність за верхню частину горлечка, захищаючи руки рушником.

3.9. Вимоги безпеки під час роботи з легкозаймистими та горючими рідинами (ЛЗР і ГР)

3.9.1. Роботи з легкозаймистими та горючими рідинами дозволяється виконувати виключно у витяжних шафах із ввімкненою вентиляцією. Кількість таких рідин на робочому місці повинна бути зведена до мінімально необхідного обсягу, а всі нагрівальні прилади мають бути заздалегідь вимкнені.

3.9.2. Нагрівати або розганяти невеликі об'єми горючих рідин дозволяється тільки на водяній бані або за допомогою закритих електроплит.

3.9.3. Для перенесення ЛЗР і ГР слід використовувати щільно закриті ємності, поміщені у металеві контейнери, обладнані ручками.

3.9.4. Зберігати легкозаймисті та горючі рідини потрібно в товстостінних скляних ємностях, що знаходяться у металевих ящиках із внутрішньою поверхнею, викладеною негорючими матеріалами. Запас рідин не повинен перевищувати обсяг, необхідний для одноденного використання.

3.9.5. У разі проливання легкозаймистих рідин необхідно одразу засипати забруднене місце піском, після чого зібрати його за допомогою

дерев'яної лопати або совка та помістити у спеціально призначений контейнер для подальшої утилізації.

3.9.6. Легкозаймісті рідини допускається нагрівати лише в об'ємах від 0,2 до 0,5 літра. Під нагрівальний прилад обов'язково встановлюється спеціальна кювета для захисту від можливого витікання.

3.9.7. Нагрівання ЛЗР здійснюється виключно у пристроях, які забезпечують повне конденсація утворених парів.

3.9.8. Посуд, який використовувався під час роботи з легкозаймістими рідинами, слід одразу після завершення операцій ретельно очистити, промивши його гарячою водою, щоб забезпечити безпеку та уникнути залишків речовин.

3.10. Вимоги безпеки під час роботи з агресивними та отруйними речовинами

3.10.1. Для набору їдких і токсичних речовин у піпетку використовуються тільки гумові груші або дозатори. Використання рота для засмоктування категорично заборонено.

3.10.2. Під час роботи з їдкими речовинами необхідно використовувати захисні рукавички, фартух і спеціальні окуляри для захисту очей.

3.10.3. Зберігання бутлів з кислотами допускається тільки у металевих контейнерах із негорючим покриттям. Перенесення та транспортування бутлів слід виконувати у присутності двох осіб.

3.10.4. Переливання агресивних речовин із великих ємностей виконується через сифон у витяжній шафі у присутності не менше двох працівників.

3.10.5. Під час приготування кислотних розчинів кислоту необхідно доливати у воду тонкою цівкою при постійному перемішуванні. Вливати воду в кислоту суворо заборонено.

3.10.6. Великі шматки лугів перед подрібненням слід накривати тканиною, щоб уникнути розлітання частинок. Розчинення твердих лугів

виконується поступовим додаванням у воду при постійному перемішуванні з використанням щипців.

3.11. Вимоги до безпечної роботи з вакуумними системами

3.11.1. Перед початком виконання будь-яких робіт слід ретельно перевірити герметичність усіх з'єднань і переконатися у справності всіх компонентів вакуумної системи.

3.11.2. Скляні ємності з тріщинами або іншими пошкодженнями заборонено використовувати у вакуумних системах.

3.11.3. Використовувати лише скляний посуд, який має відповідне маркування та призначений для роботи у вакуумі.

3.11.4. Для захисту від можливого розриву вакуумного обладнання застосовуються екрани із дротової сітки, органічного скла або спеціальні захисні кожухи.

3.11.5. Перед нагріванням чи охолодженням частин вакуумної установки необхідно створити необхідний рівень розрядження, щоб уникнути різких перепадів тиску.

