

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Навчально-науковий інститут природокористування
Кафедра екології та технологій захисту навколишнього середовища

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

студентки Сушко Злати Леонідівни
(ПІБ)
академічної групи 101М-22-1
(шифр)
спеціальності 101 «Екологія»
(код і назва спеціальності)
за освітньо-професійною програмою – «Екологія»
на тему Дослідження впливу цинку на ростові показники рослин-
фіторемедіантів
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
роботи	Ковров О.С.		
розділів:			
Теоретичного	Ковров О.С.		
Дослідного	Ковров О.С.		
Технологічного	Ковров О.С.		
Охорони праці	Столбченко О.В.		
Економічного	Павличенко А.В.		
Рецензент			
Нормоконтролер	Грунтова В.Ю.		

Дніпро
2023

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
« Дніпровська політехніка »

ЗАТВЕРДЖЕНО:
 завідувачка кафедри ЕТЗНС
Борисовська О.О.
 « 9 » ЖОВТНЯ 2023 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

студентці Сушко З.Л. академічної групи 101М-22-1
 (прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності – 101 «Екологія»

за освітньо-професійною програмою – Екологія
 (офіційна назва)

на тему «Дослідження впливу цинку на ростові показники рослин-фіторемедіантів», затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 17.10.2023 № 1265-с.

Розділ	Зміст	Термін виконання
Теоретичний	Проаналізувати існуючі технології та принципи застосування фіторекультивациі для покращення ґрунтів забрудненими важкими металами. Окреслити властивості та функції рослин-фіторемедіантів.	09.10.2023- 29.10.2023
Дослідницький	Розрахувати на основі даних експерименту «ростового тесту» ростові показники рослин-фіторемедіантів від концентрації цинку в ґрунті та оцінити фітотоксичний ефект цинку.	30.10.2023- 12.11.2023
Технологічний	Розробити технологію фіторемедіації та фітомайнінгу територій забруднених цинком. Обґрунтувати необхідність цих заходів для покращення стану техногенних ґрунтів.	13.11.2023- 26.11.2023
Охорона праці	Розробити заходи з проти пожежної охорони лабораторії, територій та оцінити шкідливість цинку на стан довкілля та здоров'я населення.	27.11.2023- 03.12.2023
Економічний	Розрахувати витрати на фіторемедіацію та зробити еколого-економічну оцінку.	04.12.2023- 10.12.2023

Завдання видано

Ковров О.С.
 (прізвище, ініціали)

Дата видачі

09.10.2023р.

Дата подання до екзаменаційної комісії

21 грудня 2023р.

Прийнято до виконання

Сушко З.Л.
 (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 116 с., 25 рис., 28 табл., 60 літературних джерел, 5 додатків.

Вступ містить аналіз актуальності застосування цілей фітореMediaції для техногенно забруднених земель важкими металами, також сформульовані мета, об'єкт та задачі кваліфікаційної роботи.

Теоретичний розділ містить характеристику цинку. Наведено критичний аналіз та основні принципи шести методів фітореMediaції. Оцінено доцільність рекультивації техногенно забруднених територій за допомогою рослин-фітореMediaнтів.

У дослідницькому розділі дано обґрунтування методу біоіндикації. Наведено результати ростового тесту та розрахунків ростових показників рослин-фітореMediaнтів та оцінено фітотоксичний ефект від концентрацій цинку. Надано характеристику досліджуваних рослин-фітореMediaнтів.

У технологічному розділі розроблено технологію фіторекультивації та фітомайнінгу для територій забруднених цинком та визначено склад рослинного покриву з використанням толерантних до цинку видів рослин-фітореMediaнтів. Розраховано та дана оцінка кількості потенційної біомаси Зернового сорго для Дніпропетровської області.

В розділі «Охорона праці» оцінені шкідливі фактори впливу цинку на стан довкілля та здоров'я людини та проаналізовано протипожежні заходи для степових територій і лабораторій.

Економічний розділ містить розрахунок витрат для фітореMediaції земель забруднених важкими металами, а також визначення еколого-економічного ефекту від застосування даної технології.

У висновках наведені основні результати виконаної роботи.

ЦИНК, ОЦІНКА ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ, БІОТЕСТУВАННЯ, ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ЗЕМЕЛЬ, ФІТОМАЙНІНГ

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ	9
1.1 Проблема забруднення ґрунтів важкими металами	9
1.2 Характеристика цинку	11
1.3 Поняття рекультивація, ремедіація та заповідання відпрацьованих земель	15
1.4 Основні принципи, механізми, переваги та недоліки фіторемедіації	18
1.5 Методи фіторемедіації	20
1.6 Приклади фіторемедіації в світі та Україні	27
1.7 Піонерні угруповання рослин-фіторемедіантів	30
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОСЛИН-ФІТОРЕМЕДІАНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ БІОТЕСТУВАННЯ	35
2.1 Біоіндикація – вид екологічного моніторингу	35
2.2 Характеристика фіторемедіаційних властивостей обраних рослин фіторемедіантів	39
2.3 Характеристика цинкового купоросу	43
2.4 Ростовий тест рослин-фіторемедіантів	44
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ТА ФІТОМАЙНІНГУ ДЛЯ ТЕРИТОРІЙ ЗАБРУДНЕНИХ ЦИНКОМ ...	62
3.1 Фіторемедіація територій забруднених цинком	62
3.2 Розрахунок потенційної біомаси Зернового сорго для фіторемедіації техногенних територій	71
3.3 Фітомайнінг цинку	74
3.4 Зернове сорго – енергетична культура	76

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ШКІДЛИВОСТІ ЦИНКУ ДЛЯ ЛЮДИНИ І ДОВКІЛЛЯ ТА ПРОТИПОЖЕЖНІ ЗАХОДИ СТЕПОВИХ ПОЖЕЖ	79
4.1 Шкідливий вплив цинку та важких металів на здоров'я людини і довкілля	79
4.2 Оцінка ризику захворювання при контакті з цинком та заходи зниження ризику	81
4.3 Характеристика, причини виникнення, порядок протипожежних дій та попередження степових пожежах	83
4.4 Протипожежний захист при роботі в лабораторії.....	86
РОЗДІЛ 5. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ЗАБРУДНЕНИХ ЗЕМЕЛЬ	87
5.1 Еколого-економічне стимулювання в галузі раціонального використання земель	87
5.2 Розрахунок витрат на фіторе mediaцію	88
5.3 Еколого-економічна оцінка ефективності фіторе mediaції	91
ВИСНОВОК	94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	96
ДОДАТОК А. Копії публікацій	102
ДОДАТОК Б. Відгук керівника кваліфікаційної роботи	112
ДОДАТОК В. Зовнішня рецензія	113
ДОДАТОК Г. Довідка про присутність запозичень (плагіату)	114
ДОДАТОК Д. Відгуки керівника розділу з охорони праці, економічного розділу та нормоконтролера	116

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасному світі важкі метали є одними з найбільших токсичних та найпоширеніших антропогенних забруднювачів довкілля, а зокрема ґрунтового покриву. Вони присутні в усіх рівнях екологічної піраміди. Через ґрунтовий покрив та рослини в організм людини потрапляє близько 40-80 % важких металів, коли через воду та повітря – 20-40 %. Через накопичення в організмі людини, вони порушують обмін речовин, нормальну роботу систем і органів, провокують хвороби та навіть викликають рак і мутації. Хоча цинк є найважливішим та другим за кількістю мікроелементом в організмі людини, його надлишок є шкідливим та небезпечним. Рослини-фіторемедіанти використовують для іммобілізації, поглинання та накопичення важких металів в біомасі, що є найбільш перспективним вирішенням даної проблеми та необхідним для збереження природного стану екосистем.. Застосування методів фіторекультивуації для забруднених територій допоможе очистити та відновити землі для подальшого використання, що є однією з найбільш актуальних задач сьогодення.

Мета роботи та завдання кваліфікаційної роботи. Метою роботи є дослідження прикладів рекультивації земель забруднених важкими металами, визначення впливу цинку на ростові-показники рослин-фіторемедіантів та розробка методу фіторекультивуації для територій забрудненої цинком на основі властивостей рослин-фіторемедіантів.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі задачі:

1. Аналіз існуючих сучасних технологій фіторемедіації та принципів їх застосування для техногенно забруднених територій. Оцінити властивості та функції рослин-фіторемедіантів, надати характеристику цинку.

2. Дослідити методи проведення біоіндикаційних досліджень та проаналізувати фітремедіаційні властивості рослин-фіторемедіантів обраних для експерименту. Виконати експеримент (ростовий тест) з дослідження впливу цинку на ростові показники рослин-фіторемедіантів, обробити

отриманні результати експерименту і розрахувати ростові показники та фітотоксичний ефект рослин-фіторемедіантів від концентрацій цинку.

3. Запропонувати технологію фіторемедіації та фітомайнінгу для територій забруднених цинком, а також склад рослин-фіторемедіантів для ефективної фітоестракції цинку з ґрунту. Розрахувати і оцінити потенційну кількість біомаси для Дніпропетровської області. Визначено переваги використання енергетичних культур для фіторемедіації.

4. Оцінити шкідливі фактори впливу цинку на стан довкілля та здоров'я людини та розробити протипожежні заходи на відкритих територіях і лабораторіях.

5. Розрахувати витрати на фіторемедіацію та оцінити еколого-економічну ефективність впровадження даної технології.

Апробація результатів магістерської роботи.

Зроблено доповідь на XI міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: Наука та інновації» (Дніпро, 24 листопада 2023 р.)

Публікація: Сушко З.Л. ст. гр. 101м-22-1, Ковров О.С. Розрахунок потенційної біомаси Зернового сорго для фіторемедіації земель забруднених цинком // XI міжнародна науково-технічна конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: Наука та інновації» Секція 8: «Сучасні питання екології та захисту довкілля» (Дніпро, 24 листопада 2023 р.) НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. (Додаток А).

Публікація: Сушко З.Л. ст. гр. 101м-22-1, Ковров О.С. Вплив цинку на ростові показники рослин-фіторемедіантів // «IV Міжнародна науково-практична конференція «ЕКОЛОГІЯ. ДОВКІЛЛЯ. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ» Секція 2: «Технології захисту довкілля» (Полтава, 7-8 грудня 2023 р.) Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. (Додаток А).

Публікація: Сушко З.Л. ст. гр. 101м-22-1, Ковров О.С. Потенціал використання методів фіторемедіації для очищення забруднених ґрунтів //

«Міжнародний форум: безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада» Секція 5: «Екоцид території України як наслідок воєнної агресії росії» (Дніпро, 12 жовтня 2023 р.) НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. (Додаток А).

Публікація: Сушко З.Л. ст. гр. 101м-22-1, Ковров О.С., Кострицька С.І. Green Roofs as an Innovative Trend of Urban Architecture // «18 Міжнародний форум студентства і молодих вчених «Розширюючи обрії» Секція 1: «Environmental Problems and their Solutions» (Дніпро, 10-14 жовтня 2023 р.) НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. – Т 5. – С. 25-28 (Додаток А).

Об'єктом дослідження є зміна ростових показників рослин-фіторемедіантів від концентрацій цинку.

Предмет дослідження – вплив фіторекультиваційних властивостей рослин-фіторемедіантів на покращення стану навколишнього середовища та способи акумуляції цинку з ґрунтового покриву.

Практичне значення роботи полягає в дослідженні впливу цинку на рослини-фіторемедіанти для розробки технології фіторекультивації з подальшою утилізацією біомаси та біоруди, а також на обґрунтуванні фіторекультиваційних функцій рослинного покриву, що дозволяє покращити якість ґрунту та сприяє оздоровленню навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ

1.1 Проблема забруднення ґрунтів важкими металами

Стан ґрунтів регулює стійкість та важливі процеси всіх наземних екосистем Землі, під впливом техногенного забруднення бонітет ґрунтового покриву знижується, що негативно впливає на всі рівні біосфери.

Людству потрібно 1-2 роки, щоб знищити родючий ґрунтовий шар, який утворюється тисячі-мільйони років. Площа забруднених чи технічно змінених земель в світі швидко зростає та наразі складає 1,9 млрд га. Даними темпами кількість деградованих земель в світі до 2050 року сягне 90% [1].

Забруднення ґрунтів є однією з 5 найбільших проблем нашої країни. В Україні площа порушених територій ґрунтового покриву десь 15 млн га та ще 24 млн тон гумусу втрачається щорічно. Серед основних проблем – втрата гумусу, переущільнення, замулення, ерозії, забруднення важкими металами, пестицидами, радіонуклідами (цезієм, стронцієм для розпаду яких необхідно близько 300 років) та інші [2].

Також зараз наші землі потерпають від наслідків військових дій, що призводить до механічного (ущільнення, розвиток вітрової та водної ерозії, заболочення), фізичного (втрата гумусу, буденності, природної родючості) та хімічного (важкі метали, вибухові речовини, радіоактивні речовини, мастильні матеріали, сольвент) пошкодження ґрунтового шару. Кількість важких металів в ґрунтовому покриві перевищує ГДК в 3-4 рази, а на деяких ділянках в 25 разів. Рекультивація даних територій займе щонайменше десятиліття та за попередніми оцінками близько 40 млн доларів [3].

Метали – речовини, що поширені практично у всій земній корі, протягом тисячоліть людство видобуває та використовує їх для своїх потреб. Важкі метали – це група металічних елементів (перехідні метали, актанойди та деякі лактанойди), яка бере участь в кругообігу необхідних речовин в природі. Але

в великих кількостях є токсичними [4].

Важкі метали – близько 40 металів з атомною масою більшою 50, Основні: ртуть (Hg), кадмій (Cd), миш'як (As), свинець (Pb), хром (Cr), мідь (Cu), кобальт (Co), цинк (Zn), марганець (Mn), молібден (Mo). Дані важкі метали – мідь (Cu), залізо (Fe), марганець (Mn), молібден (Mo), нікель (Ni), цинк (Zn) є мікроелементами та необхідними для розвитку рослини, але в невеликих кількостях (10^{-12} - 10^{-3} %) та не перевищувати гранично допустимі концентрації (табл. 1.1) [5].

Таблиця 1.1 – ГДК важких металів в 1 кг сухого ґрунту [5]

Кадмій (Cd)	Свинець (Pb)	Мідь (Cu)	Нікель (Ni)	Цинк (Zn)	Марганець (Mn)
3,0	32,0	55,0	85,0	300,0	1 500,0
мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг	мг/кг

В 18 містах України середньорічні концентрації важких металів перевищують ГДК (1,1-11,2), серед них Дніпро, міста Донецької та Київської областей [6].

Основне середовище важких металів є ґрунти. Вони потрапляють туди у різних формах (солі розчинні/нерозчинні та оксиди) з атмосфери (дощі, вітрова ерозія), гідросфери (поверхневий стоки, підземні і підґрунтові води), а також можуть мігрувати та вторинно їх забруднювати [4].

Основні антропогенні джерела потрапляння важких металів в ґрунт:

- промисловість (енергетична, металургічна, хімічна),
- с/г (гербициди, пестициди, хімічні добрива),
- вихлопи від автомобілів.

Львівсько-Волинський гірничопромисловий регіон складає 20 териконів, які займають 1 400 га родючих ґрунтів, що зумовлює підвищені концентрації важких металів (кобальт (Co), арсен (As), нікель (Ni), цинк (Zn),

молібден (Mo), кадмій (Cd), барій (Ba), фосфор (P), плумбур (Pb) та інші) на землях навколо териконів [7].

На розповсюдження важких металів в ґрунтовому покриві впливають наступні показники:

- Дисперсний склад ґрунту
- Кислотність ґрунту
- Процес сорбції (гідроксиди, карбонати та оксиди)
- Біологічний склад ґрунту
- Внесення добрив
- Рельєф та тип ґрунту
- Міграція ґрунтовим покривом
- Властивості конкретного металу.

Вони можуть бути в обмінному, необмінному та водорозчинному станах. Очищення ґрунтового покриву від важких металів відбувається досить повільно, найгірше самоочищаються дерново-підзолисті, сірі лісові та піщані [8].

Сьогодні важкі метали присутні в усіх рівнях екологічної піраміди. Через рослини в організм людини потрапляє близько 40-80 % важких металів, коли через воду та повітря – 20-40 %. Через накопичення в організмі людини, вони порушують обмін речовин, провокувати хвороби, порушувати нормальну роботу систем та навіть викликати мутації [9].

Через збільшення антропогенного впливу негативні наслідки для довкілля стають все більшими, як за ступенем, так і за масштабом.

1.2 Характеристика цинку

Цинк (Zn) – високо-небезпечний важкий метал, атомний номер – 30, має високу біохімічну активність, рухомість та ефективність до накопичення, за поширеністю в природі займає 24 місце, кларк цинку за масою в природі

становить $8,3 \cdot 10^{-3} \%$, в ґрунтах (сухий масі) – 10-900 мг/кг (чорноземі – 46-55 мг/кг), воді – 5 мг/л, рослинах (сухий масі) – 1,2-600 мг/кг, організмі людини – 2-3 г (табл. 1.2) [10].

Таблиця 1.2 – Фізичні та хімічні властивості цинку [10]

Атомна маса	Ступінь окислення	Колір	Температур а плавлення	Температу ра кипіння	Щільніс ть
65,39 г/моль	+2	Блакитно- сірий	419,88 °С	907 °С	7,13 г/см ³

В природі цинк зустрічається в складі 143 мінералів, найчастіше в вигляді сфалериту або сульфід цинку (ZnS), смітоніт або карбонат цинку (ZnCO₃), цинкіт або оксид цинку (ZnO), ганніт (ZnAl₂O₄), та віллеміт (Zn₂S₄). Також цинк зустрічається в природі в вигляді ізотопів, за спаданням: ⁶⁴Zn, ⁶⁶Zn, ⁶⁸Zn, ⁶⁷Zn та ⁷⁰Zn [11].

Найпоширеніші сплави цинку: латунь – цинк + мідь та ЗАМАК – цинк + алюміній + мідь + магній. Цинк широко використовують в промисловості, завдяки антикорозійним властивостям [12].

Цинк – найважливіший та другий за кількістю мікроелемент в організмі людини, міститься в близько 300 ферментів, що відповідають за обмін речовин, метаболізм, нервову діяльність, смакові відчуття та інших процесах (табл. 1.3). Добова потреба дорослого організму в цинку становить 8-11 мг, для спортсменів – до 30 мг/добу. Негативний вплив цинку на організм людини відбувається при перевищенні 40 мг на день. Антагоністом цинку є мідь (більше 50 мг/день), тобто надлишок одного елемента провокує нестачу іншого, а при перевищенні цинку (150-450 мг) змінюються функції заліза. Підвищує поглинання та засвоєння цинку організмом – фосфор, кальцій, вітаміни А і Е (табл. 1.4) [13,14].

Таблиця 1.3 – Вплив цинку на організм людини [13,15,16]

Користь	Дефіцит	Надлишок
1. Підвищує імунну систему та є антиоксидантом.	1. Випадіння волосся.	1. Нудота, розлади ШКТ та інтоксикація.
2. Забезпечує роботу серцево-судинної, кровоносної системи та сприяє загоєнню ран.	2. Погіршення імунітету.	2. Підвищення температури та озноб.
3. Підтримує нервову систему.	3. Сповільнення зростання.	3. Погіршення роботи нервової системи.
4. Покращує роботу травлення.	4. Підвищена дратівливість та безсоння.	4. Погіршення функцій головного мозку.
5. Вироблення гормонів (тестостерону, інсуліну, соматотину).	5. Викликає нудоту та діарею.	5. Провокує мутації ДНК.
6. Забезпечує здоров'я шкіри, нігтів, волосся.	6. Погіршення апетиту та смаку.	
7. Відіграє важливу роль в роботі ферментів.		

