

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет

Навчально-науковий інститут Холоду, кріотехнологій та екоенергетики
ім.Мартинівського В.С.

Кафедра екології, води та природоохоронних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Освітня програма «Технології захисту навколишнього середовища»



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему Оцінка ефективності проведення фітореMediaції ґрунтів на території
полігону ТПВ

Здобувача(ки) Головань Л.В.

Керівник к.т.н, доцент, Шпирко Т.В.
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: _____
(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 2024 р., протокол №____

Завідувач кафедри ЕВтаПТ _____ Олексій ГАРКОВИЧ
(назва кафедри) (підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2024 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий інститут Холоду, кріотехнологій та екоенергетики

Кафедра екології, води та природоохоронних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Освітня програма «Технології захисту навколишнього середовища»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри

к. б. н, доц. _____ **О.Л. Гаркович**

“ _____ ” _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Головань Лариси Володимирівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту: «Оцінка ефективності проведення фітореємедіації ґрунтів на території полігону ТПВ»

Затверджена наказом ОНТУ від «28» березня 2024 року, наказ № 139-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи: 07.12.24 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): полягають у визначенні основних параметрів для проведення досліджень з фітореємедіації ґрунтів на полігонах ТПВ. Зокрема, дослідження спрямовані на оцінку ефективності фітореємедіації у поліпшенні фізико-хімічних властивостей ґрунту, зниженні рівня забруднення важкими металами та органічними токсичними речовинами, а також на покращенні екосистемних послуг ґрунтів.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: оцінка рівня забруднення важкими металами та органічними токсичними речовинами на полігонах ТПВ, вивчення основних механізмів фітореємедіації (фітоекстракція, фітосорбція, фітодеградація, фітостабілізація) та їх застосування для очищення ґрунтів., оцінка природної та спеціально відібраної флори, яка здатна ефективно очищати ґрунти на полігонах ТПВ, аналіз екологічного впливу фітореємедіації на біорізноманіття та відновлення екосистем на полігонах ТПВ. Ці питання спрямовані на всебічне вивчення проблеми забруднення ґрунтів на полігонах ТПВ та можливостей її вирішення за допомогою фітореємедіаційних технологій.

5. Перелік графічного матеріалу (з зазначенням обов'язкових креслень): таблиці та рисунки, що відображають хід виконання випускної кваліфікаційної роботи.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Теоретичні основи фітореємедіації ґрунтів	Шпирко Т.В. к.т.н., доц..	14.08.24	30.09.24
2. Характеристика об'єкта дослідження, матеріали та методи досліджень	Шпирко Т.В. к.т.н., доц..	30.09.24	16.10.24
3. Результати дослідження ефективності фітореємедіації на полігоні ТПВ м. Дергачі Харківської області	Шпирко Т.В. к.т.н., доц..	16.10.24	08.11.24
4. Експериментальні дослідження	Шпирко Т.В. к.т.н., доц..	08.11.24	18.11.24
5. Охорона праці та ЦЗ	Гаркович О.Л., к.б.н., доц	18.11.24	01.12.24

7. Дата видачі завдання _____

Керівник _____ Тетяна ШПИРКО

Завдання прийняв до виконання _____

Лариса ГОЛОВАНЬ

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Теоретичні основи фітореMediaції ґрунтів	30.09.24	
2.	Характеристика об'єкта дослідження, матеріали та методи досліджень	16.10.24	
3.	Результати дослідження ефективності фітореMediaції на полігоні ТПВ м. Дергачі Харківської області	08.11.24	
4.	Охорона праці та ЦЗ	18.11.24	
5.	Оформлення результатів виконаної роботи	01.12.24	

Здобувач вищої освіти _____ Лариса ГОЛОВАНЬ

Керівник роботи _____ Тетяна ШПИРКО

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач вищої освіти Лариса ГОЛОВАНЬ _____

ПІБ

Підпис

Реферат

Розрахунково-пояснювальна записка до дипломної роботи: сторінок – 123, рис. – 3, табл. – 32, формули – 2, література – 145.