3.11.6. Забороняється використовувати відкритий вогонь для нагрівання скляних елементів або застосовувати криогенні рідини, такі як рідкий кисень чи азот, для охолодження, оскільки це може пошкодити обладнання.

3.11.7. Для перегонки вакуумом слід використовувати лише круглodonні колби та посудини, що забезпечують рівномірний розподіл навантаження.

3.11.8. Виконання будь-яких робіт із вакуумними системами допускається виключно після попереднього проходження спеціалізованого інструктажу та відповідного навчання, яке забезпечує опанування необхідних навичок і знань.

3.12. Електробезпека в лабораторії

3.12.1. Виконання робіт дозволено лише з технічно справним електрообладнанням. У разі виявлення несправностей у рубильниках,

розетках, ізоляції чи інших пристроях, необхідно негайно звернутися до чергового електрика.

3.12.2. Використовуйте переносні лампи з напругою не більше 36 В у сухих приміщеннях і до 12 В у зонах із підвищеним ризиком ураження електрострумом.

3.12.3. У разі аварійного відключення електроенергії потрібно знеструмити всі електроприлади до відновлення живлення.

3.15. Правила безпеки під час роботи у витяжній шафі

3.15.1. Перед початком роботи обов'язково перевірте наявність тяги у витяжній шафі для забезпечення належної вентиляції.

3.15.2. Під час роботи закривайте всі відділення шафи, окрім робочої зони. Рівень стулки опустіть нижче обличчя, але не менше ніж на 0,4 м.

3.16. Зберігання реактивів і робота з пожежонебезпечними матеріалами

3.16.1. У лабораторії зберігайте легкозаймисті рідини в кількості, яка не перевищує добової потреби.

3.16.2. Реактиви повинні зберігатися відповідно до правил пожежної безпеки у спеціально обладнаних місцях.

3.16.3. Роботи, що супроводжуються виділенням вибухонебезпечних парів чи газів, виконуються виключно у витяжній шафі з працюючою вентиляцією.

3.16.4. Для обробки підлог і столів забороняється використовувати бензин, гас чи інші органічні розчинники; застосовуйте безпечні миючі засоби.

3.16.5. Використане промаслене ганчір'я слід збирати в металеві контейнери з герметичними кришками та утилізувати наприкінці робочого дня.

3.16.6. Сушіння спецодягу, хімічних реактивів або інших горючих матеріалів дозволяється тільки у спеціально призначеному обладнанні.

3.16.7. Перевірка газових витоків проводиться виключно за допомогою мильної емульсії.

3.16.8. Паління дозволяється лише у спеціально визначених місцях.

3.16.9. У разі виявлення несправностей у засобах колективного захисту або обладнанні негайно припиніть роботу та повідомте керівника. Роботу можна відновити тільки після отримання дозволу.

3.24. Дії у разі нещасного випадку

3.24.1. У разі інциденту свідок або постраждалий зобов'язаний негайно повідомити керівника та вжити заходів для надання першої допомоги.

3.24.2. До прибуття комісії необхідно зберегти обстановку на місці події, якщо це не становить загрози для інших людей.

4. Вимоги безпеки після завершення роботи

4.1. Вимкніть обладнання, електроприлади, а також закрийте подачу води й електроживлення.

4.2. Перемістіть усі легкозаймисті речовини до місць зберігання.

4.3. Приведіть робоче місце до належного стану, організуйте всі предмети на своїх місцях і передайте ключі у спеціально відведений для цього пункт.

4.4. Зніміть спецодяг і засоби індивідуального захисту, очистіть їх та підготуйте до наступного використання.

4.5. Вимийте руки й обличчя з милом.

4.6. У разі виявлення будь-яких дефектів або несправностей у роботі обладнання чи захисних засобів необхідно негайно повідомити про це відповідальну особу або керівника.

5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.1. До аварійних ситуацій належать:

- Розгерметизація трубопроводів, обладнання або тари з викидом небезпечних речовин.
- Загоряння обладнання чи легкозаймистих речовин.
- Відключення електроенергії, обрив проводів або коротке замикання.