Таблиця 1.4 – Біодоступність форм солей цинку в добавках [15]

Форми солей цинку	Біодоступність
Сульфат і оксид	до 48 %
Монометіонін і гліцинат	до 58 %
Глюконат	до 60 %
Ацетат, піколінат і цитрат	до 61 %

Продукти, які містять цинк: м'ясні та молочні продукти, устриці, бобові, буряк, горіхи, висівки, насіння та цільне зерно [14].

Цинк – найважливіший та найбільш поширений мікроелемент в сільськогосподарській продукції (найбільше вимагають: буряк, льон, гречка, рис, кукурудза, конюшина). Середнє значення вмісту в рослинах в межах 15-60 мг/кг сухої маси рослини, надлишок – 100-150 мг/кг, найбільше він накопичується в насінні, листках, конусах наростання, квітках та плодах (табл. 1.5). Нестача цинку зустрічається в карбонатних ґрунтах з рН 5-7, для них застосовують внесення цинковмісних добрив [17].

Таблиця 1.5 – Вплив цинку на рослини [18]

Користь	Дефіцит	Надлишок
1. Виробляє гормон (ауксин), який стимулює ріст рослини.	1. Сповільнення росту рослин та затримка цвітіння.	1. Провокує дефіцит заліза, калію, свинцю, кадмію та марганцю.
2. Регулює процеси розвитку та росту.	2. Зниження стійкості до хвороб та врожайності.	2. Зміна структури і вигляду листкової пластини та їх обпадання.
3. Входить до складу 40 ферментів, які відповідають за дихання.	3. Хлороз листових пластин та коричневі плями.	3. Нижня поверхня листків вкривається білими плямами.
4. Сприяє синтезу 2 800 білків в тканинах рослини та виробленні хлорофілу.	4. На плодах з'являються бурі плями та бородавки.	
5. Допомогає роботі АТФ.	5. Підвищена проникність мембран в кореневій системі.	
6. Збільшує стійкість до бактеріальних та грибкових хвороб.		
7. Покращує стійкість до засух та морозів.		

Рослина, що акумулює найбільше цинку 52 000 мг/кг сухої маси – талабан альпійський (*Thlaspi caerulescens*). Сімейства рослин-акумуляторів цинку: гвоздичні (*Caryophyllaceae*) – до 1 500-4 900 мг/кг сухої маси, капустяні (*Brassicaceae*) – до 5 400-13 630 мг/кг, злакові (*Violaceae*) та кермекові (*Plumbaginaceae*) [4].

1.3 Поняття рекультивація, ремедіація та заповідання відпрацьованих земель

Рекультивація, ремедіація та заповідання відпрацьованих земель — основні процеси відновлення відпрацьованих земель та створення другорядних біогеоценозів.

Рекультивація земель – це сукупність робіт, направлених на регенерації порушених ґрунтів та покращення природного середовища.

В наукові джерела Канади та США пропонують три поняття терміну «рекультивація»: *restoration, reclamation, rehabilitation*.

Restoration – відновлення порушеної поверхні землі до початкового стану.

Reclamation – відновлення порушеної поверхні землі за допомогою біологічних методів (створення умов для існування організму, що мешкали на даній території до втручання), або використання даної місцевості в інших цілях.

Rehabilitation – відновлення порушеної поверхні землі в господарстві без шкоди для довкілля, або використання даної місцевості в абсолютно відмінних цілях.

Також розрізняють такі терміни рекультивації:

- Рекультивація земель тимчасова – застосовується на землях, де буде інша діяльність від тої, що було до початку розробок. Включає: закріплення ґрунтів від ерозії, озеленення території та відповідність сані

- Рекультивація земель постійна – використовується, де не змінюється початкова діяльність застосування земель.

- Рекультивація ландшафтів – фундаментальна трансформація порушених земель на фоні загального підвищення реформації антропогенних ландшафтів [19].

Виділяють наступні сім напрямів рекультивації:

1. Рекреаційна – розбудова порушеної місцевості під об'єкт відпочинку
2. Сільськогосподарська – створення ріллі, сіножатей, пасовищ та іншої сільськогосподарської діяльності
3. Санітарно-гігієнічна – консервація даної місцевості, яка економічно не вигідна для рекультивації
4. Лісогосподарська – насадження лісової рослинності на порушеній місцевості
5. Водогосподарська – розбудова в нижніх частинах антропогенної місцевості водойм для різних цілей
6. Рибогосподарська – заснування в нижніх частинах порушеного рельєфу водойм для розведення рибного господарства
7. Будівельна – підготовка місцевості під будівництво промислове або цивільне [20].

Загалом процес рекультивації відпрацьованих земель внаслідок відкритих гірничих робіт складає три етапи:

I етап – підготовчий – складається з обстеження відпрацьованих земель, складання відповідних звітів та розробка проекту з рекультивування даної території.

II етап – гірничо-технічний – включає раціональне формування плоских укосів відвалів та кар'єрів, терасування, зняття та консервація (зберігання у спеціальних відвалах) родючого шару ґрунту, спорудження меліоративних споруд

III етап – біологічний – охоплює фітомеліоративні та агротехнічні заходи, що направлені на відновлення біологічної продуктивності та

родючості ґрунту [19].

Ремедіація — це метод для відновлення забруднених земель використовуючи рослини чи мікроорганізми. Його використовують при забрудненні нафтою, важкими металами і т.д.

Наступним етапом в майбутньому після рекультивації або ремедіації буде заповідання порушених територій. Тобто відпрацьовані території будуть самовідновлюватися і повертатися до первинного природнього стану [7].

Рекультивація та відновлення відпрацьованих земель – складний процес, який включає:

- регіональне планування, перспективний план розвитку місцевості, району
- законодавство та вимоги органів, які відповідають за захист навколишнього середовища
- економічні умови регіону [21].

В законодавстві України передбачено включення рекультиваційних робіт у всі проекти, які мають наслідки техногенного порушення ґрунтового покриву, а вартість включена в собівартість продукції. Тобто роботи з рекультивації техногенно змінених земель є складовою частиною технологічних процесів.

Згідно статті 166 «Рекультивація порушених земель» Земельного кодексу України, розділу 4 «Охорона земель»:

1. Рекультивація порушених земель - це комплекс технічних, біотехнологічних і організаційних заходів, які спрямовані на відновлення ґрунтового шару, покращення стану та якості порушених земель.

2. Землі, що змінилися за структурою рельєфу, був пошкоджений екологічний стан ґрунтів, поверхневий горизонт та гідрологічний режим, через антропогенний вплив (гірничодобувні, будівельні, геологорозвідувальні та інші роботи), потребують рекультивації.

3. В процесі рекультивації відпрацьованих земель слід використовувати ґрунт, що був знятий при даних роботах (гірничодобувні,

будівельні, геологорозвідувальні та інші роботи), який наносять на малопродуктивні площі або площі без шару цінного ґрунту [22].

1.4 Основні принципи, механізми, переваги та недоліки фітореMediaції

ФітореMediaція (від грец. «phyto» – «рослина», лат. «remedium» – «відновити, вилікувати») – комплекс енергоефективних механізмів, що застосовують рослинний світ (в деяких випадках разом з мікроорганізмами), щоб відновити складові довкілля (повітря, ґрунтів та води) для екологічної рівноваги [19].

Є одним з напрямів біореMediaції та може застосовуватися як естетично привабливий завершальний етап рекультивації [23].

Термін «фітореMediaція» складається зі слів «фіто», що з грецької мови означає «жива рослина» та «я виправляю» з латинської – відновлення рівноваги завдяки рослинам.

Суть методу фітореMediaції – в здатності рослинами концентрувати, поглинати та метаболізувати забруднюючі речовини (пил, важкі метали, радіонукліди та інше), що знаходяться в довкіллі. Рослини використовують для іммобілізації, вилучення, випаровування, деградації та стабілізації забруднених територій [19].

Основні три механізми фітореMediaції:

1. *in situ* – розміщення рослин на забруднених територіях без перенесення, включає поглинання та накопичення забруднювачів (пасивно), метод застосовується конкретно на місці, без переміщення забруднених об'єктів, найбільш дешевий механізм.

2. *in vivo* – перенесення забруднених місць (ґрунту, води) – механічне видалення, а вже потім відбувається фітореMediaція за допомогою рослин, після очищення повернення ґрунту або води на колишнє місце, більш дорожчий за попередній.

3. *in vitro* – використання екстрагованих ферментів, тобто компонентів живих рослин, можна використовувати, як на місці забруднення, так і до переміщених місць, найдорожчий з даних трьох механізмів [24].

При використанні фітореMediaції застосовується лише природні механізми самої рослини (біоаккумуляція), без додаткових ресурсів, що є економічно вигідно. Даний метод також економить енергію, бо не потребує додаткових дій з ґрунтом (розкопування, відвантаження, осушення ґрунтових вод і т.д.). Висадження рослинності сприяє поліпшенню мікроклімату даної території, запобігає ерозії ґрунтів, виробляє кисень, створює шумопоглинання, а також покращує вигляд відпрацьованих земельних ділянок [19].

Переваги фітореMediaції:

1. економічно вигідна технологія, набагато дешевша вартість самого методу, порівняно з іншими методами очищення довкілля, так як потрібні лише сільськогосподарські практики
2. найбільш безпечний метод знезараження для довкілля
3. один з кращих способів вирішення екологічних проблем пов'язаних з ґрунтом, водою та повітрям
4. наявність умов для контролювання очищення забрудненої території
5. змога очищувати великі, невеликі та/або конкретні території
6. ступінь очищення вищий ніж в традиційних способах
7. можливість не транспортувати забруднений ґрунт до місця очищення, тим самим не поширюючи забруднення
8. не створюють додаткових джерел забруднення довкілля
9. можливість очищувати території забруднені кількома забруднювачами
10. можливість накопичення кошовних металів рослинами (нікель Ni, золото Au, мідь Cu та інші) – фітомайнінг
11. найбільш естетично-екологічний метод рекультивації, що покращує природні властивості ґрунту

12. користується популярністю серед громадськості через естетичність та фітомеліоративні якості [19,23].

Недоліки фітореMediaції:

1. необхідність підбору і висадки конкретних рослин (стійкість, акумуляція, температура, клімат, геологічні умови)

2. можливості методу фітореMediaції обмежені довжиною коренів та об'ємом наземної частини рослин

3. довший період очищення території, порівняно з деякими іншими технологіями

4. необхідність утилізувати забруднену рослинну масу

5. накопичені забруднюючі речовини, при не контролюванні умов, можуть знову потрапити в довкілля, так як фітореMediaція лише переміщує їх, а не знищує [24,25].

1.5 Методи фітореMediaції

ФітореMediaція є загальним терміном для шести способів відновлення порушених територій за допомогою рослин. Це може бути розкладання, розщеплення, стабілізування або видалення забруднювачів. Також ці методи використовують, як окремо, так і в комплексі, залежно від факторів та видів забруднення (табл. 1.6) [25].

Таблиця 1.6 – Методи фітореMediaції в залежності від виду забруднювачів [25]

Важкі метали	Органічні забруднювачі
Фітоекстракція	Фітодеградація
Ризофільтрація	Ризодеградація
Фітостабілізація	Фітовипаровування

Фітоекстракція або фітомайнінг або біомайнінг – процес накопичення забруднювачів біомасою, які вона вбирає кореневою системою з забрудненої

території (вода або ґрунт або опади), тим самим запобігаючи вітровій ерозії та вилугованню цих забруднюючих речовин [23].

Для даного методу краще обирати рослини-гіперакумулянти, через їх властивості та стійкість, а також рослини, які мають високі коефіцієнти біоконцентрації, транслокації, толерантності до забруднювачів, асиміляції, хорошу біомасу, розвинену кореневу систему та швидкий збір рослин. Фітоекстракція може бути безперервна (довготривала) або природня (за допомогою хелатів), яка частіше використовується.

Гіперакумуляція – властивість рослин акумулювати забруднювачі з забруднених територій в середньому в 100 разів (від 50 до 500). Відомо близько 500 видів рослин-гіперакумуляторів. Також важливим критерієм при виборі рослин для фіторекультиваци є накопичення важких металів.

Дані рослини вирощують на забруднених територіях, збирають та спалюють (зола може використовуватися на звалищах). Для зменшення забруднень до потрібного рівня процес можуть повторювати декілька разів. Також можливий процес фітодобування деяких металів (свинець, цинк, нікель, хром, мідь) з забруднених територій, але частіше використовується для дорогоцінних металів. Даний біологічний метод не впливає на якість ґрунту та води, при цьому дає можливість переносити металеві забруднювачі з місць [25].

Переваги фітоекстракції:

1. Мала собівартість процесу
2. Повноцінне очищення забрудненої території назавжди

Недоліки фітоекстракції:

1. Переважно гіперакумулятори мають повільний темп росту, невелику біомасу та малорозвинені корені
2. Необхідність утилізації забрудненої біомаси [24].

Найкращими варіантами для фітоекстракції будуть рослини з сімейств – злакові (Poaceae), капустяні (Brassicaceae), молочайні (Euphorbiaceae),

айстрові (Asteraceae), ранникові (Scrophulariaceae), губоцвіті (Lamiaceae) та гвоздикові (Caryophyllaceae) (табл. 1.7) [24].

Таблиця 1.7 – Деякі рослини, які використовуються у фітоекстракції [4]

Назва рослини	Латинська назва	Забруднювачі, які поглинають	Кількість видаленого цинку (Zn) за сезон
Гірчиця чорна або сарептська	<i>Rhamphospermum nigrum</i>	Pb, Cu, Cd, Zn, S, Ni	1-1,5 г/кг
Альпійська ярутка	<i>Thlaspi alpestre</i>	Cd, Zn	30-100 кг/га
Гірчак або спориш	<i>Polygonum L.</i>	Zn, Pb, Cd	300-400 кг/га
Слоновая або камерунська трава	<i>Pennisetum purpureum</i>	Zn, Ni, Cr, Cu, Cd, Pb	500 мг/кг
Жито посівне	<i>Secale cereale</i>	Zn, Pb	-
Кропива жалка	<i>Urtica úrens</i>	Ni, Cr, Cu, Cd, Pb	-

Ризофільтрація – адсорбція кореневою системою забруднюючих речовин та води, для очищення різних водойм чи водних ресурсів [23].

В даному методі використовують водні чи наземні рослини, які утворюють плавучі плоти. Для ризофільтрації рослини потрібно акліматизувати до забруднювача. Для цього їх спочатку вирощують на гідропоніці в чистій воді, до моменту поки добре не розвинеться коренева система. Далі змінюють чисту воду на забруднену, а вже потім висаджують рослини у забруднену зону, де коріння поглинає забруднювачі разом з водою. Після насичення коріння забрудненими речовинами, рослини збирають та

утилізують [25].

Ризофільтрацію використовують для забруднень: металами купрум (мідь) Cu, хром Cr, свинець Pb, кадмій Cd, кобальт Co, цинк Zn, нікель Ni, ртуть Hg, манган Mn, молібден Mo срібло Ag і радіонуклідами – стронцій ^{90}Sr , цезію ^{137}Cs , плутоній ^{239}Pu , уран ^{234}U [24].

Переваги ризофільтрації:

1. Очищення ґрунтового покриву без порушення ґрунтової динаміки (in situ)
2. Можливість переміщати рослини після того, як вона акумулює радіонукліди
3. Зменшення тривалості перебування працівників з радіоактивними речовинами [26].

Недоліки ризофільтрації:

1. Необхідно підтримувати переважний рівень рН
2. Підготовка розсади необхідних рослин перед висадкою їх на забруднену територію [24].

З рослин перспективними для ризофільтрації, завдяки швидкому росту та розвиненій кореневій системі є: тютюн (*Nicotiana*), індійська гірчиця (*Brassica juncea*), люпин (*Lupinus*), жито (*Secale cereale*), люцерна (*Medicago*), шпинат (*Spinacia oleracea*), кукурудза (*Z. mays*), соняшник (*Helianthus annuus*) та водний гіацинт (*Eichornia crassipes*), останні два накопичують значну кількість радіонуклідів (основні – ^{137}Cs , U, ^{90}Sr) протягом короткого часу [26].

Фітостабілізація – поглинання корінням рослин забруднювачів (переважно важких металів) з ґрунту і води та знерухомлення їх, що зменшує їх ризик поширення в навколишнє середовище [23].

Серед механізмів фітостабілізації слід відзначити: зниження валентності металу чи їх осадження/знерухомлення/поглинання, використання стійких до важких металів рослин, які за допомогою кореневої системи або вироблених біохімічних речовин в ризосфері іммобілізують забруднювачі. Коріння

виробляють хімічні сполуки, які дезактивують та адсорбують токсичні речовини, тим самим зменшуючи їх біодоступність [19].

Це запобігає поширенню небезпечних речовин через харчовий ланцюг та зменшує ризики міграції в повітря, поглинання їх підземними водами (вилуговування), підтримує здоров'я ґрунтового покриву (табл. 1.8) [25].

Переваги фітостабілізації:

1. Не потрібно видаляти та знищувати забруднену біомасу
2. Зменшує ризики вітрової, водної ерозії та

Недоліки фітостабілізації:

1. Є ризик не очищення території місцями
2. Потребує постійного моніторингу [24].

Таблиця 1.8 – Деякі рослини, які використовуються у фітостабілізації [19]

Назва рослини	Латинська назва	Забруднювачі, які поглинають
Люпин білий	<i>Lupinus albus</i>	миш'яку (As) та кадмію (Cd)
Вид рослин родини Злакові	<i>Hyparrhenia hirta</i>	Свинцю (Pb)
Паролист звичайний	<i>Zygophyllum fabago</i>	Цинку (Zn)
Заяча конюшина звичайна ряснолиста	<i>Anthyllis Vulneraria</i>	Цинку (Zn), свинцю (Pb) та кадмію (Cd)
Щучник дернистий	<i>Cespitosa deschampia</i>	Свинцю (Pb), кадмію (Cd) та цинку (Zn)
Гусимка піскова або жерушник пісковий	<i>Cardaminopsis arenosa</i>	Свинцю (Pb), кадмію (Cd) та цинку (Zn)

Фітодеградація – детоксикація рослиною в ризосфері або кореневою системою органічної частини забруднювачів, іноді застосовуючи деяких мікроорганізмів або бактерій [23].

Фітодеградація – ферментативна деградація органічних забруднюючих речовин метаболічними процесами (внутрішніми або зовнішніми) рослини на прості сполуки для їх поглинання та розщеплення. Дані менші сполуки рослина потім в якості метаболітів використовує для росту [25].

В даному методі необхідно підбирати рослини, які здатні розщепити забруднювачі, перетворюючи їх на нетоксичні сполуки (наприклад, до вуглекислого газу CO_2 та води H_2O). Для цього використовуючи наступні ферменти: дегалогеназа, нітроредуктаза, фосфатаза, оксидоредуктаза, нітрилаза та оксигеназа.

Фітотрансформацію використовують для очищення від органічних гербіцидів, галогенових вуглеводнів, токсинів, фосфорорганічних і хлорорганічних пестицидів, інсектицидів, трихлоретану (та інших хлорованих розчинників), важких металів, вибухових речовин (тротил) та деяких боєприпасів [19].

Переваги фітодеградації:

1. Головну роль у процесі відіграють ферменти, які виробляють рослини
2. Не потребують ризосферних бактерій
3. Результативний при незначному забрудненні території

Недоліки фітодеградації:

1. Адсорбує лише органічні забруднювачі
2. Недоцільний при глибокому забрудненні території [24].

Ризодеградація або фітстимуляція/фітофільтрація/біоремедіація – метод очищення водойм та ґрунтів, де забруднюючі речовини поглинаються корінням або мікроорганізмами, які адсорбуються в ризосфері [23].