Тема: Оцінка ефективності проведення фітореMediaції ґрунтів на території полігону ТПВ.

Мета досліджень оцінити ефективність фітореMediaційних технологій для очищення ґрунтів на полігонах ТПВ від забруднювачів, таких як важкі метали та органічні токсичні речовини.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні **завдання**: оцінка фізико-хімічних характеристик ґрунтів, визначення видів забруднень, визначення ефективних видів рослин, які здатні поглинати, трансформувати або накопичувати токсичні елементи; дослідження процесу росту рослин на забруднених ґрунтах, моніторинг динаміки концентрації забруднювачів у ґрунті протягом певного періоду; оцінка ефективності фітореMediaції ґрунтів шляхом порівняння рівня забруднення ґрунту до і після проведення фітореMediaції; розробка рекомендацій для впровадження фітореMediaції на полігонах ТПВ. На основі отриманих результатів буде розроблено ряд рекомендацій для застосування методу фітореMediaції на територіях полігонів ТПВ.

Дипломна робота магістра складається з таких **розділів**:

У першому розділі розглянуто основні поняття та принципи фітореMediaції, як одного з інноваційних методів очищення забруднених ґрунтів.

У другому розділі розглядаються основні характеристики об'єкта, описуються матеріали дослідження, включаючи типи рослин, що використовуються для фітореMediaції.

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень, проведених на полігоні твердих побутових відходів у м. Дергачі.

У четвертому розділі розкрито питання забезпечення безпечних умов праці під час проведення досліджень на полігонах ТПВ та використання фітореMediaційних технологій.

У п'ятому розділі наведено заходи, спрямовані на захист людей та навколишнього середовища від надзвичайних ситуацій, які можуть виникнути під час проведення досліджень на полігонах ТПВ.

Практична цінність дослідження полягає в розробці ефективних і економічно доступних методів очищення забруднених ґрунтів на територіях полігонів ТПВ, що може стати основою для широкого впровадження фітореMediaції в Україні та інших країнах, де проблема забруднення ґрунтів на полігонах є гострою

Ключові слова: фітореMediaція, полігони ТПВ, забруднювачі ґрунтів, фітоекстракція, фітосорбція, фітодеградація, фітостабілізація, екологічна ефективність, флора для фітореMediaції, показники ефективності, забруднення важкими металами, біореMediaція, економічна ефективність, фізико-хімічні властивості ґрунту.

ВСТУП

Актуальність теми. Забруднення ґрунтів на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з основних екологічних проблем сучасності, що має серйозні наслідки для довкілля, здоров'я людини та біорізноманіття. Протягом десятиліть полігони ТПВ стають джерелом різноманітних забруднювачів, зокрема важких металів, органічних токсичних сполук, патогенних мікроорганізмів і шкідливих хімічних речовин. Ці забруднення не тільки погіршують якість ґрунтів, але й мають негативний вплив на водні ресурси, атмосферу та флору і фауну в зоні впливу полігону.

В умовах обмежених ресурсів для застосування традиційних методів очистки (механічних, хімічних, термічних) важливим напрямом екологічної реабілітації забруднених територій є фітореMediaція. ФітореMediaція ґрунтів – це процес очищення земельних ділянок від забруднюючих речовин за допомогою рослин, які здатні поглинати, трансформувати або депонувати забруднювачі. Це екологічно безпечний, економічно ефективний та природоохоронний метод, що дозволяє здійснити відновлення ґрунтів, зменшити токсичне навантаження на довкілля і створити умови для сталого розвитку територій, що зазнали забруднення.

На сьогодні фітореMediaція вже застосовується в багатьох країнах світу для очищення ґрунтів від важких металів, нафтопродуктів, органічних забруднювачів та інших токсичних сполук. Проте на території України цей метод ще не набув широкого поширення, що створює необхідність у проведенні наукових досліджень, спрямованих на вивчення ефективності фітореMediaції на полігонах ТПВ.