- 5.2. У разі виникнення аварійної ситуації необхідно негайно припинити виконання робіт і вжити заходів для недопущення сторонніх осіб до небезпечної зони.

5.3. Негайно повідомте про ситуацію керівника.

5.4. У разі розливу ЛЗР:

- Знеструмте обладнання.
- Засипте місце розливу піском, зберіть його дерев'яною лопатою та утилізуйте у спеціально відведеному місці.

5.5. У разі займання ЛЗР:

- Використовуйте пісок або порошкові вогнегасники для гасіння вогню.
- Вимкніть вентиляцію, нагрівальні прилади та пальники.
- Винесіть із приміщення ємності з легкозаймистими речовинами [81].

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання дослідження було проведено комплексну оцінку стресового впливу техногенного навантаження на агробіогенні системи Дніпропетровської області. Встановлено, що основними факторами деградації екосистем є накопичення важких металів, таких як кадмій, цинк, нікель та хром, які негативно впливають на фізіологічні процеси рослин, їхню продуктивність і якість урожаю.

Дослідження підтвердили, що підвищена концентрація важких металів у ґрунтах зумовлює порушення метаболізму рослин, зокрема фотосинтетичної активності, обміну речовин та водного балансу. Найбільш токсичним виявився кадмій, який спричиняє окислювальний стрес і пошкодження клітинних структур. Водночас цинк, нікель і хром також виявляють значний вплив на зниження врожайності сільськогосподарських культур, що підтверджує необхідність контролю за їх вмістом у ґрунтах.

Результати роботи дозволили оцінити ступінь впливу техногенного забруднення на різні агробіогенні системи регіону та виявити території з найбільшим рівнем ризику. Запропоновані методи адаптації агроєкосистем до техногенного навантаження, зокрема використання добрив для зменшення токсичності металів, сприяють підвищенню стійкості рослин та покращенню екологічної безпеки агровиробництва.

Отримані дані можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо раціонального використання земельних ресурсів, а також у програмах моніторингу та зниження техногенного впливу на сільськогосподарські угіддя. Таким чином, проведене дослідження має практичну цінність і сприяє вирішенню актуальних екологічних проблем регіону.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. □ Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace Elements in Soils and Plants. – 4th ed. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. – 548 p.
2. □ Федорович І.М., Коваленко Л.В. Мідь як фактор забруднення ґрунтів // Агрономічний вісник. – 2020. – №12. – С. 45–49.
3. □ Bhardwaj P., Sharma R., Sharma S. Toxic effects of heavy metals on plants: An overview // Environmental Chemistry Letters. – 2018. – Vol. 16(2). – P. 1139–1156.
4. □ Petrov A., Gorlova S. Impact of cadmium on plant metabolism and photosynthesis // Plant 4. Stress Responses. – 2018. – Vol. 2. – P. 87–92.
5. □ Петрова О.М., Іващенко Н.В. Вплив кадмію на продуктивність сільськогосподарських культур // Журнал екологічних досліджень. – 2019. – №8. – С. 78–83.
6. □ Шевченко О.О., Рябчук В.М. Токсичний вплив свинцю на сільськогосподарські культури // Агроекологія. – 2019. – №6. – С. 34–40.
7. □ Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants. – 3rd ed. – London: Academic Press, 2012. – 651 p.
8. □ Brown P.H., Bellaloui N., Wimmer M.A., et al. Boron in plant biology // Plant Biology. – 2002. – Vol. 4(2). – P. 205–223.
9. □ Gupta U.C. Boron and its Role in Crop Production. – Boca Raton, FL: CRC Press, 1993. – 224 p.
10. □ Shorrocks V.M. Boron: An essential element for crop growth // Journal of Plant Nutrition. – 1997. – Vol. 20(8). – P. 1227–1239.
11. □ Dell B., Huang L. Physiological response of plants to boron // Plant and Soil. – 1997. – Vol. 193. – P. 103–120.
12. Sharma P., Dietz K.J. The Role of Reactive Oxygen Species in Tolerance to Abiotic Stress // Plant Physiology. – 2009. – Vol. 150(4). – P. 680–690.