Мікроорганізми в ґрунті та ризосфері перетворюють органічні розчинники в процесі біоремедіації на більш безпечні сполуки. Вироблені органічні кислоти та цукри коренями рослин слугують джерелами вуглеводів для мікроорганізмів, що стимулює їх ріст та діяльність. Також коренева система рослин транспортує воду до ризосфери та покращує якість ґрунту [25].

Для фітофільтрації рослини культивують за методом гідропоніки, коли коренева система добре розвинута переміщують в забруднену територію.

Приклади рослин, які використовуються у фітофільтрації: ряска (*Lemna*), очерет (*Scirpus*), руслиця (*Elatine*), азола (*Azolla*) та спориш (*Polygonum*) [19].

Фітовипаровування – поглинання забруднювачів і токсинів корінням з забруднених територій, перетворення всередині рослини їх на більш безпечні сполуки та транспірують їх через листя в атмосферне повітря [23].

З моменту поглинання токсинів кореневою системою рослини до їх випаровування, вони модифікуються. Тобто вони рухаються по судинам разом з водою розщеплюючись на більш прості сполуки.

На ефективність даного методу впливають кліматичні та геологічні умови забрудненої території, а також від концентрацій забруднювачів в забруднених місцевостях [25].

Даний метод фіторекультивациі використовують для територій забруднених – селеном (Se), миш'яком (As), ртуттю (Hg), радіоактивними ізотопами (тритієм) та іншими органічними забруднювачами [19].

Переваги фітовипаровування:

1. Перетворення токсинів в більш безпечні та прості форми
2. Забруднювачі потрапляють в атмосферне повітря в невеликих концентраціях і відбувається процес дифузії

Недоліки фітовипаровування:

1. Не вирішення проблеми повністю, бо цей метод викидає частину забруднюючої речовини в довкілля, що може порушувати його рівновагу
2. Невелика кількість накопичення забруднювачів в рослинних тканинах [24].

Серед рослин для фітовипаровування використовують: солонку (*Salicornia bigelovii*), тополю (*Populus*), молочай (*Astragalus bisulcatus*), акацію (*Acacia*), кам'янки (*Chara canescens*), люцерну (*Medicago*), індійську гірчицю (*Brassica juncea*), гусимку (*Arabidopsis thaliana*) та ріпак (*Brassica napus* L.) [19].

1.6 Приклади фіторе mediaції в світі та Україні

Метод фіторекультивуації вже багато років застосовується у різних країнах світу: США, Канада, Німеччина, Англія, Італія, Франція, Амстердам, Швеція, Польща, Чехія та інші.

На території США найбільше займаються фіторекультивуацією порушених земель в штатах: Флорида, Огайо, Каліфорнія, Індіана та Пенсільванія, де в основному використовують бобово-злакові багаторічні трави та листяно-хвойні деревні насадження [27].

В Англії використовують близько 23 видів дерев для фіторекультивуації відпрацьованих родовищ та сільськогосподарських угідь, зокрема акацію білу, дуб звичайний, вільху чорну, модрина європейську та інші.

В Німеччині при рекультивуації вугільних відвалів Рурського та Рейнського басейнів було використано 18 видів чагарників та 36 видів дерев, зокрема осики та вільхи чорної [28].

В Канаді прикладом всесвітньо успішної ремедіації є хемофітостабілізація мідно-нікелевих комбінатів в місті Онтаріо, вартість якої склала 24,5 млн. доларів за більше 30 років. З трав'янистих рослин використали суміш злаково-бобових культур 40 кг/га (загальна засіяна площа більше 3 000 га): злаків – 75 % (мітлиця велетенська (*Agrostis gigantea*), тимофіївка лучна (*Phleum pratense*), костриця червона (*Festuca rubra*), тонконіг лучний (*Poa pratensis*), тоонконіг стиснутий (*Poa compressa*),), бобових – 25 % (конюшина гібридна (*Trifolium hybridum*), лядвенець рогатий (*Lotus corniculatus*)). Також було посаджено 9 млн. дерев з них хвойні – 70 % (сосна, туя західна, ялина), листяні – 30 % (дуб червоний) [4].

Гарними прикладами рекреації порушених земель в Україні є створення водойми та рекреаційної зони на місці Яворівського сірчаного кар'єру та ландшафтного парку на місці Подорожнянського сірчаного кар'єру [7].

Яворівський сірчаний кар'єр – це найглибше в Україні техногенне озеро з максимальною глибиною 70 м та найбільше в Львівській області площею 610

га. Побудований на місці Яворівського гірничо-хімічного комбінату в 2002-2006 роках, де відкритим способом добували сірчану руду [29]. Притоками озера є річка Шкло та її притоки – Терешка, Великий і Малий Гноєнець, Руський, Якша. Наразі в озері присутня різноманітна водна фауна, зокрема: карась, сом, щука, краснопірка, сазан, товстолобик, верховодка, окунь та лин [30].

Для фіторекультивациі зони ЧАЕС Київська область були використані соняшники. Наприклад, соняшники, які були посаджені в радіоактивно забрудненому ставку та мали коефіцієнт біоаккумуляції корінням цезію (^{137}Cs) 4900-8600 [31].

Також у 2015 році було висаджено саджанці верби (або енергетичної верби) на осушеній ділянці ставка-охолоджувача ДСП ЧАЕС на території близько 2 га. Це дало можливість оцінити використання фіторекультивациі для створення екоценозу з дерев енергетичних порід в Чорнобильській зоні.

У 2017 році ДСП «Екоцентр» та ДП «Житомирський військовий лісгосп» провели біологічну рекультивацию на місці могильника з військовими радіоактивними відходами «Вакуленчук» (Житомирська область). Данню ділянку було засаджено саджанцями сосни, що є основною лісовою культурою на даній місцевості. Це знизило радіаційний фон території до норми та відновлює її до природнього стану.

В Кіровоградській області проводиться фіторекультивация на місці могильника з військовими радіоактивними відходами «Цибулеве», де сформували листяний гай, який буде гармонійно поєднуватися з лісовою екосистемою навколо території [32].

«Східенерго» (Донецька область) фіторекультивували відпрацьований золовідвал сумішшю з багаторічних трав, попередньо засипавши його шаром суглинку та родючого ґрунту та проводять озеленення східної сторони породного відвалу.

Ще одним прикладом є «Павлоградвугілля» - найбільше шахтне об'єднання (включає 10 шахт) розташоване в Західному Донбасі

(Дніпропетровська область), що рекультивує відпрацьовані ділянки. Для заповнення просілих поверхонь ґрунту використовує відпрацьовану шахтну породу. Далі насипається шар родючого ґрунту і насаджують відповідні рослини. Наприклад, в 2009 році площа рекультивованих земель склала 15,1 га. Також охороняє лісові насадження та сільськогосподарські території від затоплення споруджуючи дренажні системи [7].

Одним з найкращих прикладів фіторекультивації в Україні є створення ландшафтного заказника «Візирка» місцевого значення в Кривому Розі, Дніпропетровської області. Це найуспішніший проект з рекультивації «МАТІНВЕСТ», що став об'єктом природно заповідного фонду. Завдяки біоремедіації каскаду відпрацьованих кар'єрів вдалося досягти відновленню порушених земель.

Спочатку було висаджено лише 17 різновидів піонерних рослин (костриця, бромус, тонконіг, келерія та інші). Після 5-6 років кількість різновидів рослин зростає до 32, а в 8-10 років – налічувало 68 видів. Так природа майже за 40 років відновилася до свого первісного стану.

На сьогоднішній день на рекультивованих землях росте 99 різновидів степових рослин, типових для даної місцевості: полин австрійській, шавлія сухостепова, кульбаба пізня, костриця валлійська, чистець прямий, цикорій дикий, молочай степовий та ковила, що занесена до Червоної книги України.

На території заказника відбувається регулярний біомоніторинг флори та фауни для збереження та поповнення екологічного розмаїття екосистеми [33, 34].

Застосування, підтримка та розвиток перелічених прикладів вдалої фіторекультивації на території України допоможе відновити землі після завершення гірничих робіт, промислових або техногенних аварій та військових дій.

1.7 Піонерні угруповання рослин-фіторемедіантів

Піонерні угруповання – невелика кількість видів рослин, що першими заповнюють порушені екосистеми. Вони формують первинну сукцесію порушеного біоценозу, частіше нерівномірну та без взаємодії між різними видами. Невибagliві до родючості ґрунту, рівня вологості та наявності поживних речовин, морозостійкі, вітрозапильні (насіння легко втримується на поверхні), мають швидкі ростові показники та велику кількість насіння, також люблять високу освітленість, тому легко ростуть на відкритих ділянках [35].

Для фіторемедіації найкраще та частіше використовують трав'янисті рослини, через їх піонерні характеристики. Багаторічні – мають велику біомасу, швидкість росту, толерантність до важких металів, однорічні – можливість очищення території від забруднень за допомогою збору біомаси. Найкраще використовувати місцеві види рослин, що пристосовані до пристосовані до даних кліматичних та фізико-геологічних умов.

Фіторекультиваційні рослини застосовують для очищення першої ланки трофічного ланцюга «ґрунт – рослини – тварини – людина».

Для визначення рівня токсичності ґрунтового покриву використовують наступні тест-культури: бобові (конюшина, люцерна і т.д.), овес посівний, редис, крес-салат.

Для покращення агрофізичних характеристик ґрунту є гірчиця, еспарцет та люцерна, агрохімічних – люпин, люцерна, соя та еспарцет.

Для заселення кислих ґрунтів використовують ацидофільні культури – злакові трави, озиме жито, овес, люпин, моркву, картоплю.

Для забруднених нафтою та нафтопродуктами ґрунтів застосовують гречку посівну (*Fagopyrum vulgare* St.), соняшник однорічний (*Helianthus annuus* L.) та звичайний (*Linum usitatissimum* L.).

Ґрунти забруднені (перевищення ГДК в десятки разів) міддю, цинком, свинцем, ртуттю, нікелем, оловом та кадмієм очищують за допомогою рослин в залежності від їх стійкості, найбільш стійкі газонні трави –грестиця збірна,

вівсюг луговий та звичайний, пирій повзучий, кострець безостий, вівсяниця червона, дикорослі – латук звичайний, мати-й-мачуха, польовий в'юнок, синяк татарський.

Кожна рослина здатна поглинати певний забруднювач у більшій, або меншій концентрації. Тому при виборі рослин для фітореMediaції, необхідно звернути увагу, які саме речовини вона поглинає. У таблиці 1.9 представлені деякі приклади рослин-гіперакумулянтів [4].

Таблиця 1.9 – Приклади рослин-аккумулянтів та важкі метали, які поглинають [4]

Назва рослини	Латинська назва	Важкі метали
Бурачок або бородавник	<i>Alyssum murale</i>	нікель (Ni)
Рядник звичайний	<i>Armeria maritima</i>	свинець (Pb) та цинк (Zn)
Гірчиця сарептська	<i>Brassica juncea</i>	кадмій (Cd), мідь (Cu), нікель (Ni), свинець (Pb), селен (Se), цинк (Zn), манган (Mn), залізо (Fe), хром (Cr), селен (Se)
Евкалипт	<i>Eucalyptus sp.</i>	натрій (Na) та миш'як (As)
Водяний гіацинт	<i>Eichornia crassipes</i> (Mart.) Solms	свинець (Pb), мідь (Cu), кадмій (Cd), миш'як (As), хром (Cr), нікель (Ni), селен (Se)
Вівсяниця очеретяна	<i>Festuca arundinaceae</i> Schreb.	цинк (Zn), кадмій (Cd), свинець (Pb)
Соняшник звичайний	<i>Helianthus annus</i>	Мідь (Cu), цинк (Zn), кадмій (Cd), свинець (Pb), хром (Cr), нікель (Ni), цезій (¹³⁷ Cs), стронцій (⁹⁰ Sr), уран (U)

Закінчення табл. 1.9

Тонконіг	<i>Koeleria vallesiana</i> (Honck.) Bertol.	кадмій (Cd), цинк (Zn), свинець (Pb)
Ряска мала	<i>Lemna minor</i>	мідь (Cu), ртуть (Hg), свинець (Pb), залізо (Fe), кадмій (Cd)
Жито посівне	<i>Secale cereale</i> L.	свинець (Pb) та миш'як (As)
Парнолистник звичайний	<i>Zygophyllum fabago</i> L.	свинець (Pb), цинк (Zn) та мідь (Cu)

Родина рослин-аккумуляторів, що здатні накопичувати важкі метали в 10 разів: злакові (Poaceae), бобові (Fabaceae), хрестоцвітні (Brassicaceae), складноцвітні (Asteraceae), гвоздичні (Caryophylla), осокові (Cyperaceae), кунонієві (Cunoniaceae), флакуртієві (Flacourtiaceae), губоцвітні (Lamiaceae) та фіалкові (Violaceae) (табл. 1.10-1.11) [4].

Таблиця 1.10 – Приклади рослин-гіперакумуляторів металів з родини злакові або тонконогові (POACEAE) [36]

Назва рослини	Латинська назва
Пахуча трава звичайна	<i>Anthoxanthum odoratum</i>
Мітлиця звичайна, мітлиця тонка	<i>Agrostis capillaris</i>
Мітлиця велетенська	<i>A. gigantea</i>
Мітлиця повзуча	<i>A. stolonifera</i>
Райрас високий	<i>Arrhenatherum pratensis</i>
Авінелла звивиста	<i>Avenella flexuosa</i>
Кущоніжка лісова	<i>Brachypodium sylvaticum</i>
Стоколос гіллястий	<i>Bromus ramosus</i>
Пурпуровий хлоріс	<i>Chloris barbata</i>
Цинодон пальчастий	<i>Cynodon dactylon</i>
Щучник дернистий	<i>Deschampsia caespitosa</i>

Безоста трава, дикий рис	<i>Echinochloa colona</i>
Медова трава вовниста	<i>Holcus lanatus</i>
Костриця червона	<i>Festuca rubra</i>
Ячмінка лісова	<i>Hordelymus europaeus</i>
Пажитниця багатоквіткова	<i>Lolium multiflorum</i>
Біловус стиснутий, мичка звичайна	<i>Nardus stricta</i>
Пажитниця багаторічна	<i>L. perenne</i>
Суданська трава	<i>Sorghum sudanense</i>
Пирій бессарабський	<i>Thinopyrum bessarabicum</i>

Таблиця 1.11 – Приклади рослин-гіперакумуляторів металів з родини капустяні (BRASSICACEAE) [36]

Назва рослини	Латинська назва
Бурачок муровий	<i>Alyssum bertolonii</i>
Бурачок гірський	<i>A. montanum</i>
Пісщанка тьмянолисна	<i>A. serpyllifolia</i> subsp. <i>malacinatum</i>
Індійська гірчиця	<i>Brassica juncea</i>
Ріпак	<i>B. napus</i>
Талабан альпійський	<i>Thlaspi alpestre</i>
Строфант	<i>Strsphanthus polycainides</i>
Конюшина польова	<i>T. arvense</i>
Конюшина гірська	<i>T. montanum</i>
Материнка круглолиста	<i>T. rotundifoliun</i> subsp. <i>sepaefolim</i>

Для фіторекультивуації радіоактивних земель необхідно обирати відповідні рослини-акумулятори, з великою кореневою системою або формують велику біомасу та мають значний коефіцієнт акумуляції. Найпопулярнішими є соняшник, люпин, кукурудза та люцерна.

Трав'янистими рослинами-акумуляторами цезію¹³⁷ (^{137}Cs) - Костриця очеретяна (*Festuca arundinacea*), Біла конюшина (*Trifolium repens*), Щириця загнута (Redroot), Пажитниця багаторічна (*Lolium perenne*), Зірочник середній (*Cerastium fontanum*) та Мітлиця повзуча (*Agrostis plant communities*).

А біологічним індикатором радіонуклідів є Традесканція (*Tradescantia bracteata*) [31].

Рослини використовують для іммобілізації, вилучення, випаровування, деградації та стабілізації забруднених територій. Підбір необхідних рослин для конкретної території та забруднювача є необхідним для збереження природного стану екосистем.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОСЛИН-ФІТОРЕМЕДІАНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ БІОТЕСТУВАННЯ

2.1 Біоіндикація – вид екологічного моніторингу

Моніторинг навколишнього середовища оцінює і досліджує поведінку рослин та тварин при антропогенному впливі (забруднення важкими металами, промисловими викидами, пестицидами та іншими). В залежності від характеристик біоіндикаторів та їх реакції на забруднення формуються біологічні системи моніторингу чи біодіагностики (включає біотестування).

Переваги біоіндикації перед іншими методами моніторингу докiлля:

1. Висока ефективність та перспективність використання
2. Враховують усі фактори про довкілля та відображають загальний стан
3. Низька собівартість та простота використання
4. Характеристика стану довкілля за тривалий період часу
5. За факторами території можливість визначати організми, які мешкають в даному середовищі [37].

Біоіндикація (з грецької «bios» – життя та латинської «indico» - вказую) – система моніторингу якості та стану довкілля за допомогою спостережень окремої його біоти (тварини, рослини і т.д.) у природних умовах. За аналізом показників умов існування біоти можливо оцінити стан довкілля за необхідними показниками (хімічні, фізичні та біологічні).

Для біоіндикації обирають види-біоіндикатори чи індикатор-тестери, що швидко реагують та мають високу чутливість на зміни навколишнього середовища від природніх чи антропогенних факторів. Біоіндикацію проводять за допомогою мохів – бріоіндикація, лишайників – ліхеноіндикація, грибів – мікоіндикація, для водних екосистем за допомогою – фітопланктону, бактеріопланктону, фітобентосу, зоопланктону, перифітону, зообентосу [38].

Принципи біоіндикації:

1. Швидкість проведення.
2. Отримання чітких та практичних результатів.
3. Похибка результатів не перевищує 20 % [37].

Таблиця 2.1 – Структура сучасної біоіндикації [39]

Структура сучасної біоіндикації	
1 Біоіндикація різних рівнів екосистем	1.1 Синбіоіндикація – спостереження за угрупованнями організмів (популяції, види і т. ін.).
	1.2 Аутбіоіндикація – спостереження за змінами деяких організмів чи ознак.
2 Біоіндикація з використанням різних систематичних груп організмів	2.1 Ліхеноіндикація (від грец. λειχήν «лишайник») – за допомогою лишайників.
	2.2 Фітоіндикація (від грец. φυτόν «росина») – за допомогою рослин.
	2.3 Бріоіндикація (від грец. bryon «мох») – за допомогою мохів.
	2.4 Дендроіндикація (від грец. dendron «дерево») – за допомогою деревних рослин.
	2.5 Альгоіндикація – за допомогою водоростей.
	2.6 Зооіндикація (від грец. ζῷον «тварина») – за допомогою тварин.
3 Сфера використання біоіндикації	3.1 Лісова індикація – лісові масиви.
	3.2 Агроіндикація – ґрунтовий покрив.
	3.3 Інженерна біоіндикація
	3.4 Геоіндикація – поверхня Землі.
	3.5 Біоіндикація повітря – атмосферне повітря.
	3.6 Гідробіоіндикація – водні об'єкти.

Розрізняють 6 рівнів біоіндикації в залежності від біологічних систем:

1. фізіологічні та біохімічні реакції,
2. біоритмічні, морфологічні, поведінкові та анатомічні відхилення,
3. зміни в життєдіяльності рослин та тварин,
4. ценотичні зміни,
5. біогеценотичні зміни,
6. зміна ландшафтів [37].

Головні критерії кількісної оцінки забруднення довкілля:

1. Індекс забруднення
2. Гранично допустима концентрація
3. Фонова концентрація.

Об'єкти забруднення:

1. Безпосередні – компоненти екотопу (вода, атмосфера, ґрунт)
2. Опосередковані – складові біогеоценозу (тварини, мікроорганізми, рослини, гриби) [39].