Результати таких досліджень сприятимуть розвитку наукової бази та практичних рекомендацій для управлінців, екологів, а також для представників місцевих органів влади, що відповідають за екологічну безпеку на територіях, забруднених відходами. ФітореMediaція є перспективним методом відновлення забруднених ґрунтів, зокрема на

територіях полігонів ТПВ, де традиційні методи очищення є надто дорогими чи складними для реалізації. Проведення досліджень за темою фітореMediaції ґрунтів є надзвичайно важливим для України, оскільки дозволяє розробити науково обґрунтовані підходи для очищення забруднених земель та збереження довкілля. Оцінка ефективності фітореMediaції ґрунтів на полігонах ТПВ дозволить оцінити вплив рослин на здатність поглинати, трансформувати та депонувати забруднювачі, що забезпечить стале використання земель у майбутньому [110, 124].

Мета дослідження є комплексна оцінка ефективності методу фітореMediaції для очищення ґрунтів, забруднених на території полігону твердих побутових відходів (ТПВ).

Завдання дослідження:

1. Вивчення фізико-хімічних характеристик ґрунтів, визначення видів забруднень, таких як важкі метали (цезій, свинець, кадмій) та інші токсичні сполуки.
2. Визначення ефективних видів рослин, які здатні поглинати, трансформувати або накопичувати токсичні елементи.
3. Дослідження процесу росту рослин на забруднених ґрунтах, моніторинг динаміки концентрації забруднювачів у ґрунті протягом певного періоду.
4. Оцінка ефективності фітореMediaції ґрунтів шляхом порівняння рівня забруднення ґрунту до і після проведення фітореMediaції.
5. Розробка рекомендацій для впровадження фітореMediaції на полігонах ТПВ.

Об'єктом дослідження є ґрунти, забруднені на території полігону твердих побутових відходів (ТПВ). Полігони ТПВ становлять значну частину забруднених земельних ділянок, на яких накопичуються шкідливі речовини, зокрема важкі метали, органічні забруднювачі, токсичні гази і рідини, що негативно впливають на екологічний стан навколишнього середовища.

Предметом дослідження є процес фіторемедіації ґрунтів на території полігону ТПВ за допомогою різних видів рослин. Зокрема, оцінка здатності рослин поглинати або трансформувати токсичні забруднювачі, що містяться в ґрунті, а також їх здатність до депонування цих забруднювачів у своїх тканинах.

Визначення ефективності фіторемедіації через порівняння фізико-хімічних характеристик ґрунтів до та після фіторемедіації, а також оцінка змін у біологічних характеристиках ґрунту (мікробіологічна активність, біорізноманіття), що дозволяє оцінити не тільки механізм очищення ґрунтів, а й довгострокові екологічні наслідки застосування фіторемедіації.

Наукова новизна цієї роботи полягає у комплексній оцінці ефективності методу фіторемедіації для очищення ґрунтів, забруднених на території полігону твердих побутових відходів (ТПВ). Це дослідження спрямоване на вдосконалення існуючих методик фіторемедіації шляхом: вивчення здатності рослин до фітоекстракції, фітоінфільтрації та фітодеградації токсичних забруднювачів (важких металів, органічних сполук) у ґрунті полігонів ТПВ.

Практична значущість дослідження полягає в розробці ефективних і економічно доступних методів очищення забруднених ґрунтів на територіях полігонів ТПВ, що може стати основою для широкого впровадження фіторемедіації в Україні та інших країнах, де проблема забруднення ґрунтів на полігонах є гострою. Розробка рекомендацій щодо застосування фіторемедіації на полігонах ТПВ. Результати досліджень можуть бути використані для розробки державних і місцевих програм з реабілітації забруднених земель і відновлення екосистем.