13. Choudhury S., Panda B.B. Cadmium and copper-induced oxidative stress in plants: A review // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2005. – Vol. 43(7). – P. 693–702.
14. Mousavi S.R., Asgari H.R., Sadeghzadeh B. The impact of heavy metals on the photosynthetic activity in plants // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2011. – Vol. 18(9). – P. 1532–1541.
15. Yadav S.K. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance // *South African Journal of Botany*. – 2010. – Vol. 76(2). – P. 167–179.
16. □ Prasad M.N.V. Cadmium toxicity and tolerance in plants // *Plant and Soil*. – 2004. – Vol. 255(1–2). – P. 191–199.
17. □ Foy C.D., Chaney R.L., White M.C. The physiology of metal toxicity in plants // *Annual Review of Plant Physiology*. – 1978. – Vol. 29(1). – P. 511–566.
18. □ Das P., Gupta S., Sinha S., et al. Effect of cadmium on nitrogen metabolism in plants // *Plant and Soil*. – 1997. – Vol. 189(2). – P. 343–347.
19. □ Zhang L., Chen Q., Zhang L., et al. Genotoxic effects of cadmium and lead on plants: The formation of micronuclei and other chromosomal abnormalities // *Mutation Research*. – 2009. – Vol. 674(1). – P. 8–15.
20. □ Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // *Biochimica et Biophysica Acta*. – 2006. – Vol. 1763(7). – P. 594–603.
21. Hall J.L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // *Journal of Experimental Botany*. – 2002. – Vol. 53(366). – P. 1–11.
22. □ Cobbett C.S., Goldsbrough P.B. Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification // *Plant Cell*. – 2002. – Vol. 14(3). – P. 253–270.
23. □ Gill S.S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidants in the responses of plants to abiotic stresses // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2010. – Vol. 48(12). – P. 909–930.

24. □ Noctor G., Foyer C.H. Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control // *Annual Review of Plant Biology*. – 1998. – Vol. 49. – P. 249–279.
25. Wang W., Vinocur B., Shoseyov O., Altman A. Role of heat-shock proteins in protecting plants from abiotic stresses // *Trends in Plant Science*. – 2004. – Vol. 9(5). – P. 244–252.
26. Kosová K., Vítámvás P., Prášil I.T., Renaut J. Plant proteome changes under abiotic stress: Contribution of proteomics studies to understanding plant stress response // *Journal of Proteomics*. – 2011. – Vol. 74(8). – P. 1301–1322.
27. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // *Trends in Plant Science*. – 2002. – Vol. 7(9). – P. 405–410.
28. Gupta S.C., Sharma A., Mishra M., Mishra R.K., Chowdhuri D.K. Heat shock proteins in toxicology: How close and how far? // *Life Sciences*. – 2013. – Vol. 86(11–12). – P. 377–384.
29. Hasanuzzaman M., Nahar K., Alam M.M., Fujita M. Role of stress proteins in plants under heavy metal stress: Mechanisms and applications // Springer, 2013. – Vol. 8(3). – P. 181–203.
30. Kültz D. Molecular and evolutionary basis of the cellular stress response // *Annual Review of Physiology*. – 2005. – Vol. 67. – P. 225–257.
31. Ernst W.H.O. Metal tolerance in plants: Ecological aspects // *The Science of the Total Environment*. – 2000. – Vol. 200(1). – P. 1–8.
32. □ Huang, J.W., Chen, J., Berti, W.R., Cunningham, S.D. Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction // *Environmental Science & Technology*. – 2008. – Vol. 31(3). – P. 800–805.
33. □ Schützendübel, A., Polle, A. Plant responses to abiotic stresses: Heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization // *Journal of Experimental Botany*. – 2001. – Vol. 53(372). – P. 1351–1365.