Біотестування – оцінка об'єктів довкілля дослідним шляхом (вплив хімічних, фізичних факторів) на біоту у контрольних або заданих умовах (лабораторні). Завдяки змінам чи реакції тест-об'єкта (окремих тканин, органів або клітин) можна оцінити необхідні еколого-токсикологічні показники даних об'єктів (територій) та спрогнозувати можливі наслідки.

В ролі тест-об'єктів найчастіше використовують: ракоподібних, прісноводних риб, дощових черв'яків, бактерії, водорості, цибулю та крес-салат.

Біоіндикатори або біологічні індикатори – особини, групи, види організмів, які за місцем кількість, густотою існування, ступенем розвитку, зміною структурно-функціональних, морфологічних, біохімічних, генетичних та інших змін стану та якості довкілля.

За їх показниками визначають певні особливості території: склад ґрунтового покриву, кількість мікроелементів та поживних речовин, концентрації важких металів та хімічних добрив (пестициди, гербіциди, т.д.),

рівень кислотності ґрунту, присутність мінералів чи корисних копалин, рівень вологи, забруднення середовища вихлопами, токсичними газами, випромінюванням.

Таблиця 2.2 – Рослини-індикатори для моніторингу ґрунту [39]

Ознака ґрунту	Рослини-індикатори
рН	Кислі – ацидофіли – хвощ польвий, в'юнок польовий, щавель, плавун булавоподібний, свагнум, журавлина
	Нейтральні – нейтрофіли – конюшина, полуниця зелена, яглиця європейська, грястиця збірна, жовтець
	Лужні – базифіли – осока, медуна, лядвенець, анемона
Вміст солей (галофіти)	Сильно засолені – еугалофіти – полин, саксаул, верблюжа колючка.
	Середньо засолені – мезогалофіти – грястиця, бор
	Мало засолені – олігалофіти - вереск, осока, хміль
Гранулометричний склад	Піски – псамофіти – волоснец піщаний, осока.
	Суглинок - алевритофіти
	Глини – пелитофіти
	Кам'янисті - хасмофіти
	Скали – петрофіти – каменеломка, іван-чай.
Родючість	Низька – лишайники, торф'яні мохи, котяча лапка
	Середня – костриця, дудник, медунка, грушанка
	Висока – кропива, чистотіл, кислиця, зніт, лабазник
Вологість	Волога – гігрофіти – очерет, журавець, калюжниця
	Посуха – ксерофіти – ковила, нечуйвітер, мітлиця

Основні шість груп біоіндикаторів:

1. Мікробіологія
2. Клітинна біологія і генетика
3. Порівняльна фізіологія

4. Зоологія
5. Гідробіологія
6. Ботаніка [37,38].

Використання рослин в біоіндикації:

- Відчувають зміни стану довкілля та підсумовують їх екологічні характеристики.
- Показують реакцію та місця забруднення навколишнього середовища, навіть короточасного та залпового.
- Допмагають в оцінці впливу забруднень на довкілля та людину і розробку ГДК токсикантів на екосистеми [38].

Реакції рослин та зміна їх морфологічного стану, що застосовують в біоіндикації:

- Зміна кольору листя (пожовтіння, побуріння, почервоніння, сріблясте забарвлення, хлороз).
- Некроз (відмирання тканин окремих ділянок листка).
- Опадання (дефоліація) та передчасне в'янення листя.
- Зміна життєвих форм рослини та її тривалості життя.
- Зміна форми, розміру, положення органів та плодючості рослини [37].

2.2 Характеристика фітореMediaційних властивостей обраних рослин фітореMediaнтів

Зернове сорго або звичайне (*Sorghum bicolor*) – трав'яниста одно- чи багаторічна рослина родини злакових або тонконогових (Poaceae). Батьківщиною є Африка, поширено переважно в Азії, Америці та Європі.

Висота рослини сягає від 0,5 до 7 м. Має потужну та розвинену кореневу систему глибиною 2-2,5 м з здатністю поглинати вологу (асиміляційний апарат). Листя вкрите восковою плівкою, що перешкоджає випаровуванню вологи. Суцвіття розміром 10-70 см є розлогим, прямостоячим, зігнутих або

пониклим. Зерно має овальну форму. Забарвлення зерна сорго варіюється від білого та жовтого до червоного та коричневого.

Зерно сорго містить близько 4 % жиру, 12-13 % білку, 70-75 % крохмалю, амінокислоти (метіонін та лізин), антиоксиданти, фолієву та фосфорну кислоту, ніацин, тіамін, біотин, рибофламін, вітамін В1, мікроелементи (цинк, залізо, магній, калій, селен). Не містить глютену. Енергетична цінність 100 г сорго – 340 ккал. Загалом страви з сорго поживні, корисні для організму (покращують роботу серця, мозку, обмінних процесів та ферментів) [40].

Теплолюбне (оптимум 30-35 °С), моро- та посухостійке (витримує до 40 °С), невибагливе до ґрунтів та клімату, пристосоване до підвищеної концентрації солі, добре росте на суглинках, погано розвивається на вологих та холодних (нижче 13 °С, нижче 0 °С – паростки гинуть) ґрунтах. Паразитом сорго є тля, особливо в східних країнах.

Переваги використання сорго серед сільськогосподарських культур:

1. Висока врожайність та якість зерна (вміст крохмалю, відсутність таніну)
2. Використання при поливі в 1,5-2 рази менше води на одиницю врожаю
3. Використовує вуглецеву фіксацію (C4) для зменшення споживання води та поглинання CO₂
4. Не потребує добрив для розвитку (при використанні добрив: азот, фосфор та калій, частина елементів від 60 % до 20 % повертається)
5. При тривалій посухи переходить в сплячий стан та згортає листя, з можливістю відновлення
6. Пригнічує ріст бур'янів (виробляє речовину – сорголеном, яка не дає їм розвиватися, як гербіцид)
7. Стійкість до хвороб та шкідників (круглі черви, жуки *Diabrotica* в Західній Європі, гриб-паразит *Macrophomina* в Східній Європі) [40,41,42].

Сорго використовують як харчову та промислову культуру, для виробництва:

- харчової продукції (крупни, крохмаль, борошно, спирт - етанол та корм для худоби)
- фарби для шкіри
- паперу
- плетених виробів (волоті, вінки, огорожі, покрівлі і т.д.)
- біопалива (перероблюють стебло в етанол) [41].

Також сорго використовують для вирішення екологічних питань пов'язаних з рекультивацією ґрунтів. Через гарно розвинену кореневу систему та значну біомасу він добре пристосовується до більшості умов. Серед якостей важливих для фіторекультивації – захищає ґрунт від ерозії, зберігає структуру ґрунтового покриву та перешкоджає вимиванню азоту з землі. При використанні сорго на конкретній ділянці, він захистить ґрунтовий покрив та буде перешкоджати появі бур'янів до насаджень наступної культури [42].

Горох посівний (*Pisum sativum*) — трав'яниста однорічна квіткова самозапильна рослина родини бобових (*Fabaceae*), використовується як зернобобова. Вирощують в Європі, Азії (Батьківщина), Америці, Канаді, Китаї.

Висота рослин сягає від 50 см до 2,5 м. Стебла мають багато міжвузля. Стебло та листки покриті восковою плівкою. Коренева система гороху – стрижнева з глибиною до 1,5 м, азотфіксуюча, розчинює фосфати (завдяки кислотним виділенням), синтезує фізіологічно-активні речовини. Суцвіття має форму несправжнього зонтику, квітки розміром 15-36 мм. Забарвлення квіток зазвичай біле, іноді рожеве або блакитне. Зерно має круглу форму. Колір зерна варіюється від біло-жовтого до зелено.

Насіння гороху містить 16-36 % білку, 54 % вуглеводи (зокрема крохмаль), 1,6 % насичених жирних кислот, амінокислоти (11,4 % аргінін, 4,7 % лізин, 1,2 % триптофан), мінеральні речовини (кальцій, калій, магній, фосфор, хлор, сірку), вітаміни (А, В1, В2, С), мікроелементи (цинк, мідь, залізо, марганець, хром, нікель, йод, молібден, стронцій, фтор, селен).

Енергетична цінність 100 г гороху – 81 ккал. Страви з гороху гарно засвоюються в організмі людини (покращують роботу травної системи та ферментів, мозку, процесів регенерації) та можуть замінювати м'ясні продукти [43].

Сонцелюбна (погано розвивається в затінку), невибаглива до тепла (оптимум 12-22 °С), витримує приморозки до -7 °С, погано переносить спеку. Гарно росте на нейтральних та мало лужних суглинках, гумусі і піщаниках, погано реагує на надлишок азоту (легкодоступна форма), сильні протяги, кислому ґрунті. Потребує добре зволоженого ґрунту (мінімум 70-80 %). Основними захворюваннями гороху є борошниста роса та мозаїка [44].

Переваги використання гороху серед сільськогосподарських культур:

1. Невибаглива до тепла та скоростигла культура (можлива посадка кілька разів за сезон)
2. Може рости на засолених ґрунтах
3. Пригнічує ріст бур'янів та запобігає поширенню хвороб
4. Збагачує ґрунтовий покрив азотом (акумулює 50-100 кг азоту на гектар, завдяки бобово-ризобіальному комплексу)
5. Гарно комбінується з іншими рослинами по сусідству, окрім бобових
6. При посіві зі злаковими утворюється пухкий чорнозем [44,45].

Горох використовують в основному як харчову культуру (крупя, борошно, корм для худоби, є гарним медоносом), також його використовують як сидерат, для покращення властивостей ґрунту.

Також горох використовують для вирішення екологічних питань пов'язаних з рекультивацією ґрунтів. Він має швидкий ріст, достатньо велику та розлогу біомасу, добре комбінується зі злаками. Серед якостей важливих для фіторекультивації –підвищує розчинність мінеральних солей та металів (підвищує кислотність ґрунту), які знаходяться в ґрунті, тому збільшується поглинання їх ризосферою рослин. Через сидеральні властивості, горох добре відновлює, покращує дренаж, текстуру та підвищує родючість ґрунтового покриву [45].

2.3 Характеристика цинкового купоросу

Цинковий купорос – безбарвні кристали сульфату цинку ($ZnSO_4$) або цинкової солі сульфатної кислоти (табл. 2.3). Відсоток цинку в складі складає 39-37 % [46].

Таблиця 2.3 – Хімічні та фізичні характеристики цинкового купоросу [46]

Молярна маса	Розчинить у воді	Температура плавлення	Температура кипіння	Щільність
287,56 г/моль	0 °C – 29,4 % 99 °C – 37,7 % 600 °C – 100 %	680 °C	740 °C	3,74 г/см ³

Галузі застосування цинкового купоросу:

- Виробництво глазурі та мінеральних фарб.
- Текстиль – віскозне виробництво та целюлозно-паперова галузь – відбілювання, зокрема паперу.
- Металургія – флотореагент та гальванотехнічному секторі – антикорозійне покриття.
- Медицина: косметологія – антивікові креми, засоби для очищення та вмивання шкіри, стоматологія, фармацевтика – ліки від кон'юнктивіту, ларингіту та імуно-підтримуючі.
- Сільське господарство: тваринництво, добриво – підвищує родючість ґрунту [47].

Цинк сірчаноокислий позитивно впливає на процес росту, розвитку та врожайності сільськогосподарських рослин.

Рекомендовані дози внесення цинкового купоросу для позакореневого підживлення (на 10 л води) різних культур: декоративні, плодові та ягідні культури – 2-3 г $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ на 10 л води, огірки 3-5 г, капуста – 5 г, морква

та картопля – 10 г, помідори – 10-15 г, цукровий буряк – 10-20 г [48].

Найкраще сульфат цинку застосовувати на кислих (карбонатних), чорноземах, сіроземах, каштанових, піскових та бурих ґрунтах. Антагоністом цинкового купоросу є фосфор та азот.

При потраплянні в ґрунтовий покрив $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ розпадається на катіон – Zn^{2+} та аніон – SO_4^{2-} . Катіони цинку поглинаються коренями рослини двома способами: катіонний обмін – $pH < 7$ та хемосорбція – $pH > 7$. Кислотне ґрунтове середовище вилуговує іони цинку, лужне – зв'язує в стійкі форми та накопичує в середовищі [49].

Цинковий купорос не утворює токсинів, вибухо- чи пожежо-небезпечність. Але при потраплянні в організм через слизові оболонки, шкіру та ШКТ, викликає виразки, атрофії та ерозії. Захист при роботі з сульфатом цинку: гарна вентиляція приміщення, використання засобів індивідуального захисту органів дихання та шкіри. ГДК р.з. = 0,5 мг/м³ [48].

2.4 Ростовий тест рослин-фіторемедіантів

Рослини – найкращі індикатори забруднення довкілля, тому що вони найперші відчують та поглинають забруднювачі. Отже, за допомогою рослин найбільш зручно та точно можна оцінити екологічну ситуацію на конкретній території.

Ростовий тест складається з обліку змін показників проростання досліджуваної культури, вирощеної на індикаторних зразках води, ґрунту, субстратах тощо. Даний метод дозволяє оцінити вплив різних забруднювачів на життєздатність рослини (пригноблюючу або стимулюючу дію).

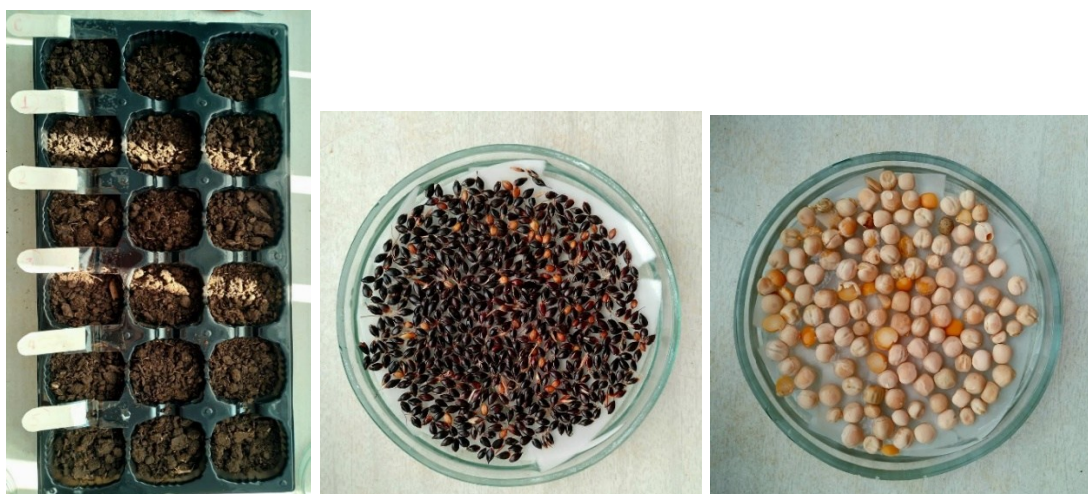
Перевагу віддають рослинам, які характерні для обраної території, мають гарні показники росту, витривалості та властивості до фіторемедіації [50].

Тривалість даного експерименту – 3 тижні (18.09.23-06.10.23).

Було обрано 2 тест-культури рослин-фіторемедіантів: Зернове сорго (*Sorghum bicolo*) та Горох посівний (*Pisum sativum*). В якості забруднювача, взято сіль цинку – цинковий купорос ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$).

При оцінці ростових показників для кожної з обраних 2 тест-культур у контейнерах з стаканами було взято ґрунт, далі його було просушено та зважено. Загалом для експерименту знадобилося 600 грам ґрунту.

В перший день дослідження (18.09.23) в кожному з 12 стаканів (по 6 стаканів для 2 тест-культур рослин-фіторемедіантів) насипаємо підготовлений ґрунт по 50 г, змочуємо їх по 20 мл води в кожному (загалом – 240 мл) та ставимо в місце з гарним освітлення на весь час тривалості експерименту. Далі в чашки Петрі кладемо фільтрувальний папір наливаємо 30 мл води та замочуємо приблизно 120-180 насінин обраних рослин-фіторемедіантів (рис. 2.1).



Підготовлений ґрунт

Зернове сорго

Горох посівний

Рисунок 2.1 – Підготовка ґрунту та насіння до експерименту

На другий день дослідження (19.09.23) садимо в підготовлений ґрунт по 20-30 насінин обраних рослин-фіторемедіантів (в залежності від розміру): зернове сорго – 30 насінин (загалом 180 насінин), горох посівний – 20 насінин (загалом 120 насінин) (рис. 2.2).

Для створення парникового ефекту затягуємо данні ємності харчовою плівкою до появи паростків (25.09.23) та проводимо провітрювання контейнера шляхом знімання плівки на декілька хвилин на день.



Рисунок 2.2 – Посадка насіння рослин-фіторемедіантів

Необхідною умовою для проведення даного дослідження є підтримка достатньої вологості для проростання насінин.

Готуємо розчин цинкового купоросу. Розраховуємо необхідну кількість солі цинку ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) з розрахунку, що в 1 мл розчину повинен бути 1 ГДК цинку (Zn), за умови ГДК цинку (Zn) = 300 мг/кг. За допомогою молярної маси цинку та цинкового купоросу, робимо пропорцію (форм 2.1) та знаходимо необхідне значення цинкового купоросу. Далі готуємо розчин – для цього відміряємо в хімічний стакан 33,12 г солі $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, додаємо 0,5 літра води, ретельно перемішуємо та фільтруємо даний розчин.

Молярна маса ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) 287,56 г/моль – Молярна маса (Zn) 65 г/моль

$$\text{Необхідна ГДК } (ZnSO_4 \cdot 7H_2O) \text{ X г} - \text{Необхідна ГДК (Zn) 15 г} \quad (2.1)$$

Схема експерименту передбачала внесення цинку в ґрунт дозами 0,5, 1, 2, 4 та 8 ГДК (Zn), що в перерахунку на елемент становило 150, 300, 600, 1 200 та 2 400 мг/кг ґрунту. Далі здійснюється полив 12 стаканів за наступною схемою (рис. 2.3):

- С – контроль – 20 мл чистої води
- 1 – 0,5 ГДК – 0,5 мл розчину $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ + 19,5 мл чистої води
- 2 – 1 ГДК – 1 мл розчину $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ + 19,0 мл чистої води
- 3 – 2 ГДК – 2 мл розчину $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ + 18,0 мл чистої води

- 4 – 4 ГДК – 4 мл розчину $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ + 16,0 мл чистої води
- 5 – 8 ГДК – 8 мл розчину $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ + 12,0 мл чистої води

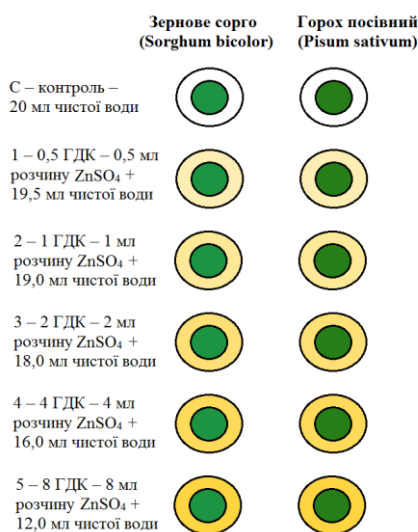


Рисунок 2.3 – Схема експерименту та концентрації поливу розчином цинкового купоросу ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)

Дати поливу розчином цинкового купоросу ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) 2 видів тест-культур рослин-фіторемедіантів в стаканах (рис. 2.4):

1. 21 вересня 2023
2. 25 вересня 2023
3. 27 вересня 2023
4. 29 вересня 2023
5. 02 жовтня 2023
6. 03 жовтня 2023
7. 04 жовтня 2023

Об'єм внесення поливу для одного стакану з 50 грамами ґрунту за один раз становить 20 мл (відміряємо за допомогою хімічного циліндра воду та за допомогою піпетки розчин $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (рис. 2.5)). За один раз поливу використовується 31 мл розчину цинкового купоросу.