Методи дослідження. Дослідження ефективності фіторемедіації ґрунтів на території полігону ТПВ включає низку методів, які дозволяють комплексно оцінити вплив цього процесу на стан ґрунтів, а також визначити його ефективність у зменшенні концентрації токсичних речовин. Методи дослідження включають польові спостереження, лабораторні аналізи, експериментальні методи та статистичну обробку результатів.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ

1.1 Поняття фітореєедіації та її значення

Фітореєедіація – це процес очищення або покращення якості навколишнього середовища за допомогою рослин, що здатні поглинати, метаболізувати або трансформувати забруднювачі в ґрунті, воді та атмосфері. Цей метод є одним із перспективних напрямків у біоочищенні, що дозволяє зменшити забруднення важкими металами, пестицидами, нафтопродуктами та іншими токсичними речовинами. Фітореєедіація включає кілька підвидів, таких як фітодеградація, фітоекстракція, фітовиведення та фітосорбція [55].

Фітореєедіація має значний екологічний вплив, оскільки вона дозволяє відновити природні екосистеми, покращити якість ґрунтів та води, а також знизити рівень токсичних речовин у навколишньому середовищі [109].

Позитивний вплив фітореєедіації:

1. Відновлення забруднених територій: рослини здатні поглинати та метаболізувати токсичні елементи, що дозволяє знижувати рівень забруднення ґрунтів та води. У результаті застосування фітореєедіації можна не лише знизити концентрацію токсинів, а й поліпшити структуру та родючість ґрунту, створюючи сприятливі умови для відновлення природного рослинного покриву та біорізноманіття [63].

2. Збереження біорізноманіття: на очищених територіях можуть відновлюватися природні екосистеми, що сприяє збереженню флори та фауни. Відновлення рослинного покриву та покращення якості ґрунтів сприяє збільшенню різноманіття видів, включаючи рідкісні та зникаючі види, що створює сприятливі умови для відновлення екологічної рівноваги в регіоні.

3. Зниження витрат: фітореєедіація є економічно вигідним методом очищення забруднених земель, оскільки вона є менш витратною в порівнянні

з традиційними технологіями очищення (хімічні та механічні методи). Окрім того, цей метод дозволяє зменшити витрати на транспортування та зберігання токсичних відходів [46, 61].

4. Безпека для навколишнього середовища: у порівнянні з іншими методами очищення, фітореMediaція не потребує великої кількості хімічних речовин або складних технологічних процесів [3, 31] (табл. 1.1).

5. ФітореMediaція є ефективним методом очищення забруднених територій від важких металів (свинцю, кадмію, миш'яку) та органічних забруднювачів (пестицидів, нафтопродуктів). Процес фітоекстракції та фітосорбції дозволяє не лише знижувати токсичність середовища, але й активно зменшувати забруднення навколишнього середовища, зокрема водних ресурсів [109].

Таблиця 1.1

Основні переваги фітореMediaції

Аспект фітореMediaції	Опис	Позитивний ефект
Відновлення забруднених земель	Використання рослин для очищення ґрунтів від токсичних речовин.	Поліпшення структури ґрунтів, покращення родючості та зменшення забруднення.
Зниження токсичних речовин	Поглинання важких металів і органічних забруднювачів рослинами.	Зниження концентрації забруднювачів у ґрунті, воді та атмосфері.
Збереження біорізноманіття	Відновлення екосистем завдяки поліпшенню якості ґрунтів та відновленню рослинного покриву.	Підвищення біорізноманіття в очищених екосистемах.
Економічна вигода	Зниження витрат на очищення порівняно з хімічними та механічними методами.	Зменшення витрат на обробку земель, доступність для підприємств.
Захист водних ресурсів	Очищення води від забруднювачів за допомогою водних рослин.	Підвищення якості води та захист водних екосистем.

Отже, фітореMediaція має численні позитивні екологічні переваги, які дозволяють використовувати її як ефективний метод відновлення забруднених територій. Відновлення якості ґрунтів і води, зниження концентрації токсичних елементів, покращення біорізноманіття та економічна вигода роблять цей метод перспективним для широкого

застосування в екологічному очищенні. Однак, для досягнення максимального ефекту важливо враховувати специфіку забруднювачів і умови місцевості [4, 5].