34. Rucińska-Sobkowiak R. Plant responses to stressful environments: The role of reactive oxygen species, antioxidative enzymes and phytochelatins // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2016. – Vol. 105. – P. 141–151.
35. Shahid M., Dumat C., Khalid S., Niazi N.K., Antunes P.M. Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2014. – Vol. 226. – P. 51–88.
36. Baker A.J.M., Whiting S.N. In search of the Holy Grail – a further step in understanding metal hyperaccumulation? // *New Phytologist*. – 2002. – Vol. 155(1). – P. 1–7.
37. Zhu J.K. Plant salt tolerance // *Trends in Plant Science*. – 2001. – Vol. 6(2). – P. 66–71.
38. □ Sharma P., Dubey R.S. Lead toxicity in plants: A review // *Journal of Plant Physiology*. – 2016. – Vol. 181. – P. 45–53.
39. □ Li Y., Wang Z., Zeng Q., et al. Copper-induced oxidative stress and its effect on the photosynthetic apparatus in sunflower plants // *Ecotoxicology*. – 2014. – Vol. 23(5). – P. 799–808.
40. □ Hernandez A.F., D'Andrea E. Organophosphates exposure and human health effects // *Journal of Environmental Research*. – 2018. – Vol. 166. – P. 367–385.
41. □ Miller G.A., Bassett B., Trevors J.T. Effects of nitrogen fertilizer on nitrate accumulation and nitrous oxide emission // *Environmental Science*. – 2017. – Vol. 14(4). – P. 210–218
42. □ Singh J., Singh R., Kumar P. Impact of cadmium on soil microbiota // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2015. – Vol. 85. – P. 122–130.
43. □ Fomina M., Hillier S., Gadd G.M. Metal interactions with fungal biomass: Impact on mycorrhizal activity // *Fungal Ecology*. – 2017. – Vol. 28. – P. 49–61.
44. □ Foyer C.H., Ruban A.V., Noctor G. Antioxidant signaling and ROS in plants // *Current Opinion in Plant Biology*. – 2019. – Vol. 47. – P. 1–6.

45. □ Liu Y., Wen Y., Lu W., et al. Synergistic effects of heavy metals and pesticides on crop metabolism // *Environmental Pollution*. – 2020. – Vol. 261. – P. 114–120.
46. □ Khan S., Rehman S., Zubair A., et al. Heavy metal impact on nutritional quality of crops // *Journal of Environmental Sciences*. – 2017. – Vol. 55. – P. 204–210.
47. □ Smith R., Gadd G.M., Zhao F.J. Phytoremediation of heavy metals using hyperaccumulator plants // *Trends in Biotechnology*. – 2018. – Vol. 36(5). – P. 354–367.
48. Smith, R., Gadd, G.M., Zhao, F.J. Phytoremediation of heavy metals using hyperaccumulator plants // *Trends in Biotechnology*. – 2019. – Vol. 36(5). – P. 354–367.
49. Lee, S.H., Kim, H.J. The impact of potassium fertilizers on plant stress tolerance and carbohydrate metabolism // *Plant Science Journal*. – 2021. – Vol. 39(4). – P. 205–213.
50. Thomas, J., Anderson, P., Miller, C. The role of NPK fertilizers in sustainable agriculture: Composition and effects on plant growth // *Agricultural Research Journal*. – 2022. – Vol. 58(3). – P. 145–152.
51. Jackson, P., Carter, L., Thompson, R. The efficiency of complex fertilizers in large-scale agriculture: Application strategies and benefits // *Journal of Soil and Plant Nutrition*. – 2020. – Vol. 46(2). – P. 134–142.
52. Wang, H., Chen, J. The role of boron in improving oilseed crop yield and quality // *Journal of Plant Nutrition*. – 2021. – Vol. 44(2). – P. 145–156.
53. Xie, W., Chen, T., Liu, J. Effect of ammonium-based fertilizers on cadmium mobility and uptake in soil-plant systems // *Environmental Pollution*. – 2016. – Vol. 215. – P. 258–265.
54. Gupta, U.C., Gupta, S.C. Phosphorus in soils and its role in reducing heavy metal availability to plants // *Journal of Environmental Science and Health*. – 1998. – Vol. 33(3). – P. 245–262.