21.09.2023



25.09.2023



27.09.2023



29.09.2023



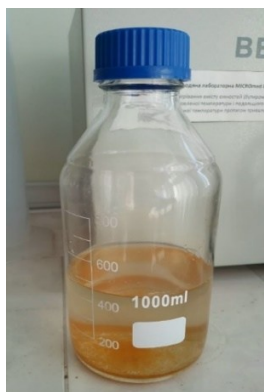
02.10.2023



04.10.2023



**Рисунок 2.4 – Ростові показники рослин-фіторемедіантів:
Зернового сорго (*Sorghum bicolor*) та Гороху посівного (*Pisum sativum*)**



Розчин ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) Електронна піпетка, циліндр, стакан

Рисунок 2.5 – Лабораторний посуд та розчин цинкового купоросу ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) використаний в ході експерименту

В кінці експерименту (06.10.2023) обережно виймаємо по 18 зразків рослин індикаторів з кожного стакана (загалом 12 стаканів, 6 – Зернове сорго, 6 – Горох посівний) та вимірюємо за допомогою лінійки довжину кореневої і стеблової системи паростків (рис. 2.6).



Зернове сорго (*Sorghum bicolor*)

Горох посівний (*Pisum sativum*)

Рисунок 2.6 – Вимірювання ростових показників Зернового сорго (*Sorghum bicolor*) та Гороху посівного (*Pisum sativum*)

Далі заносимо отримані дані у таблиці 2.4 та 2.5.

Таблиця 2.4 – Висота рослин (ВР) та довжина коренів (ДК) зразків Зернового сорго (*Sorghum bicolor*) за результатами вимірів зроблених 6 жовтня 2023 року

№	Зернове сорго (<i>Sorghum bicolor</i>)											
	Контроль		0,5 ГДК		1 ГДК		2 ГДК		4 ГДК		8 ГДК	
	ВР	ДК	ВР	ДК	ВР	ДК	ВР	ДК	ВР	ДК	ВР	ДК
1	13,5	6,2	15,3	8,3	18	9,1	10,5	6,8	7,1	5,2	5	3,5
2	13,1	6,8	14,9	7,7	17,6	8,5	10,9	7,2	6,5	4,9	5,9	3
3	14,5	6,4	16,2	9	19,3	10	11,4	6,3	7,3	5,8	5,2	3,9
4	13,1	6,6	13,4	7,9	19,5	9,6	10,7	8	6,9	4,7	5,8	3,1
5	14,2	6	14,6	8,3	18,6	8	12	7,5	6,3	5,3	5,5	3,4
6	13,8	6,3	14,8	8	17,1	8,9	11,3	7,9	7,4	6	6	3,7
7	13,4	6,8	15,9	8,8	18,8	9,7	10,9	6,4	8	5,5	5,7	3,2
8	14,1	6,2	12,8	8,7	16,9	9,9	10,6	7	7,7	4,4	5,2	3,8
9	13,3	7	15,3	8,2	17,7	8,6	11	7,2	6,8	4,8	5,3	3,3
10	14,9	6,5	15,4	8,9	17,4	9,2	10,5	6,8	6,5	5,7	5,9	3,6
11	13,2	6,3	13,3	7,7	19,5	8,3	11,7	6,5	7,1	5	5,4	3,9
12	15	6,9	14,5	8,5	20	8,7	10,8	6,7	7,6	5,1	5	3,2
13	13,1	6,7	15,8	7,4	18,7	10	10,6	7,1	7,9	4,6	5,3	3,5
14	13,8	6,2	12,9	7,9	19,3	9,8	10,4	7,9	6,2	5,9	5,5	4
15	14,4	6,5	17	8,6	18,2	8,4	11,2	6	7,5	4,8	5,1	3,1
16	13,6	6,1	16,3	7,2	19,7	9,1	10,9	7,3	6,8	5,4	5,6	3,7
17	14,1	6,7	15,6	8,9	16,8	8,8	11,5	6,9	6,7	5,7	5,8	3,3
18	14,8	6,9	14,7	8,4	18,9	9	11,7	6,6	7,9	5,5	6	3,5

Таблиця 2.5 – Висота рослин (ВР) та довжина коренів (ДК) Гороху посівного (*Pisum sativum*) за результатами вимірів зроблених 6 жовтня 2023 року

№	Горох посівний (<i>Pisum sativum</i>)											
	Контроль		0,5 ГДК		1 ГДК		2 ГДК		4 ГДК		8 ГДК	
	ВР	ДК	ВР	ДК	ВР	ДК	ВР	ДК	ВР	ДК	ВР	ДК
1	14,5	7,5	15,6	6,5	18,7	7,4	15,3	6,1	8,2	5,5	5,3	4
2	12,7	8,5	17,3	7,6	19,2	8,2	16,8	6,8	9,4	5,9	5,9	3,1
3	13,6	7,8	16,4	7,4	20,5	7,9	15,7	7	8,7	6,5	5,2	3,7
4	12,1	8,2	17,5	7,1	21,6	7,6	16,5	6,5	10	5,2	5,3	3,3
5	14,6	8,4	18	6,7	18,9	7,7	15,5	6,9	8,4	5,8	5,9	3,5
6	14,9	8,6	16,7	7,3	22	7,3	16,9	6,2	7,7	5,5	5,2	3,7
7	13,8	7,8	16,4	6,9	20,3	8,5	15,6	6,4	9,3	6	5,8	3,9
8	14,3	9	17,1	6,6	19,4	7,1	16,5	6,3	8,2	5,7	5,5	3,6
9	14,5	7,6	16,5	8	21,1	7,8	15,7	6,8	8,8	5,3	5,3	3,7
10	15	8,3	17,9	7,4	18,7	7,2	15,4	6,5	8,5	5,8	5,6	3,8
11	14,7	8,6	17,4	7,2	20,5	8,3	17	6,7	9,6	5,6	5,8	3,6
12	14,4	7,7	16,5	6,8	21,3	7,1	15,6	6,6	8,4	5	6	3,5
13	13,6	7,9	17,8	6,5	19,7	7,5	15,8	6,9	7,9	6,5	5,6	3,2
14	14,8	8,1	16,9	7,5	20,2	7,8	16,3	6,3	9,2	5,7	5,9	3,8
15	14,4	8,5	17,2	7,1	18,6	8,1	15,4	6,7	7,3	5,9	5,2	3,3
16	13,7	8,3	15,9	6,9	21,8	7,6	16,9	6,2	7,6	5,3	5,4	3,6
17	13,9	7,7	15,7	7,5	20,4	7,7	16,4	6,6	9,5	6,1	5,8	3,9
18	14,2	8,9	16,3	7,3	19,6	8,4	15,7	6,9	8,7	5,4	5,5	3,2

Отримавши дані після вимірювань з кожної з обраних 2 тест-культур рослин-фіторемедіантів (зернове сорго та горох посівний) в кінці експерименту з досліджуваних зразків (по 18 для кожної концентрації цинку + контроль) обчислюють середню довжину надземної та кореневої частини і

середньо арифметичне відхилення $\bar{x} \pm m$ [50], де m – середньо арифметичне відхилення, яке обчислюється за формулою:

$$m = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (2.2)$$

де N – кількість зразків $n-1$,

σ^2 – дисперсія.

Використовуючи дані з таблиць 2.4 та 2.5 розраховуємо за формулою 2.2 середньо арифметичні висоти рослин і довжини корінців, середньо арифметичне відхилення та дисперсію, для кожної концентрації цинку + контроль обраних рослин-фіторемедіантів (зернове сорго та гороху посівного) за результатами вимірів зроблених 6 жовтня 2023 року. Заносимо результати розрахунків показників двох обраних тест-культур у таблиці 2.6-2.7.

Таблиця 2.6 – Середні арифметичні висоти рослин та довжини коренів, стандартне відхилення та дисперсія для Зернове сорго (*Sorghum bicolor*)

Концентрація цинку	Показник	σ^2	$\bar{x} \pm m$
Контроль	Висота рослин, см	0,44	13,88 +/- 0,16
	Довжина коренів, см	0,08	6,51 +/- 0,07
0,5 ГДК	Висота рослин, см	1,43	14,93 +/- 0,29
	Довжина коренів, см	0,29	8,24 +/- 0,13
1 ГДК	Висота рослин, см	1,06	18,44 +/- 0,25
	Довжина коренів, см	0,38	9,09 +/- 0,15
2 ГДК	Висота рослин, см	0,25	11,03 +/- 0,12
	Довжина коренів, см	0,33	7,01 +/- 0,14
4 ГДК	Висота рослин, см	0,33	7,12 +/- 0,14
	Довжина коренів, см	0,25	5,24 +/- 0,12
8 ГДК	Висота рослин, см	0,11	5,51 +/- 0,08
	Довжина коренів, см	0,08	3,48 +/- 0,07

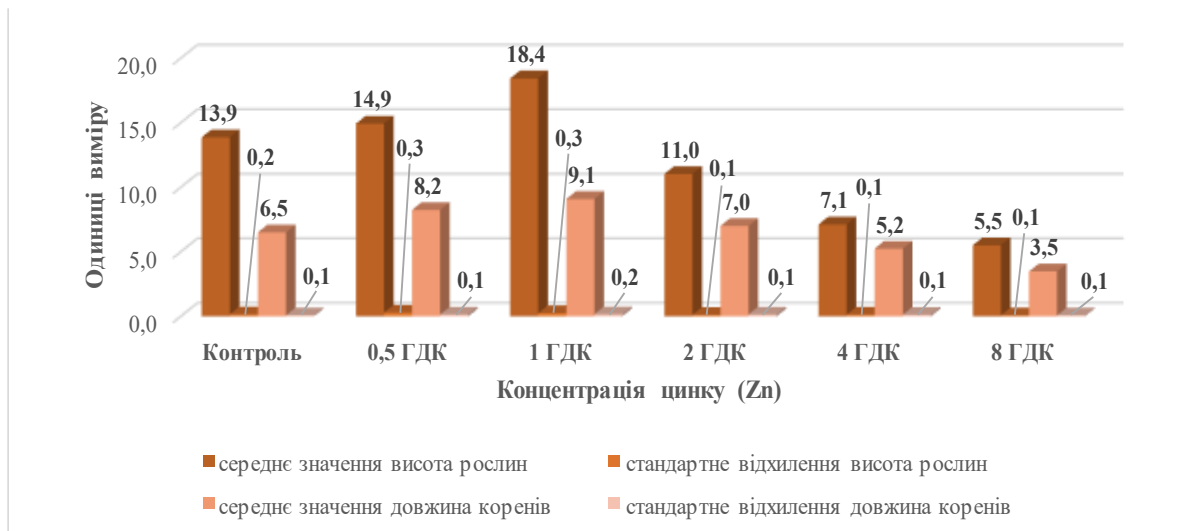
Таблиця 2.7 – Середні арифметичні висоти рослин та довжини коренів, стандартне відхилення та дисперсія для Гороху посівного (*Pisum sativum*)

Концентрація цинку	Показник	σ^2	$\bar{x} \pm m$
Контроль	Висота рослин, см	0,55	14,09 +/- 0,18
	Довжина коренів, см	0,21	8,19 +/- 0,11
0,5 ГДК	Висота рослин, см	0,55	16,84 +/- 0,18
	Довжина коренів, см	0,17	7,13 +/- 0,10
1 ГДК	Висота рослин, см	1,24	20,14 +/- 0,27
	Довжина коренів, см	0,21	7,73 +/- 0,11
2 ГДК	Висота рослин, см	0,33	16,06 +/- 0,14
	Довжина коренів, см	0,08	6,58 +/- 0,07
4 ГДК	Висота рослин, см	0,55	8,63 +/- 0,18
	Довжина коренів, см	0,17	5,71 +/- 0,10
8 ГДК	Висота рослин, см	0,08	5,57 +/- 0,07
	Довжина коренів, см	0,06	3,58 +/- 0,06

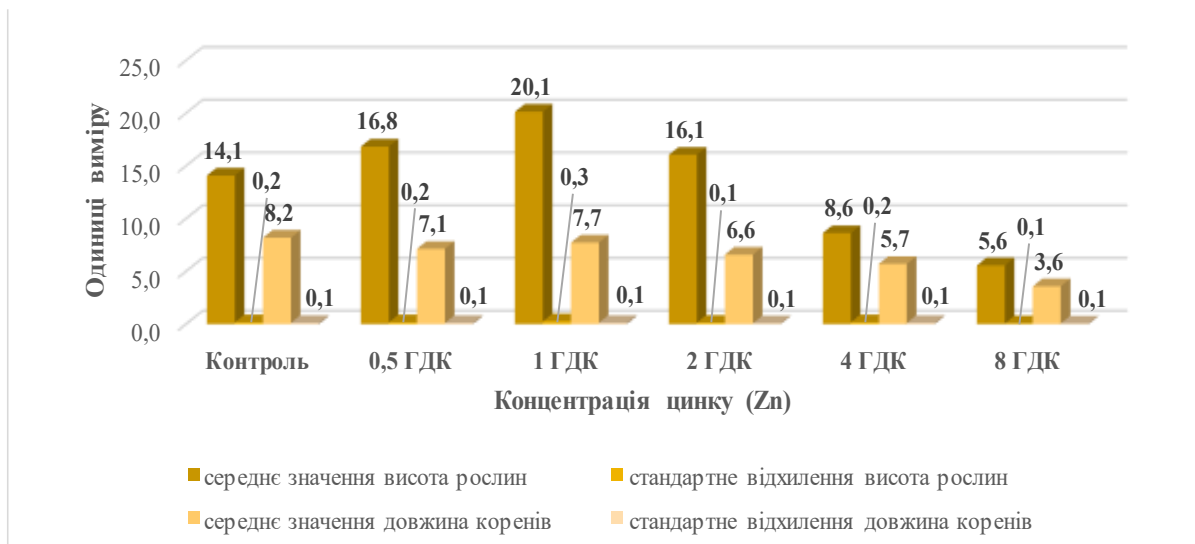
На основі розрахованих даних будемо графіки результатів розрахунків показників ростового тесту (середнє значення, дисперсія, стандартне відхилення) Сорго звичайного (*Sorghum bicolor* L.) та Гороху посівного (*Pisum sativum*) від концентрацій цинку (Zn) (рис. 2.7-2.14).

На рисунку 2.7 показано ростові показники Зернового сорго від концентрацій цинку. Отже, найопимальніші показники висоти рослин та довжини коренів отримані при концентрації цинку в 1 ГДК (висота рослин: середнє значення = 18,4 см, стандартне відхилення = 0,3; довжина коренів: середнє значення = 9,1 см, стандартне відхилення = 0,2).

На рисунку 2.8 показано ростові показники Гороху посівного від концентрацій цинку.



**Рисунок 2.7 – Вплив концентрацій цинку (Zn) на ростові показники
Зернового сорго (*Sorghum bicolor*)**



**Рисунок 2.8 – Вплив концентрацій цинку (Zn) на ростові показники
Гороху посівного (*Pisum sativum*)**

Отже, найоптимальніші показники висоти рослин та довжини коренів отримані при концентрації цинку в 1 ГДК (висота рослин: середнє значення = 20,1 см, стандартне відхилення = 0,3; довжина коренів: середнє значення = 7,7 см, стандартне відхилення = 0,1).

Найбільше середнє значення Зернового сорго висоти рослин спостерігається при 1 ГДК цинку – 18,4 см, а найнижче при 8 ГДК – 5,5 см.

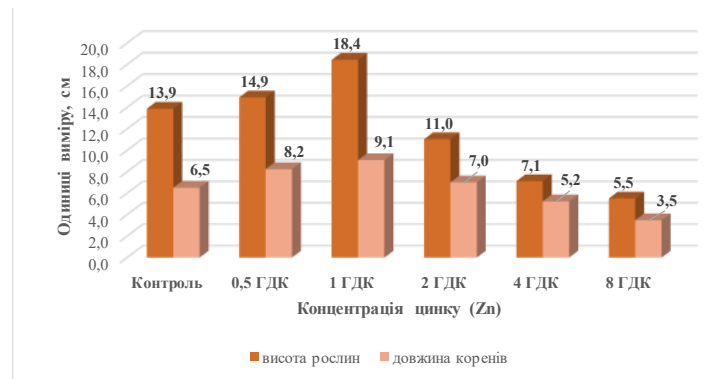


Рисунок 2.9 – Середнє значення ростових показників Зернового сорго (*Sorghum bicolor*)

Найбільше середнє значення довжини коренів спостерігається при 1 ГДК цинку – 9,1 см, а найнижче при 8 ГДК – 3,5 см.

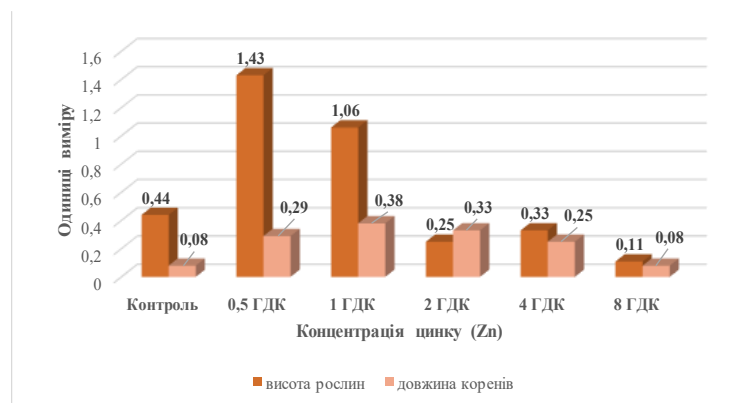


Рисунок 2.10 – Дисперсія ростових показників Зернового сорго (*Sorghum bicolor*)

Найбільша дисперсія Зернового сорго висоти рослин спостерігається при 0,5 ГДК цинку – 1,43, а найнижча при 8 ГДК – 0,11. Найбільша дисперсія довжини коренів спостерігається при 1 ГДК цинку – 0,38, а найнижча при Контролі та 8 ГДК – 0,08.

Найбільше середнє значення Зернового сорго висоти рослин спостерігається при 1 ГДК цинку – 18,4 см, а найнижче при 8 ГДК – 5,5 см.

Найбільше стандарте відхилення Зернового сорго висоти рослин спостерігається при 0,5 ГДК цинку – 0,29, а найнижче при 8 ГДК – 0,08.

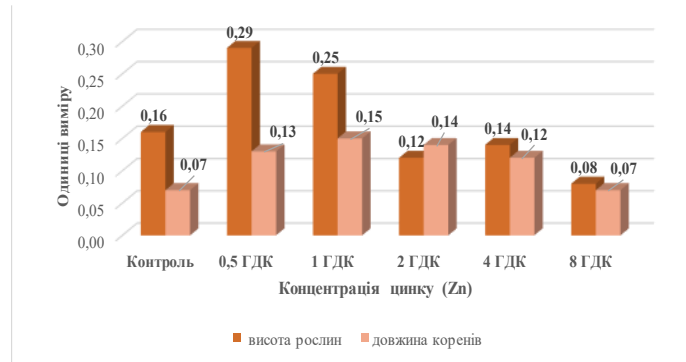


Рисунок 2.11 – Стандартне відхилення ростових показників Зернового сорго (*Sorghum bicolor*)

Найбільше стандартне відхилення довжини коренів спостерігається при 1 ГДК цинку – 0,15, а найнижче при Контролі та 8 ГДК – 0,07.