ФітореMediaція, хоча і є екологічно безпечним методом очищення забруднених територій, має низку потенційних недоліків та обмежень, що можуть негативно вплинути на ефективність цього процесу і довкілля загалом. Незважаючи на численні переваги, технологія потребує додаткових досліджень та удосконалення для забезпечення її більшої ефективності та безпеки. Основні аспекти негативного впливу фітореMediaції [44]:

1. Обмеження по типу забруднювачів. Не всі забруднювачі можуть бути ефективно видалені за допомогою фітореMediaції. Наприклад, органічні забруднювачі, такі як деякі пестициди або нафтопродукти, можуть бути важкими для поглинання рослинами.

2. Накопичення токсичних речовин у рослинах. Один з основних недоліків фітореMediaції полягає в тому, що рослини, які використовуються для очищення, можуть накопичувати токсичні елементи, такі як важкі метали (свинець, кадмій, миш'як) та органічні забруднювачі (пестициди, нафтопродукти). Це може призвести до того, що самі рослини стають джерелом забруднення [10, 13].

3. ФітореMediaція є повільним процесом, що може займати роки для досягнення значних результатів, особливо на великих територіях. Це може бути проблемою, якщо очищення забруднених територій потребує термінового втручання. Крім того, рослини можуть не досягати достатньо високої концентрації токсичних речовин, щоб ефективно очистити забруднений ґрунт або воду [40, 109].

4. Для ефективного застосування фітореMediaції потрібна значна площа земель, що може бути проблемою у разі обмежених ресурсів або наявності великих забруднених територій. Крім того, необхідно враховувати витрати на вирощування рослин і підтримку їхнього здоров'я, що може бути економічно не вигідним в порівнянні з іншими методами очищення (табл. 1.2).

Основні негативні аспекти фітореMediaції

Аспект негативного впливу	Опис	Потенційний негативний ефект
Накопичення токсичних речовин	Рослини можуть накопичувати забруднювачі, що загрожує їх поширенню в харчовій ланцюг.	Потенційна небезпека для здоров'я людей і тварин через накопичення токсинів.
Часова затримка	ФітореMediaція є повільним процесом, що займає багато часу для досягнення ефективних результатів.	Неможливість швидкої очистки забруднених територій, особливо в разі термінової потреби.
Обмеження для певних забруднювачів	Деякі токсичні речовини не можуть бути ефективно поглинені або розкладені рослинами.	Обмежена ефективність при очищенні від певних типів забруднювачів.
Ризик еутрофікації	Очищення води водними рослинами може призвести до надмірного накопичення поживних речовин у воді.	Зниження якості води, загибель водних організмів через дефіцит кисню.
Потреба у великих площах	Для ефективної фітореMediaції необхідно використовувати великі площі земель та ресурси для підтримки рослин.	Неекономічність та обмежена площа доступних земель для застосування.

ФітореMediaція, як технологія очищення забруднених екосистем, включає різні методи, одним із яких є *фітоекстракція*. Цей підхід передбачає використання рослин для поглинання, трансформації або накопичення токсичних речовин з ґрунту чи води, що дає змогу знизити рівень забруднення навколишнього середовища. Фітоекстракція є одним із найбільш ефективних методів для очищення земель від важких металів та інших токсинів, що може бути застосовано в різних екологічних умовах.

Фітоекстракція – це процес, за якого рослини поглинають токсичні елементи (зокрема важкі метали) з ґрунту або води і накопичують їх у своїх тканинах. Це може відбуватися через кореневу систему, яка активно абсорбує забруднювачі з навколишнього середовища, або через трансферт, коли елементи переносяться з коренів у стебла та листя рослин. Фітоекстракція має важливе значення для технологій очищення забруднених територій, оскільки вона може бути застосована до великих площ і має ряд переваг у порівнянні з традиційними методами очищення [16, 17].