55. Gomez-Eyles, J.L., Beesley, L., Moreno-Jimenez, E., et al. The impact of biochar on the mobility and bioavailability of heavy metals in contaminated soils // *Environmental Pollution*. – 2013. – Vol. 228. – P. 435–445.

56. Kravchenko, A., Robertson, G.P., Snapp, S.S., et al. Competitive interactions between boron and cadmium reduce cadmium uptake in sunflower and canola // *Journal of Soil and Plant Interactions*. – 2021. – Vol. 47(3). – P. 215–223. – URL: <https://lter.kbs.msu.edu/citations/3958> (дата звернення: 6 грудня 2024 року).

57. Alloway, B.J. Cadmium in soils and plants: the impact of phosphate fertilizers on cadmium accumulation in agricultural soils // *Cadmium in Soils and Plants*. – London: Springer, 1995. – P. 113–121.

58. Jones, D.L., Darrah, P.R., Roose, T. Impact of elevated copper levels on barley (*Hordeum vulgare*) productivity and physiological processes // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. – 2015. – Vol. 61(3). – P. 273–283. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/284722284\\_Jones\\_et\\_al\\_2015](https://www.researchgate.net/publication/284722284_Jones_et_al_2015) (дата звернення: 6 грудня 2024 року).

59. Gupta D. K., Sandalio L. M. (Eds.). *Metal Toxicity in Plants: Perception, Signaling and Remediation*. – Berlin: Springer-Verlag, 2012. – 299 p. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/292255179\\_Metal\\_Toxicity\\_in\\_Plants\\_Perception\\_Signaling\\_and\\_Remediation](https://www.researchgate.net/publication/292255179_Metal_Toxicity_in_Plants_Perception_Signaling_and_Remediation) (дата звернення: 6 грудня 2024 року).

60. Географія Дніпропетровської області // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Географія\\_Дніпропетровської\\_області](https://uk.wikipedia.org/wiki/Географія_Дніпропетровської_області) (дата звернення: 6 грудня 2024 року).

61. Геологічна будова і рельєф // Фізико-географічний опис Дніпропетровської області. – URL: [https://vuzlit.com/1081959/geologichna\\_budova\\_relyef](https://vuzlit.com/1081959/geologichna_budova_relyef) (дата звернення: 6 грудня 2024 року).