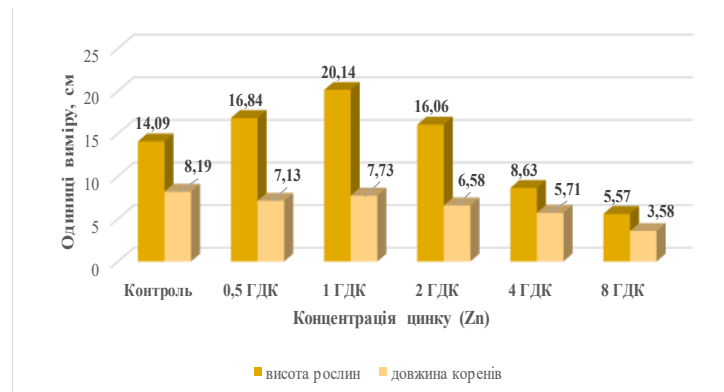


Рисунок 2.12 – Середнє значення ростових показників Гороху посівного (*Pisum sativum*)

Найбільше середнє значення Гороху посівного висоти рослин спостерігається при 1 ГДК цинку – 20,14 см, а найнижче при 8 ГДК – 5,57 см. Найбільше середнє значення довжини коренів спостерігається при 1 ГДК цинку – 7,73 см, а найнижче при 8 ГДК – 3,58 см.

Найбільша дисперсія Гороху посівного висоти рослин спостерігається при 1 ГДК цинку – 1,24, а найнижча при 8 ГДК – 0,08. Найбільша дисперсія довжини коренів спостерігається при 1 ГДК цинку – 0,21, а найнижча при 8 ГДК – 0,06.

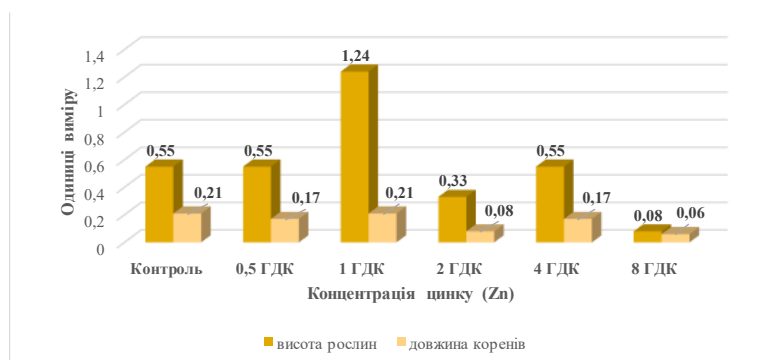


Рисунок 2.13 – Дисперсія ростових показників Гороху посівного (*Pisum sativum*)

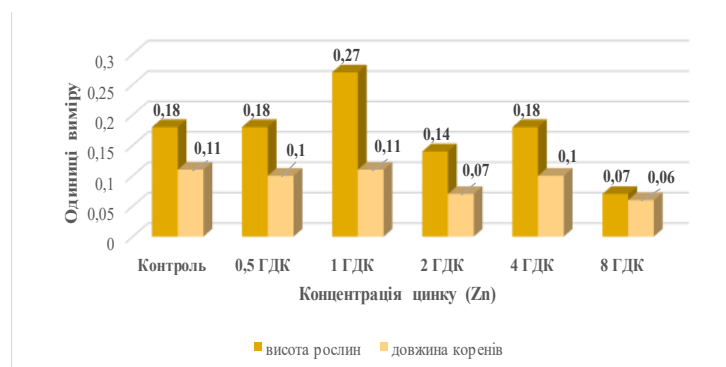


Рисунок 2.14 – Стандартне відхилення ростових показників Гороху посівного (*Pisum sativum*)

Найбільше стандарте відхилення Гороху посівного висоти рослин спостерігається при 1 ГДК цинку – 0,27, а найнижче при 8 ГДК – 0,07. Найбільше стандарте відхилення довжини коренів спостерігається при 1 ГДК цинку – 0,11, а найнижче при 8 ГДК – 0,06.

Також визначаємо фітотоксичний ефект у % (формула 2.3) за довжиною коренів та висотою рослин-фіторемедіантів:

$$\Phi E = \frac{M_o - M_x}{M_o} * 100, \% \quad (2.3)$$

де M_o – значення обраного параметра рослини з посуду із контрольним розчином (в даному випадку – вода),

M_x – значення обраного параметра рослини з посуду із досліджуваним розчином (розчин цинкового купоросу ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)) [50].

Заносимо результати розрахунків показників двох обраних тест-культур у таблицю 2.8.

Таблиця 2.8 – Фітотоксичний ефект ростових показників Зернового сорго та Гороху посівного від концентрацій цинку (Zn)

Концентрація цинку (Zn)	Параметр рослинної біомаси	Фітотоксичний ефект, %	
		Зернове сорго (Sorghum bicolor)	Горох посівний (Pisum sativum)
0,5 ГДК	Висота рослин	-7,56 %	-19,52 %
	Довжина коренів	-26,57 %	12,94 %
1 ГДК	Висота рослин	-32,85 %	-42,94 %
	Довжина коренів	-39,63 %	5,62 %
2 ГДК	Висота рослин	20,53 %	-13,98 %
	Довжина коренів	-7,68 %	19,66 %
4 ГДК	Висота рослин	48,70 %	38,75 %
	Довжина коренів	19,51 %	30,28 %
8 ГДК	Висота рослин	60,30 %	60,47 %
	Довжина коренів	46,54 %	56,29 %

На основі розрахованих даних будемо графік результатів розрахунків фітотоксичного ефекту Зернового сорго (*Sorghum bicolor*) та Гороху посівного (*Pisum sativum*) від концентрацій цинку (Zn) (рис. 2.15-2.18).

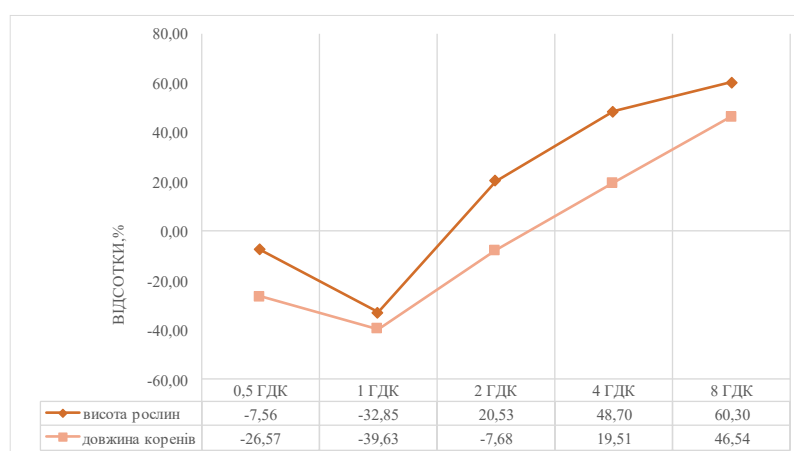


Рисунок 2.15 – Фітотоксичний ефект у відсотках ростових показників Зернового сорго (*Sorghum bicolor*) від концентрацій цинку (Zn)

На рисунку 2.15 показано фітотоксичний ефект від концентрацій цинку для Зернового сорго, найбільший відсоток 60,3 % та 46,54 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 8 ГДК цинку, а найменший відсоток -32,85 % та -39,63 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 1 ГДК цинку.

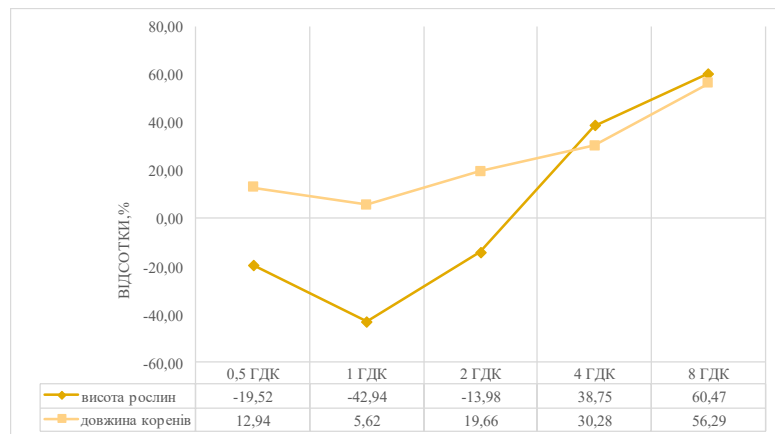


Рисунок 2.16 – Фітотоксичний ефект у відсотках ростових показників Гороху посівного (*Pisum sativum*) від концентрацій цинку (Zn)

На рисунку 2.16 показано фітотоксичний ефект від концентрацій цинку для Гороху посівного, найбільший відсоток 60,47 % та 56,29 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 8 ГДК цинку, а найменший відсоток -42,94 % та 5,62 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 1 ГДК цинку.

На даному графіку (рис. 2.17) показано, що найбільший фітотоксичний ефект від цинку за висотою рослин спостерігається при перевищенні ГДК цинку в 8 раз (Зернове сорго – 60,30 %, Горох посівний – 60,47 %), а найменший – при 1 ГДК цинку (Зернове сорго – -32,85 %, Горох посівний – -42,94 %).

На даному графіку (рис. 2.18) показано, що найбільший фітотоксичний ефект від цинку за довжиною коренів спостерігається при перевищенні ГДК цинку в 8 раз (Зернове сорго – 46,54 %, Горох посівний – 56,29 %), а

найменший – при 1 ГДК цинку (Зернове сорго – -39,63 %, Горох посівний – 5,62 %).

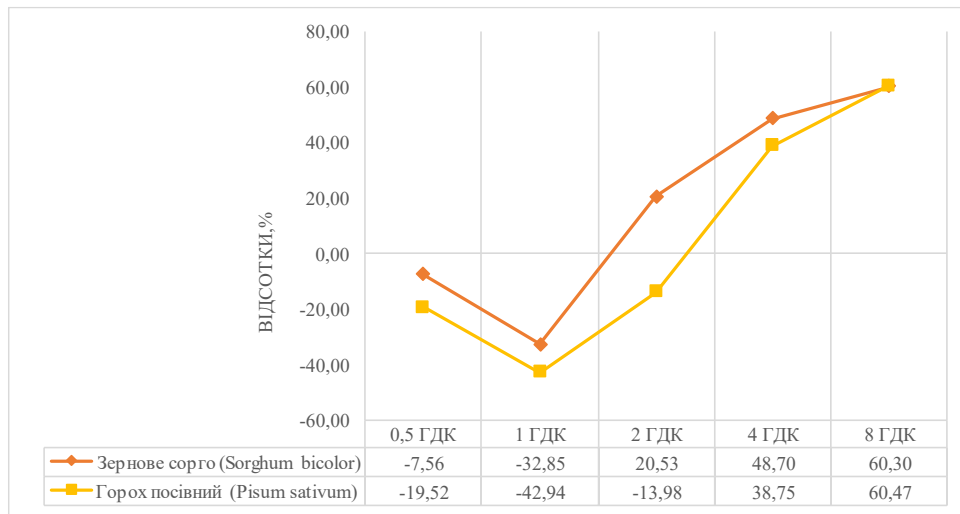


Рисунок 2.17 – Фітотоксинний ефект у відсотках за висотою паростків рослин-індикаторів (Зернового сорго (*Sorghum bicolor*) та Гороху посівного (*Pisum sativum*)) від концентрацій цинку (Zn)

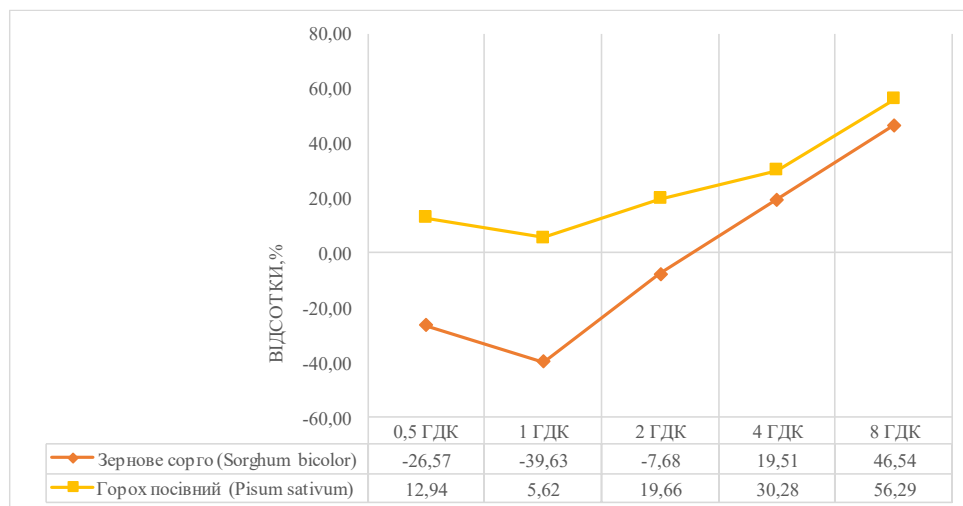


Рисунок 2.18 – Фітотоксинний ефект у відсотках за довжиною коренів рослин-індикаторів (Зернового сорго (*Sorghum bicolor*) та Гороху посівного (*Pisum sativum*)) від концентрацій цинку (Zn)

Отже, найоптимальнішою концентрацією цинку в ґрунті для Зернового сорго та Гороху посівного є 1 ГДК. При даній концентрації спостерігаються

найвищі показники середніх значень висоти рослин та довжини коренів. При 0,5 ГДК, Контроль та 2 ГДК спостерігається вже менший об'єм біомаси, як наземної, так кореневої частини. При 4 ГДК вже ростові показники рослин-фіторемедіантів зменшилися більше ніж в 2 рази. А при 8 ГДК спостерігається вже зменшення висоти рослин та довжини коренів майже в 3 рази. Також при 4 ГДК та 8 ГДК рослини-фіторемедіанти поступово чезнуть та майже не відбувається розвиток біомаси.

Данні спостереження підтверджені розрахунками фітотоксичного ефекту від концентрацій цинку для Зернового сорго та Гороху посівного.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ФІТОРЕМЕДАЦІЇ ТА ФІТОМАЙНІНГУ ДЛЯ ТЕРИТОРІЙ ЗАБРУДНЕНИХ ЦИНКОМ

3.1 Фіторемедіація територій забруднених цинком

Фіторемедіація проводиться аналізом показників ґрунтового покриву та підбором до відповідних умов трав'яної, чагарникової та деревної рослинності.

Заходи фіторемедіації для покращення якості та родючості ґрунту:

- Проведення аналізу стану ґрунту та оцінка вмісту забруднень.
- Впровадження системи сівозміни.
- Попередження ерозії та впровадження заходів з меліорації.
- Мінімальне використання мінеральних добрив.

Основні цілі фіторемедіації:

1. Зменшення розповсюдження забруднення в довкіллі (фітостабілізація).
2. Очищення ґрунтового покриву та покращення його якостей (фітоестракція та фітофільтрація).
3. Добуток цінних металів з ґрунту (фітомайнінг).

Основні етапи фіторемедіації:

1. Засипання токсичних земель шаром глини завтовшки 0,5 метри.
2. Перекриття шаром 1,5-2 метри родючого ґрунту (зазвичай чорноземом).
3. Висівання багаторічних трав оптимальних для даних умов та здатних акумулювати метали з ґрунтового покриву.
4. Вирощення протягом мінімум 5-10 років рослинного покриву, який покращить характеристики та відновить родючість ґрунту.
5. Після данні території готові до інтенсивного використання.

Фітомеліоративний покрив має основні стадії:

1. Піонерні угруповання (початкові).
2. Поява авангардних одно- і багаторічних трав'янистих видів.
3. Поява авангардних чагарників та дерев.
4. Розвиток едифікаторних, субедифікаторних та аксетаторних дерев, що з трав'яним покривом сформують стійкій біорізноманітний фітоценоз.

Для степової зони використовують три групи трав'янистих рослин-фіторемедіантів:

1. Злакові культури, що мають велику кореневу систему та є екологічно невибагливими. Найбільш розповсюджені злакові: столокос безостий (*Bromopsis inermis*), пирій безкореневишний (*Agropyrum tenerum* Vessey), костриця червона (*Festuca rubra* L.).

2. Бобові культури, що насичують ґрунт молекулярним азотом. Найбільш розповсюджені бобові: конюшина повзуча (*Trifolium repens*), люцерна посівна (*Medicago sativa*), буркун білий (*Melilotus albus*).

3. Галофіти, що стійкі до засоленних ґрунтів.

В якості авангардних трав'янистих видів рекомендують разом застосовувати трав'янисті рослини родини злакові (Poaceae) та бобові (Fabaceae). Бобові швидко створюють трав'яний покрив та фіксують кореневищами азот, тим самим покращуючи якість ґрунту. Злакові мають гарно розвинену кореневу систему, тим самим добре стримує ерозійні процеси.

В якості авангардних деревних видів рекомендують використовувати: тополя, осику, березу, вербу, акацію, клен, вільху, сосну, модрина. Вони мають високі показники біологічної стійкості (поухо-, морозостійкість, швидкі темпи росту, невибагливість, меліоративні властивості) [4].

Досліджено, що 200 ц біомаси бобових культур дорівнюють 20 т органічного добрива. Тобто використання біомаси бобових в якості сидератів підвищить врожайність та якість не тільки зернових культур (5-10 ц/га), а й сільськогосподарських культур: кормових буряків (150-200 ц/га), кукурудзи

(60-70 ц/га), цукрових буряків та картоплі (30-50 ц/га), льону (3-5 ц/га).

Сидерат – це «зелене добриво», рослини, які вирощують для територіях (з подальшим закопуванням в ґрунт на піку дозрівання) для покращення та/або відтворення якості та родючості ґрунтового покриву. Їх можна сіяти, як для відновлення/відпочинку, так і до/після посадки та збору врожаю. Данна практика відноситься до сталого, органічного та відновлюваного ведення сільського господарства.

Рослинна біомаса, в якості «зеленого добрива», допомагає ґрунту виконувати фітосанітарні властивості (таблиця 3.1):

- тримати вологу під час посухи та не перегріватися під час високих температур,
- покращує на 12-15 % агрономічні властивості (органічні, мінеральні, фізичні та хімічні),
- зменшує на 30-40 % ризик виникнення ерозії та потрапляння речовин в підземні води,
- на 15-25 % зменшується враження хворобами,
- підвищується на 10-20 % активність мікрофауни ґрунтового покриву,
- на 40-50 % зменшується кількість бур'янів при подальшому інтенсивному використанні даної території.

Найбільш популярними сумішами сидеральними культурами є: зернобобові суміші, жито та олійна редька, горох та гірчиця, горох та овес, овес та люпин, овес та вика, суміші ярих культур, також використовують люпин, ріпак, фацелію, гречку, ячмінь, вику [51].

Рекультивация територій забрудненими важкими металами (показники вмісту металу в ґрунті в десятки разів більше ГДК) є найбільш складною. Види рослин стійких до вмісту важких металів в ґрунтовому покриві: тополя духмяна/бальзамічна, бузина червона, бузок угорський, жимолость татарська, пирій повзучий, грястиця збірна, вівсяниця червона, вівсюг луговий/звичайний, кострець безостий, латук звичайний, синяк татарський,

польовий в'юнок, мати-й-мачуха.

Таблиця 3.1 – Фітосанітарні властивості сидеральних культур [51]

Сидеральні культури	Фітосанітарні властивості
Жито, буркун, фацелія, овес, вика, конюшина, люпин, ріпак, гірчиця, гречка, редька масляниста	Захист від водної та вітрової ерозії
Люцерна, люпин, житниця, жито, буркун, ріпак, гречка, гірчиця, редька масляниста	Контролювання водного та повітряного режиму ґрунтового покриву
Жито, конюшина, люпин, ріпак, гірчиця, буркун, редька масляниста	Зменшення вимивання поживних речовин в підземні горизонти
Горох, конюшина, люпин, люцерна, буркун, еспарцет, вика	Насичення азотом ґрунту
Люцерна, люпин, гречка, овес, фацелія	Зменшують кислотність ґрунту
Сорго, буркун	Зменшення засолення ґрунту
Жито, житниця, люцерна, суріпиця, фацелія, гречка, горох, гірчиця	Зменшення кількості бур'янів
Овес, конюшина, суріпиця, буркун, фацелія, ріпак, люцерна, гірчиця, редька масляниста	Оздоровлення ґрунтового покриву
Гірчиця, буркун, фацелія, суріпиця, овес, жито, конюшина, люпин, ріпак, гречка, редька масляниста	Захищають від виникнення хвороби
Гірчиця, конюшина, жито, люпин, суріпиця, овес	Перетворення нерозчинних сполук у легкопоглинаючі рослинами форми

Рослини поглинають кореневою системою з ґрунтового покриву важкі метали, а потім накопичують їх в біомасі (пагонах або корінні) – фітоестракція.