Фітоекстракція включає три основні етапи:

- поглинання: рослини поглинають токсичні елементи через корені з ґрунту або води.
- транспортування: поглинуті забруднювачі транспортуються по всій рослині, в тому числі до стебел, листя та квітів.
- накопичення: токсичні елементи накопичуються в тканинах рослин, особливо в листі, що дозволяє знизити їх концентрацію в навколишньому середовищі.

Ефективність фітоекстракції залежить від типу забруднювача, виду рослини, умов навколишнього середовища, концентрації забруднювачів. Переваги фіто екстракції це екологічна безпека (процес є природним і не потребує хімічних речовин, що знижує ризики для довкілля), низька вартість (витрати на застосування фітоекстракції є значно нижчими порівняно з традиційними методами очищення), біоремедіація та відновлення екосистем (очищує забруднені території, а й відновлює екосистеми, створюючи сприятливі умови для інших видів рослин і тварин).

Однак існують і обмеження: невелика швидкість очищення, накопичення токсичних елементів в рослинах (при неправильному використанні рослини можуть стати джерелом забруднення для харчового ланцюга, якщо їх не вивести вчасно) [20, 30].

З метою підвищення ефективності фітоекстракції вчені розробляють нові технології, такі як: генетичне модифікування рослин (створення рослин з підвищеною здатністю до поглинання важких металів), використання біостимуляторів (прискорення процесу поглинання забруднювачів за допомогою добавок, що стимулюють ріст рослин), технології рекультивації земель (поєднання фітоекстракції з іншими методами, такими як біоремедіація, для комплексного очищення забруднених територій).

Одним із важливих напрямків цієї технології є *фітостабілізація*, яка орієнтована на стабілізацію токсичних речовин у ґрунті, не дозволяючи їм поширюватися або потрапляти в харчовий ланцюг. Це процес, при якому

рослини сприяють зменшенню мобільності забруднювачів в довкіллі, через що забезпечується довгострокова безпека екосистеми. Фітостабілізація застосовується, коли неможливо або небажано вилучати забруднювачі повністю, проте необхідно знизити їхню активність та поширення.

Таблиця 1.3

Порівняння методів фітоекстракції та традиційних методів очищення

Метод очищення	Опис	Переваги	Недоліки
Фітоекстракція	Використання рослин для поглинання токсичних речовин з ґрунту та води.	Екологічно безпечний, економічний, відновлює екосистеми.	Повільний процес, обмежена ефективність для деяких забруднювачів.
Хімічне очищення	Використання хімічних реагентів для нейтралізації або ізоляції забруднювачів.	Швидке очищення, ефективність для багатьох забруднювачів.	Високі витрати, можливі небажані побічні продукти.
Механічне очищення	Використання механічних пристроїв для вилучення забруднювачів.	Швидкість процесу, ефективність на великих площах.	Висока вартість, викиди CO ₂ , шкода для навколишнього середовища.

Фітостабілізація включає використання рослин для зниження біодоступності токсичних речовин в ґрунті або воді, щоб вони не могли переміщатися в інші частини екосистеми. Рослини сприяють стабілізації забруднювачів за допомогою таких механізмів [35, 130]:

– адсорбція: рослини поглинають забруднювачі в кореневій системі, утримуючи їх у ґрунті, що запобігає їх переміщенню.

– випаровування: у деяких випадках забруднювачі можуть випаровуватися через рослини, деякі з яких можуть потрапляти в атмосферу в обмежених кількостях.

– формування комплексу з металами: рослини можуть формувати комплекси з важкими металами, знижуючи їхню біодоступність і токсичність.

Цей метод має на меті не видалення забруднювачів з навколишнього середовища, а їх стабілізацію і локалізацію, що важливо для збереження екологічного балансу на забруднених територіях.

Процес фітостабілізації складається з кількох етапів:

– ідентифікація забруднювачів: для початку необхідно точно визначити вид забруднювачів, їх концентрацію і ступінь небезпеки.