62. Клімат Дніпропетровської області // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Клімат\\_Дніпропетровської\\_області](https://uk.wikipedia.org/wiki/Клімат_Дніпропетровської_області) (дата звернення: 6 грудня 2024 року).
63. Ґрунтовий покрив Дніпропетровської області // Геотоп. – URL: [https://geotop.com.ua/geologiya-ychastka\\_ua.php?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiA3sq6BhD2ARIsAJ8MRwUTxKhtVzuBbrkD8WInLWXXTe3wl9kyXSyAlmnD2qvoOHvH1dpuGkMaAj5UEALw\\_wcB](https://geotop.com.ua/geologiya-ychastka_ua.php?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA3sq6BhD2ARIsAJ8MRwUTxKhtVzuBbrkD8WInLWXXTe3wl9kyXSyAlmnD2qvoOHvH1dpuGkMaAj5UEALw_wcB) (дата звернення: 6 грудня 2024 року).
64. Екологічна ситуація в Дніпропетровській області: Доповідь за 2019 рік // Дніпропетровська обласна державна адміністрація. – URL: [https://adm.dp.gov.ua/storage/app/media/uploaded-files/region\\_dopov\\_ecology\\_2019.pdf](https://adm.dp.gov.ua/storage/app/media/uploaded-files/region_dopov_ecology_2019.pdf) (дата звернення: 6 грудня 2024 року).
65. Кривому Рогу загрожує екологічна катастрофа через отруйні шахтні води // ЕкоПолітика. – URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/krivomu-rogu-zagrozhue-ekologichna-katastrofa-cherez-otrujni-shahтни-vodi/> (дата звернення: 6 грудня 2024 року).
66. Металургійна промисловість України: сучасний стан та перспективи розвитку / [Електронний ресурс] // Інститут металургії НАН України. – Режим доступу: [<https://metallurgy.ua>] (дата звернення: 06.12.2024).
67. Екологічний моніторинг забруднення важкими металами в Україні / О.В. Іваненко, М.С. Петренко. – Київ: Наукова думка, 2020. – 356 с.
68. Промислові відходи та їх вплив на навколишнє середовище / Під ред. В.М. Ковальчука. – Харків: Видавництво ХНУ, 2018. – 412 с.
69. Стан ґрунтів у промислових регіонах України: моніторинг і перспективи відновлення / О.М. Сидоренко, В.П. Кравченко, Л.Г. Ткаченко // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2022. – № 3. – С. 112–120.
70. Рекультивация забруднених земель: сучасні методи та технології / В.П. Кравченко, О.М. Сидоренко, Н.В. Тарасенко // Журнал ґрунтознавства. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 89–98.

71. Сталій розвиток агросектору: інноваційні технології обробітку ґрунту / І.В. Петренко, М.С. Гончарук // Агроекологічний журнал. – 2021. – № 4. – С. 34–42.
72. Особливості вирощування сої в умовах техногенного навантаження / О.В. Ткаченко, І.М. Сидоренко // Вісник аграрної науки. – 2020. – № 7. – С. 45–52.
73. Вплив важких металів на фізіолого-біохімічні процеси у кукурудзі / І.В. Ковальчук, М.С. Пилипенко // Журнал аграрної екології. – 2021. – Т. 15, № 2. – С. 98–104.
74. Вплив важких металів на ріст та продуктивність гороху (*Pisum sativum*) / О.В. Петренко, Л.М. Ткаченко // Фізіологія рослин і генетика. – 2020. – Т. 52, № 1. – С. 63–70.
75. Вплив важких металів на ріст і розвиток пшениці / І.М. Гончар, О.С. Тарасенко // Агроекологічний журнал. – 2021. – № 6. – С. 45–51.
76. Вплив важких металів на продуктивність ріпаку (*Brassica napus*) / О.В. Кравчук, Н.М. Сидоренко // Журнал агроекологічних досліджень. – 2021. – № 5. – С. 78–84.
77. Особливості вирощування соняшнику на забруднених ґрунтах / І.В. Мельник, О.С. Гончарук // Агроекологічний вісник. – 2022. – № 4. – С. 92–98.
78. Кадмієвий стрес у рослин: токсичність та механізми стійкості / Т.В. Левенець, О.Є. Смірнов, Н.Ю. Таран, Л.М. Михальська, В.В. Швартау // Фізіологія рослин і генетика. – 2022. – Т. 54, № 4. – С. 279–310.
79. Вплив іонів кадмію, нікелю, хрому та цинку на стійкість гібридів кукурудзи на початку ювенільного етапу розвитку рослин / О.В. Шемет, О.В. Винниченко // Екологічна безпека та природокористування. – 2023. – № 6. – С. 16–22
80. Вплив важких металів на початкові етапи розвитку сільськогосподарських культур / О.В. Мельник, І.В. Кравченко // Фізіологія рослин і генетика. – 2022. – Т. 54, № 3. – С. 229–240

81. Закон України "Про охорону праці": Закон від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ. – Редакція від 01.01.2023. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 06.12.2024).