Даний процес фітоекстракції має наступні аспекти:

1. Зв'язування важких металів в ґрунтовому покриві (хелатування).
2. Абсорбція іонів важких металів кореневою системою.
3. Транспорт поглинутих важких металів кореневою системою до пагонів (зокрема вакуоль).
4. Толерантність до накопичення металу рослиною.

Біодоступність важких металів в ґрунтовому покриві буває:

- Природна – умови середовища (рН, склад ґрунту, вологість і т.д.).
- Індукована – хелатуючі агенти або фітохелати (сульфат амонію, лимонна кислота, етилендіамінтетраоцтова кислота і т.д.).

Фітохелати – амінокислоти цистеїну багаті сульфгідрильними групами, що об'єднують іони важких металів в стійкі комплекси. Таким чином дані комплекси (важкі метали з амінокислотами, органічними кислотами, пептидами) легше поглинаються кореневою системою рослини, для подальшого вилучення їх з ґрунту.

На доступність цинку рослинами впливають:

- рН ґрунту,
- вміст гідроксидів алюмінію та заліза,
- вміст органіки в ґрунті,
- гранулометричний склад ґрунтового покриву,
- наявність глини.

Таблиця 3.2 – Характеристика біогеохімічних властивостей цинку [4]

Властивість	Характеристика
Клас небезпеки	Високо небезпечний
Біодоступність	Легкодоступний
Біохімічна активність	Висока

Токсичність	Помірна
Органічна форма розповсюдження	Висока
Рухомість	Помірна
Ефективність накопичення	Висока
Схильність до гідролізу	Висока
Розчинність сполук	Висока

Таблиця 3.3 – Імобілізатори цинку з ґрунтового покриву [4]

Органічні	Неорганічні
Пташиний послід, лігнін (стічні води паперової промисловості)	Вапно, зола (ТЕС), фосфати, шлак (ТЕС), гідроксилапатит, цементний пил

При надходженні в рослину цинку (Zn) вчені виявили ген ZNT1, який відповідав за транслокацію цинку [4].

Кількість рухомого цинку в ґрунті сягає близько 1 % від його валового вмісту. Найбільш поширені: Zn^{2+} , $ZnCO_3$, $Zn(OH)_2$ та $Zn_3(PO_4)_2$ (рис. 3.1).

В ґрунтовому покриві розрізняють кілька форм цинку: водорозчинні, кислото-розчинні, фіксовані, легкорозчинні та міцно-фіксовані. Рослинами поглинаються тільки водорозчинні, що знаходяться в наступних солях та кислотах: сірчаної ($ZnSO_4$), азотної ($ZnNO_3$) та соляної ($ZnCl_2$) [52].

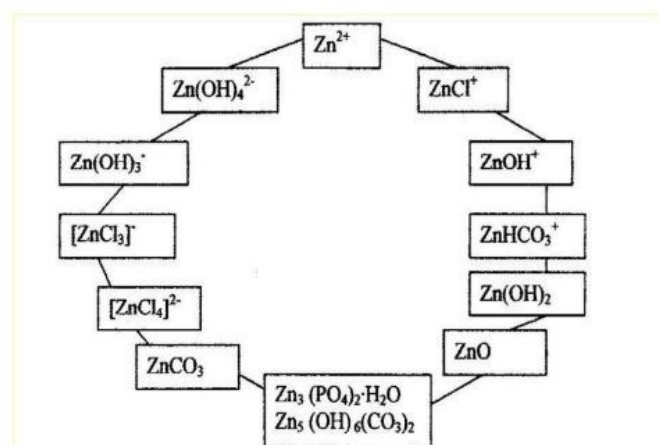


Рисунок 3.1 – Форми цинку в ґрунті, придатні до фітоекстракції



Рисунок 3.2 – Схема фіторемедіації територій забруднених цинком

Серед дерев, які поглинають цинк та зменшують його концентрації в навколишньому середовищі, варто виділити: Тополя чорна (*Populus nigra* L.), Осика (*Populus tremula* L.), Верба біла (*Salix alba* L.), Клен червоний (*Acer rubrum* L.), Сосна Веймута (*Pinus strobus* L.), Ялина європейська (*Picea abies*) [4].

Серед піонерних трав'янистих рослин, які найбільше накопичують цинк, використовують злакові (20-50 мг/кг Zn).

Серед сільськогосподарських культур для фіторемедіації територій забруднених цинком використовують Зернове сорго (*Sorghum bicolor*), яке гарно поглинає цинк (Zn), залізо (Fe), мідь (Cu) та кадмій (Cd) з ґрунту.

Сорго може зростати в степовій та лісостеповій зоні, а завдяки своїй посухостійкості зможе витримати даний клімат.

Таблиця 3.4 – Фітомеліоративні властивості дерев, що поглинають цинк [4]

Дерево	Вибагливість до вологи	Геліофільність (відношення до світла)	Відношення до температур	Відношення до багатства ґрунту
Тополя чорна (Populus nigra L.)	Мезофіт (середньо вибагливі)	Світлолюбива	Морозостійкі (-25)	Мезотрофи (середньо вибагливі)
Осика (Populus tremula L.)	Мезофіт (середньо вибагливі)	Світлолюбива	Досить морозостійкі (-35)	Мезотрофи (середньо вибагливі)
Верба біла (Salix alba L.)	Мезофіт (середньо вибагливі)	Світлолюбива	Помірної морозостійкості (-15)	Оліготрофи (мало вибагливі)
Клен червоний (Acer rubrum L.)	Ксеромезофіт (невимогливі)	Тіньовитривала	Морозостійкі (-25)	Мегатрофи (вибагливі)
Сосна Веймута (Pinus strobus L.)	Ксерофіт (мало вибагливі)	Напівтіневитривали	Досить морозостійкі (-35)	Оліготрофи (мало вибагливі)
Ялина європейська (Picea abies)	Ксерофіт (мало вибагливі)	Напівтіневитривали	Досить морозостійкі (-35)	Оліготрофи (мало вибагливі)

Вирощення сорго на територіях після сільськогосподарської діяльності, видобутку корисних копалин та їх переробки є гарним способом фіторе mediaції земель з можливістю подальшого вирощення на них культур (зокрема зернових).

1 гектар сорго поглинає до 55 тон вуглекислого газу CO₂ та виробляє приблизно 40 тон кисню (O₂) за вегетаційний період – 125-135 днів [4].

Отже, пропонується наступна схема рослинного покриття фітореMediaції забрудненої цинком території.

Пропонована схема співвідношення рослинного покриття для фітореMediaції територій забруднених цинком: 70-80 % багаторічні трави, 10-20 % однорічні трави, 5-10 % дерева, 0-5 % чагарники.

Найбільш стійким (з екологічного та економічного боку) є змішування деревних культур. Приблизне співвідношення: 70-90 % головних порід, 10-20 % другорядних, 10-20 % чагарників.

Пропонований склад рослинного покриття (рис. 3.2):

- Багаторічні трави (80% злакові культури, 20 % бобові) – зернове сорго, пирій повзучий, грястиця збірна, конюшина повзуча, вівсяниця червона.
- Однорічні трави (50% злакові культури, 50 % бобові) – горох посівний, буркун білий, пирій однорічний.
- Деревя – головні: тополя чорна та верба біла, другорядні: осика та клен червоний.

Пропонується насадження авангардних деревних порід щільністю 1,25 x 1,25 м (чим складніша територія фітореMediaції, тим щільніше насадження від 0,75 x 0,75 до 2,5 x 2,5 м.).

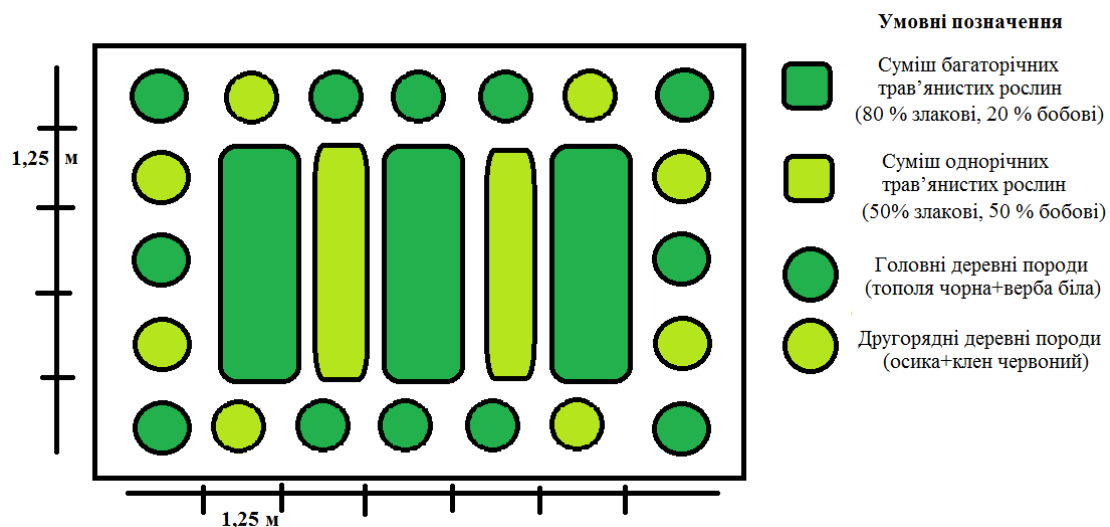


Рисунок 3.3 – Склад рослинного покриття для фітореMediaції територій забрудненої цинком

Дані види рослин здійснюють, як ландшафтно-декоративне покращення території, так і санітарно-гігієнічне очищення забруднених земель. Багаторічні та однорічні трав'янисті культури є зеленим фільтром та створюють біогеохімічний бар'єр для попередження розповсюдження цинку в довкілля.

3.2 Розрахунок потенційної біомаси Зернового сорго для фітореMediaції техногенних територій

Прогноз рослинної біомаси використовують для експертних оцінок чи емпіричних залежностей для рекультивації (фітореMediaції) техногенно змінених територій. Даний спосіб дає можливість прогнозувати кількість та якість біомаси за певний проміжок часу.

На формування рослинної біомаси впливає багато чинників, які важко достовірно передбачити:

- температура,
- вологість (особливо в період вегетації),
- густина схожості рослин,
- виникнення хвороб,
- метеорологічні явища та інші.

Одним з головних показників в розрахунку потенційної біомаси є коефіцієнт рослинного покриву ($K_{рп}$). На даний коефіцієнт впливає як природні (метеорологічні явища, температура, вологість, т.д.), так і техногенні чинники (зміна структури ґрунту, забруднення токсичними речовинами (важкі метали, радіонукліди, нафтопродукти, пестициди, гербіциди, т.д.)). Тому достовірно передбачити дану величину складно.

За формулою 3.1 розраховуємо потенційну біомасу (урожай) Зернового сорго при оптимальних метеорологічних умов, в ц/га у сухому стані.

$$ПУ = K_{\phi} \cdot K_{T} \cdot K_{рп} \cdot \frac{\sum Q}{q}, \text{ ц/га} \quad (3.1)$$

де K_ϕ – коефіцієнт фотосинтетично активної радіації (ФАР), за А.О. Ничипровичем (в даному розрахунку – 0,04),

K_m – коефіцієнт відношення наземної і кореневої частини рослини, що відображає частку фотосинтетично активної частини в біомасі рослини (в даному розрахунку – 0,6),

K_{pn} – коефіцієнт рослинного покриття території від 0 % до 100 %,

ΣQ – кількість ФАР за період вегетації, за М.Ф. Цупенко, кДж/га або ккал/га,

q – калорійність сухої біомаси, кДж/га або ккал/га.

Потім розраховуємо за формулою 3.2 біомасу Зернового сорго з природньою вологістю.

$$P_{\text{вол}} = \frac{P_{\text{сух}}}{(100-W)} \cdot 100\% , \text{ кг/м}^2 \quad (3.2)$$

де W – вологість біомаси рослини, %.

Кількість фотосинтетично активної радіації для Дніпропетровської області розраховується за період з травня по серпень: $31,4 + 33,6 + 34,3 + 29,8 = 129,1$ кДж/см².

Калорійність Зернового сорго становить 4,5 ккал/га або 18 828 кДж/га.

Вологість біомаси Зернового сорго становить 14 %.

Результати розрахунків заносимо в таблицю 3.5. Отримані дані зображуємо на графіках (рис. 3.4 та 3.5).

Таблиця 3.5 – Потенційна біомаса Зернового сорго від K_{pn} при ФАР зв'язування важких металів з травня по серпень включно

Коефіцієнт рослинного покриття K_{pn} , %	Біомаса на суху речовину ПУ, ц/га	Біомаса з природньою вологістю $P_{\text{вол}}$, кг/м ²
0	0	0
0,1	0,17	0,20
0,2	0,33	0,38
0,3	0,49	0,57

Закінчення табл. 3.5

0,4	0,66	0,77
0,5	0,82	0,95
0,6	0,99	1,15
0,7	1,15	1,34
0,8	1,32	1,54
0,9	1,48	1,72
1	1,65	1,92

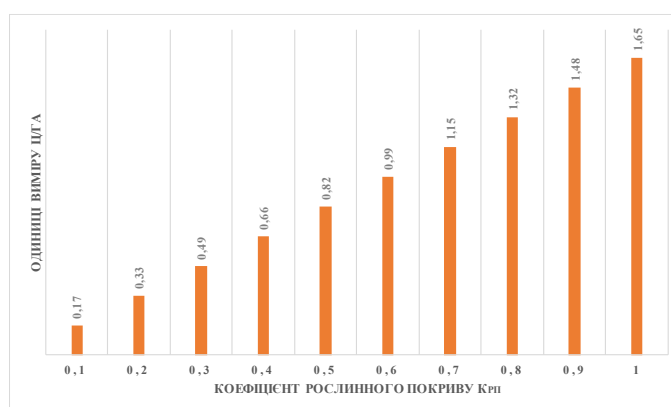


Рисунок 3.4 – Залежність потенційної біомаси (суха речовина) Зернового сорго від $K_{рп}$ при ФАР зв'язування важких металів з травня по серпень

ВКЛЮЧНО

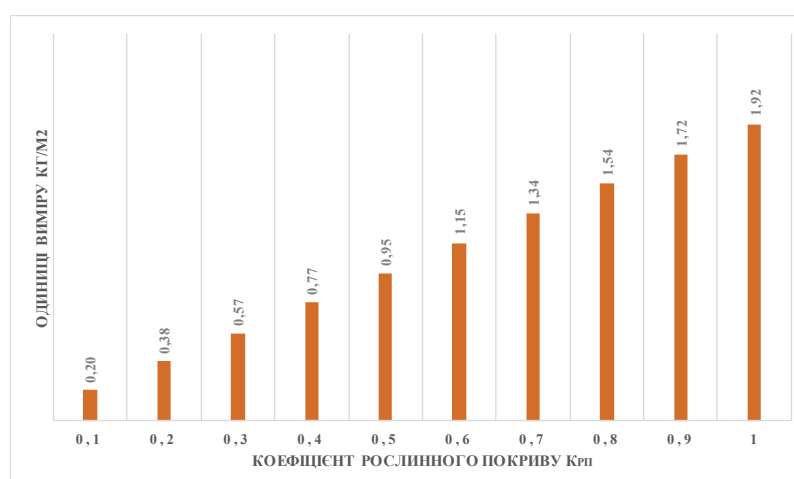


Рисунок 3.5 – Залежність потенційної біомаси (з природньою вологістю) Зернового сорго від $K_{рп}$ при ФАР зв'язування важких металів з травня по серпень включно

На рисунках 3.4 та 3.5 показано, що від коефіцієнту рослинного покриття ($K_{рп}$) від 0 до 1 зростає потенційна біомаса Зернового сорго майже в 2 рази (як в сухій речовині, так і з природньою вологістю) для Дніпропетровської області.

3.3 Фітомайнінг цинку

Фітомайнінг – процес видобутку важких металів (біоруд) з ґрунтового покриття за допомогою рослин-гіперакумуляторів.

Фітомайнінг вперше було винайдено 40 років тому. В 1983 році британський ботанік, професор Мельбурнського університету Алан Бейкер та американський агроном Руфус Чейні розробили фітомайнінг, а вже в 1996 році в штаті Невада США випробували його. Використовували гіперакумулятор нікелю (Ni) *Streptanthus polygaloides* на ґрунті з вмістом нікелю 0,35 %, фітовидобуток даної культури був вище за середні 100 кг Ni/ га. В 1995 році разом з Ін-Мінг Лі та Джей Скотт взяли патент на процес на 20 років (до 2015 року).

Процес фітмайнінгу має основні етапи:

1. На забруднений металами ґрунт висаджують рослини-гіперакумулятори даного елемента.
2. При рості рослини поглинають корінням мінерали та накопичують їх в біомасі. Потрібно вирощувати рослини до розміру, необхідного для вмісту достатньої кількості елемента.
3. Після того, як рослини досягли необхідної біомаси, їх збирають та спалюють. Зола після спалювання містить необхідний метал в доволі високій кількості.
4. Далі золу очищують за допомогою хімічних процесів (електролізу або витіснення).
5. І на виході отримують чистий метал та невелику кількість золи, яку необхідно утилізувати.

Переваги фітомайнінгу:

1. Рослини очищують ґрунт від металів та відновлюють ґрунтовий покрив даної місцевості.

2. Екологічно чистий та стійкий спосіб видобутку металів, що не забруднює усі складові довкілля.

3. Порівняно з традиційними методами видобутку дешевий спосіб отримання металів, не потребує використання дорогої техніки.

4. Економічно вигідніший спосіб видобутку металів. Даний спосіб використовують для ґрунтів та шахтних відходів з низьким вмістом металів, де використання звичайних методів видобутку є економічно не доцільним.

Головним недоліком фітомайніну є повільність процесу. Неконтрольоване заростання рослин за межами території може спричинити зміну природній різноманітності. Також при даному методі (особливо на великих територіях) важко контролювати умови вирощування (температура, вологість, вітер і т.д.) [53].