– вибір рослин: для кожного типу забруднення обираються відповідні види рослин, які мають здатність стабілізувати конкретні забруднювачі. це можуть бути як природні, так і генетично модифіковані рослини.

– внесення рослин у забруднений ґрунт або водне середовище: рослини висаджуються на території, що потребує очищення. у випадку водних екосистем можуть застосовуватись водні рослини або водорості.

– моніторинг і догляд: після висаджування рослин проводиться моніторинг ефективності стабілізації та збереження екологічного балансу.

Ефективність фітостабілізації залежить від кількох факторів: тип забруднювача (важкі метали, такі як свинець, кадмій, арсен, потребують різних підходів і видів рослин для стабілізації); хімічні властивості ґрунту (рН, вологість, органічні речовини в ґрунті можуть значно впливати на здатність рослин утримувати забруднювачі); тип рослин (рослини, які мають потужну кореневу систему, здатні стабілізувати забруднення ефективніше) [36, 42].

Переваги фітостабілізації включають: екологічна безпека (фітостабілізація є менш агресивним методом порівняно з іншими технологіями, такими як хімічна нейтралізація чи механічне очищення); мінімальні витрати (цей метод є економічно вигідним у порівнянні з іншими методами очищення, особливо для великих територій); збереження екосистеми (фітостабілізація дозволяє відновлювати природні умови без необхідності повного очищення, що може бути важким або неможливим); вдосконалення властивостей ґрунту (рослини, що використовуються для

фітостабілізації, часто сприяють покращенню структури ґрунту та його родючості) (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Порівняння фітостабілізації з іншими методами очищення

Метод очищення	Опис	Переваги	Недоліки
Фітостабілізація	Використання рослин для зниження мобільності забруднювачів.	Екологічно безпечний, економічний, сприяє відновленню ґрунту.	Не дає повного очищення, залежність від умов.
Хімічна стабілізація	Застосування хімічних реагентів для нейтралізації забруднювачів.	Швидке досягнення результатів, ефективність для важких металів.	Високі витрати, потенційне забруднення побічними продуктами.
Механічне очищення	Використання технічних засобів для видалення забруднювачів.	Швидкість очищення, можливість обробки великих площ.	Високі витрати, можливі шкоди для навколишнього середовища.

Обмеження: не забезпечує повного очищення (фітостабілізація не усуває забруднювачі з екосистеми, а лише знижує їх мобільність, що може бути недостатнім у разі високих концентрацій токсичних речовин) та залежність від умов середовища (ефективність фітостабілізації може значно змінюватися залежно від екологічних умов, таких як тип ґрунту чи кліматичні умови).

Фітостабілізація є важливим і перспективним методом для стабілізації забруднених територій, зокрема, коли повне очищення є складним або економічно нецікавим. Вона має значні екологічні переваги, зокрема екологічну безпеку, низьку вартість і здатність відновлювати екосистеми. Однак, для досягнення максимальних результатів, цей метод потребує додаткових досліджень і вдосконалення, зокрема щодо вибору оптимальних рослин для конкретних типів забруднень і умов.

Одним з ключових напрямків цієї технології є *фітодеградація* – процес, за якого рослини використовують біохімічні та фізіологічні механізми для перетворення токсичних речовин у менш шкідливі сполуки.

Цей підхід здобув популярність завдяки його здатності очищати різні види забруднень, зокрема органічні токсини, а також завдяки низьким витратам та мінімальним негативним впливам на навколишнє середовище [40, 44].

Фітодеградація є складним біохімічним процесом, що включає розщеплення або перетворення органічних забруднювачів за допомогою метаболічних механізмів рослин. Це може відбуватися через кілька основних механізмів [96, 105]:

- поглинання та трансформація: рослини поглинають органічні забруднювачі через кореневу систему, після чого вони можуть бути перетворені на менш токсичні сполуки в результаті метаболічних процесів, таких як гідроліз, окислення або редукція.