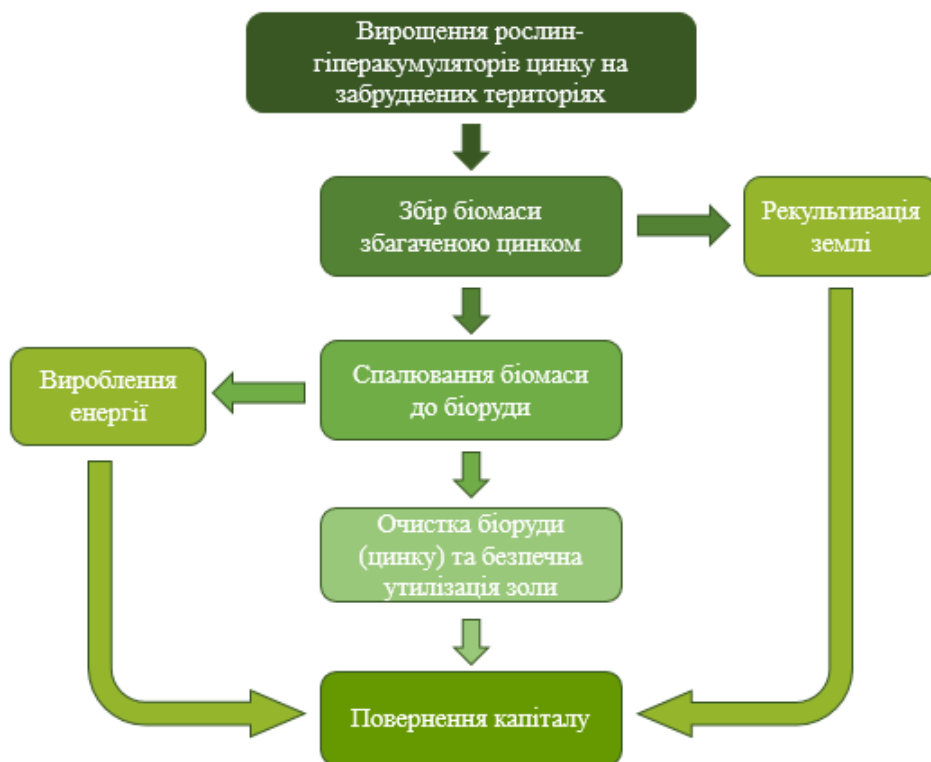


Рисунок 3.6 – Схема фітомайнінгу (фітовидобутку) цинку

Фітомайнінг має бути частиною фіторекультивуації забрудненої важкими металами території (рис. 3.6). Тому що при збиранні рослинної біомаси з біорудою – ґрунтовий покрив очищується від даного металу та стає придатною для подальшого використання. Також фітомайнінг – це можливість повернення вкладень для фіторекультивуації техногенної земельної ділянки.

3.4 Зернове сорго – енергетична культура

До 2050 року планується що біоенергетика в загальному споживанні енергії буде складати від 30 % до 70 %.

Біоенергетика – сфера енергетики, що використовує, як паливо біомасу (органічний матеріал рослинництва, сільського господарства). Даний напрям біотехнологій виник в кінці 20 століття, як спосіб вирішення проблем енергетики та зменшення запасів сировини енергоресурсів.

Пріоритетними напрямками впровадження біоенергетики в Україні є:

1. Електроенергія,
2. Теплоенергетика,
3. Біопалива для транспорту.

На території України понад 3,4 млн. га земель не придатні для ведення сільського господарства, а в використанні лише 0,1 %. Але на них можливе вирощення біоенергетичних культур (фіторемедіація).

Енергетичні культури – трав'яні або деревні рослини, що мають високі та швидкі показники росту. Їх спеціально вирощують для біопалива.

Переваги енергетичних культур:

- Великі об'єми біомаси,
- Невибагливі до умов вирощування (стійкі по посухи, заморозків, не потребують багато води, не потребують обробки агрохімією і т.д.),
- При спалюванні залишається невелика кількість золи,

- При виробництві біопалива CO₂ є нейтральним,
- Території засаджені енергетичними культурами стійкі до різних видів ерозії, також дані культури покращують якість ґрунту.

Переваги вирощення в Україні енергетичних культур:

1. Включає процес рекультивації техногенно забруднених територій.
2. Відновлює ґрунтовий покрив, покращує його родючість та властивості.
3. Знижує викиди парникових газів та сповільнює зміну клімату.
4. Є потенційно вільні для вирощування території.
5. Є прогнозованим джерелом біопалива та підтримує загальну енергосистему.
6. Стимулює впровадження циркулярної економіки.
7. Підтримує розвиток місцевої економіки.
8. Створює робочі місця.
9. Є більш екологічним та економічно вигіднішим заміником газу.

Найбільш розповсюдженими біоенергетичними культурами вважають: верба, тополя, міскантус, ріпак, соя, кукурудза, льон, світчграс (просо лозоподібне), сіда багаторічна, пальмова олія, цукровий буряк, цукрова тростина [54].

Зернове сорго є четвертою енергетичною культурою світового виробництва після пшениці, кукурудзи та рису. Головними виробниками Зернового сорго вважаються – США, Мексика та Аргентина. США вважається найбільшим експортером сорго – 10 млн. тон, Китай є найбільшим імпортером сорго, зокрема і для виробництва біоетанолу.

В Зернового сорго найбільший вміст крохмалю – 70-74 %, що навіть є більшим за показники кукурудзи – 62-72 %. З сухої маси виробляють біогаз, бутанол та етанол. З віджатої біомаси виготовляють пелети та брикети.

Енергетичні показники сорго:

- врожайність – 25 т/га/рік,

- теплотворна здатність – 18 ГДж/сухої т,
- енергетичний вихід – 450 ГДж/га на рік.

Біопаливо з сорго включає:

- до 6 т/га біоетанолу (35,7 Гкалл/га),
- до 17,6 тис.м³/га біогазу (90,8 Гкалл/га),
- до 25 т/га твердого палива (95,3 Гкалл/га),
- органічне добриво.

За даними Мінагрополітики з 0,5 млн. га посівних площ Сорго буде вихід біогазу – 8,8 млрд. м³/рік, а вихід біометану становить – 4,4 млрд. м³/рік. В майбутньому виробництво біоетанолу неможливе без вирощення сорго [55].

Багаторічні енергокультури мають швидкі темпи росту біомаси, сильну кореневу систему, що є одними з головних показників рослин-фіторемедіантів важких металів з ґрунтового покриву. Після дозрівання біомаса даних рослин може бути використана (після відповідної переробки) для отримання металів та/або для виготовлення біопалива.

ВИСНОВОК

В даній роботі була вирішена наукова-практична задача зниження рівня забруднення ґрунтів цинком за допомогою акумулюючих властивостей рослин-фіторемедіантів важких металів та відновлення ґрунтового покриву використовуючи технології фіторемедіації.

Отримані результати представлені нижче.

Розглянуто метод фіторемедіації – екологічний метод очищення ґрунту, води чи повітря від забруднень (важких металів, бензолів, вуглеводнів, розчинників та ін.) за допомогою рослин, як частина методу рекультивації забруднених та порушених територій. Рослини використовують для іммобілізації, вилучення, випаровування, деградації та стабілізації забруднених територій. Підбір необхідних рослин для конкретної території та забруднювача є необхідним для збереження природного стану екосистем.

При обробленні результатів експерименту – ростового тесту, на вплив цинку на ростові показники рослин-фіторемедіантів. Було встановлено, що найоптимальнішою концентрацією цинку в ґрунті для Зернового сорго (ВР: \bar{x} – 18,4 см, m – 0,3; ДК: \bar{x} – 9,1 см, m – 0,2) та Гороху посівного (ВР: \bar{x} – 20,1 см, m – 0,3; ДК: \bar{x} – 7,7 см, m – 0,1) є 1 ГДК. При даній концентрації спостерігаються найвищі показники середніх значень висоти рослин та довжини коренів. При 0,5 ГДК, Контроль та 2 ГДК спостерігається вже менший об'єм біомаси, як наземної, так кореневої частини. При 4 ГДК вже ростові показники рослин-фіторемедіантів зменшилися більше ніж в 2 рази. А при 8 ГДК спостерігається вже зменшення висоти рослин та довжини коренів майже в 3 рази. Також при 4 ГДК та 8 ГДК рослини-фіторемедіанти поступово чезнуть та майже не відбувається розвиток біомаси.

Данні спостереження підтвержені розрахунками фітотоксичного ефекту від концентрацій цинку для Зернового сорго та Гороху посівного. Для Зернового сорго, найбільший відсоток 60,3 % та 46,54 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 8 ГДК цинку, а найменший

відсоток -32,85 % та -39,63 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 1 ГДК цинку. Для Гороху посівного, найбільший відсоток 60,47 % та 56,29 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 8 ГДК цинку, а найменший відсоток -42,94 % та 5,62 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 1 ГДК цинку.

Розроблено схему фіторекультивациі територій забруднених цинком та визначено склад рослинного покриву для фіторекультивациі. Що включає насадження злакових та бобових культур багаторічних (З – 80 %, Б – 20 %) та однорічних (З – 50 %, Б – 50 %) і головні (тополя чорна, верба біла) та другорядні (осика, клен червоний) посадки дерев.

Також було проведено розрахунок потенційної біомаси Зернового сорго для фітореємедіації техногенних територій в Дніпропетровській області, вході якого визначено, що від коефіцієнту рослинного покриву від 0 до 1 біомаса зростає майже в 2 рази (як в сухій речовині, так і з природньою вологістю).

Визначено, що фітомайнінг має бути частиною фітореємедіації забрудненої важкими металами територіі. Також фітомайнінг – це можливість повернення вкладень для фітореємедіації техногенної земельної ділянки.

Оцінено шкідливі фактори впливу цинку на стан довкілля та здоров'я людини та проаналізовано протипожежні заходи для територій і лабораторій.

Розраховано загальну вартість витрат для фітореємедіації забруднених земель площею 1 га, що склала 454 500 грн та оцінено еколого-економічну ефективність від фітореємедіації. За допомогою 320 дерев висаджених при фітореємедіації сума екологічного податку за викиди в атмосферне повітря буде знижена на 3 569 944,52 грн. Також економічний ефект буде вищим, якщо враховувати прибуток від реалізації біомаси енергокультур на біопаливо та фітомайнінг з рослинної біомаси.

Отже, використання енергетичних культур в якості фітореємедіантів для забруднених та/або деградованих територіях є перспективним напрямком фітореємедіації, як з екологічного, так і економічного боку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Екологія: підручник для студентів вищих навчальних закладів / кол. авторів; за загальною ред. О. Є. Пахомова; худож.-оформлювач Г. В. Кісель. — Харків: Фоліо, 2014. — 666 с. URL: <https://studfile.net/preview/5186484/page:160/>
2. Деградація українських ґрунтів призводить до втрати 20 млрд грн щороку. URL: <https://superagronom.com/news/2436-degradatsiya-ukrayinskih-gruntiv-prizvodit-do-vtrati-20-mlrd-grn-schoroku> Загол. з екрана.
3. В 25 разів більше шкідливих металів у ґрунтах: як війна забруднює родючі чорноземи та чи можна їх відновити. URL: <https://naglyad.org/uk/2023/03/13/v-25-raziv-bilshe-shkidlivih-metaliv-u-gruntah-yak-vijna-zabrudnyuye-rodyuchi-chornozemi-ta-chi-mozhna-yih-vidnoviti/> Загол. з екрана.
4. Інноваційні підходи до фітореMediaції та фіторекультивациі у сучасних системах землеробства. Монографія / Я.Г. Цицюра, Ю.М. Шкатула, Т.А. Забарна, Л.В. Пелех. Вінниця: ТОВ «Друк», 2022. 1200 с. URL: <http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/31038.pdf>
5. Забруднення ґрунтів важкими металами та пестицидами. URL: <https://kegt.rshu.edu.ua/images/dustan/ORZR4.pd> Загол. з екрана.
6. Вплив важких металів на врожайність сільськогосподарських культур. URL: <https://superagronom.com/blog/494-vpliv-vajkih-metaliv-na-vrojajnist-silskogospodarskih-kultur> Загол. з екрана.
7. Рекультивациа, ремедіациа та заповідання відпрацьованих земель. URL: <https://studfile.net/preview/5186484/page:158/> Загол. з екрана.
8. Важкі метали в ґрунті, визначення ГДК важких металів в ґрунті. URL: <https://himanaliz.ua/uk/vazhki-metaliv-v-grunti/> Загол. з екрана.
9. Забруднення навколишнього середовища важкими металами. URL: <https://mcl.kiev.ua/zagryaznenie-okruzhayushhej-sredy-tyazhelymi-metallami/> Загол. з екрана.

10. Цинк. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BD%D0%BA> Загол. з екрана.
11. Цинк: історія, властивості, структура, ризики, застосування. URL: <https://uk.warbletoncouncil.org/zinc-435> Загол. з екрана.
12. Цинк: все, що варто знати про цей метал. URL: <https://blog.mehbud.com.ua/uk/other/tsynk-vse-shcho-varta-znati-pro-tsey-metal/> Загол. з екрана.
13. Цинк. URL: <https://doctorthinking.org/2020/12/zincum/> Загол. з екрана.
14. Цинк і його корисні властивості для організму. Де міститься і як його приймати. URL: <https://belok.ua/blog/ua/cho-takoe-cink-ego-svoistva/> Загол. з екрана.
15. Цинк - незамінний мікроелемент для організму та його корисні властивості. URL: <https://biomax.org.ua/ua/tsink-nezamenimyy-mikroelement-dlya-organizma-i-ego-poleznye-svoystva/> Загол. з екрана.
16. Роль цинку в організмі людини. URL: <https://nutrix.ua/zinc/> Загол. з екрана.
17. Цинк впливає на стійкість рослини до несприятливих умов та хвороб. URL: <https://agrotimes.ua/agronomiya/czynk-vpyvaye-na-stijkist-roslyny-do-nespryyatlyvyh-umov-ta-hvorob/> Загол. з екрана.
18. Цинк (Zn) має великий вплив на окислювально-відновні процеси в рослинному організмі. URL: <https://agro.bio/cink-zn> Загол. з екрана.
19. Фіторемедіація: види, переваги та недоліки. URL: <https://uk.warbletoncouncil.org/fitorremediacion-4623#menu-4> Загол. з екрана.
20. Охорона ґрунтів. URL: <https://subject.com.ua/geographic/poznyak/127.html> Загол. з екрана.
21. Рекультивация порушених земель. URL: https://wiki.legalaid.gov.ua/index.php/%D0%A0%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%83%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0

[%B8%D1%85_%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BB%D1%8C](#)

Загол. з екрана.

22. Земельний Кодекс України. Київ: Юридична література, 2001 р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>

23. Фіторемедіація. URL:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%96%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%B4%D1%96%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F> Загол. з екрана.

24. Фіторемедіація – визначення, види, механізми. URL:
<https://microbiologynote.com/uk/phytoremediation/> Загол. з екрана.

25. What is Phytoremediation? URL:
<https://web.archive.org/web/20110719022451/http://arabidopsis.info/students/dom/mainpage.html> Загол. з екрана.

26. Ю. Посудін. Моніторинг довкілля з основами метрології URL:
<https://studfile.net/preview/12828042/page:6/>

27. Генік Я.В. Історичний розвиток та етапи становлення фітомеліорації. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istorichniy-rozvitok-ta-etapi-stanovlennya-fitomelioratsiyi>

28. [Кучерявий В.П. Рекультивація та фітомеліорація : навч.-метод. посібн. / В.П. Кучерявий, Я.В. Генік, А.П. Дида, М.М. Колодко. – Львів : Вид-во НЛТУ України, 2006. – 116 с.](#)

29. Яворівське озеро. URL: <http://chvart.com/blog/podorozhi/yavorivske-ozero-2019.html> Загол. з екрана.

30. Яворівський кар'єр. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B2%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%B0%D1%80%27%D1%94%D1%80 Загол. з екрана.

31. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Технології біорекультивації. Біоремедіація ґрунтового й водного середовищ» для студентів денної форми навчання за напрямом 6.051401 – «Біотехнологія».

URL:http://prd.kdu.edu.ua/Files/Metoda/metod_zabezp_new/tehn_biorecultiv/lekc_tehn_biorecultiv.pdf

32. Ремедіація забруднених територій. URL:
<https://nte.com.ua/activities/remediation> Загол. з екрана.

33. Візирка. URL:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BA%D0%B0> Загол. з екрана.

34. Візирка – найбільший ландшафтний заказник Криворіжжя. URL:
https://www.dnipro.lib.dp.ua/Vizyrka_naybilshyy_landshaftnyy_zakaznyk_Kryvorizhzhya Загол. з екрана.

35. Піонерні види. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%96_%D0%B2%D0%B8%D0%B4%D0%B8 Загол. з екрана.

36. Prasad, M.N.V. and Freitas, H., Feasible Biotechnological and Bioremediation Strategies for Serpentine Soils and Mine Spoils, Electron. J. Biotechnol., 1999, vol. 2, pp. 35–50.

37. Біоіндикація і біотестування в агроекології. URL:
<http://www.tsatu.edu.ua/ros1/wp-content/uploads/sites/20/lr.6.bioindykacija-i-biotestuvannja-v-ahroekolohiyi.pdf> Загол. з екрана.

38. Біоіндикація як метод екологічного дослідження. URL:
<https://kegt.rshu.edu.ua/images/dustan/INDL3.pdf> Загол. з екрана.

39. Притула Н.М. Біоіндикація : навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Екологія» освітньо-професійної програми «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 141 с.

40. Сорго звичайне. URL:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%87%D0%B0%D0%B9%D0%BD%D0%B5>
Загол. з екрана.

41. Сорго. URL: <https://olis.com.ua/press-centre/statti/st-sorgo-ua/> Загол. з екрана.
42. Сорго – культура будущего. URL: <https://www.agronom.com.ua/sorgo-kultura-budushhego/> Загол. з екрана.
43. Опис та характеристика рослини ГОРОХ ПОСІВНИЙ. URL: <https://agrarii-razom.com.ua/plants/goroh-posivniy> Загол. з екрана.
44. Який буває горох посівний та як його вирощувати? URL: <https://zelenasadyba.com.ua/sad-i-gorod/goroh-posivnyj.html> Загол. з екрана.
45. Горох посівний. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%85_%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9 Загол. з екрана.
46. Сульфат цинку. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0%D1%82_%D1%86%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D1%83 Загол. з екрана.
47. Сульфат цинку: добриво і не тільки. URL: <https://www.systopt.com.ua/article-sulfat-cynku-dobryvo-i-ne-tilky> Загол. з екрана.
48. Сульфат цинку. Застосування, властивості, характеристики, норми внесення. URL: <https://him-element.com.ua/uk/news/53> Загол. з екрана.
49. Добриво сульфат цинка. URL: <https://agrarii-razom.com.ua/basic-fertilizers/sulfat-cinka> Загол. з екрана.
50. Біоіндикація. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт студентами напряму підготовки 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» / А.І. Горова, А.В. Павличенко, О.О. Борисовська, В.Ю. Ґрунтова, О.В. Деменко; – Д.: Національний гірничий університет, 2014. – 76 .
51. Як правильно підібрати сидеральні культури? URL: <https://bionorma.ua/articles/yak-pravylno-pidibraty-syderalni-kultury/> Загол. з екрана.

екрана.

52. Менеджмент цинку та його значення для рослин. URL: <https://www.agronom.com.ua/menedzhment-tsynku-ta-jogo-znachennya-dlya-roslyn/> Загол. з екрана.

53. Phytomining. URL: <https://kiwiscience.com/phytomining.html> Загол. з екрана.

54. Біоенергетика в Україні. URL: <https://uabio.org/bioenergy-in-ukraine/> Загол. з екрана.

55. Міскантус, буряк та сорго як біоенергетичні культури. URL: <https://superagronom.com/blog/260-miskantus-tsukroviy-buryak-ta-sorgo-yak-bioenergetichni-kulturi> Загол. з екрана.

56. Основні симптоми передозування цинком. URL: <https://sayyes.com.ua/ua/osnovnye-simptomy-peredozirovki-tsinkom/> Загол. з екрана.

57. Забруднення навколишнього середовища важкими металами. URL: <https://mcl.kiev.ua/zagryaznenie-okruzhayushhej-sredy-tyazhelymi-metallami/> Загол. з екрана.

58. Що необхідно знати про пожежі в екосистемах? URL: https://ivankiv-gromada.gov.ua/attachments/e08d671f-62c0-43ba-a027-3ffcae33f8a8_%D0%9F%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B6i_%D0%B2_%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%85.pdf Загол. з екрана.

59. Правила пожежної безпеки в лабораторії – Техніка безпеки в хімічній лабораторії. URL: <https://jak.waykun.com/articles/pravila-pozhezhnoi-bezpeki-v-laboratorii-tehnika.html> Загол. з екрана.

60. Інструкція про заходи пожежної безпеки в лабораторії. URL: <https://pro-op.com.ua/article/957-nstruktsya-pro-zahodi-pojejno-bezpeki-u-laborator> Загол. з екрана.