- використання мікробіоти кореневої зони: мікроорганізми, що знаходяться в кореневій зоні рослин (наприклад, бактерії, гриби), можуть активно брати участь у біодеградації токсичних сполук, прискорюючи процес фітодеградації.

- метаболічна трансформація: деякі рослини здатні перетворювати забруднювачі, наприклад, органічні пестициди, через специфічні ферментативні реакції.

Процес фітодеградації складається з кількох етапів:

- поглинання забруднювачів: рослини поглинають токсичні органічні сполуки через кореневу систему із ґрунту чи води.

- трансформація у рослинних тканинах: після поглинання токсини транспортуються в інші частини рослини, де відбуваються їх хімічні перетворення за допомогою ферментів або мікроорганізмів, що взаємодіють з рослиною.

- метаболічне розщеплення: перетворені токсини можуть бути розщеплені на менш токсичні або нешкідливі сполуки, які потім або зберігаються в рослині, або виводяться з її організму [42, 130].

Ефективність фітодеградації залежить від кількох ключових факторів: тип забруднювача (ефективна для органічних забруднювачів, таких як

пестициди, нафтопродукти, органічні розчинники, поліароматичні вуглеводні тощо); вид рослини (вибираються рослини, які мають здатність до інтенсивного метаболізму та взаємодії з мікроорганізмами, що стимулюють біодеградацію); умови середовища (температура, вологість, рН ґрунту та інші фактори можуть значно впливати на швидкість і ефективність фітодеградації); мікробіота кореневої зони (природна мікрофлора в коренях рослин може взаємодіяти з токсичними речовинами, прискорюючи їх розкладання або перетворення).

Фітодеградація є біологічно чистим методом, оскільки не передбачає використання хімічних реагентів або технологій, які можуть негативно впливати на довкілля. Оскільки фітодеградація застосовується без фізичного втручання в екосистему, вона не завдає шкоди навколишньому середовищу і підтримує біорізноманіття [46, 115].

Таблиця 1.5

Порівняння фітодеградації з іншими методами очищення

Метод очищення	Опис	Переваги	Недоліки
Фітодеградація	Використання рослин для метаболічного перетворення органічних забруднювачів у менш токсичні сполуки.	Екологічно чистий, економічно вигідний, ефективний для органічних забруднювачів.	Повільний процес, обмежена ефективність для неорганічних токсинів.
Хімічне очищення	Застосування хімічних реагентів для нейтралізації забруднювачів.	Швидкий процес, ефективний для багатьох типів забруднень.	Висока вартість, можливе утворення токсичних побічних продуктів.
Механічне очищення	Використання технічних засобів для видалення забруднювачів.	Швидке очищення великих площ, ефективність для великих забруднень.	Високі витрати, шкода для навколишнього середовища.

Але, фітодеградація є повільним процесом і потребує більше часу порівняно з традиційними методами очищення, ефективна лише для органічних забруднювачів і може бути менш ефективною для деяких неорганічних токсинів, таких як важкі метали, поглинання токсичних сполук

рослинами може призвести до їх накопичення в їстівних частинах рослин, що становить загрозу для тварин або людей, якщо ці рослини використовуються в їжу.

На сьогодні учені розробляють нові підходи до фітодеградації, щоб підвищити її ефективність, зокрема: генетично модифіковані рослини; використання біостимуляторів; комбіновані методи (поєднання фітодеградації з іншими методами очищення, такими як фітоекстракція або фітостабілізація, для досягнення більш швидких і ефективних результатів) (табл. 1.5).

Фітосорбція є одним із важливих напрямків фіторемедіації, що використовує здатність рослин поглинати та утримувати різноманітні забруднювачі, включаючи важкі метали, радіонукліди та органічні токсиканти, з водного середовища чи ґрунту. Цей процес базується на сорбційних властивостях рослинних тканин, які утримують забруднювачі в клітинних структурах або на поверхні кореневої системи [55, 97].

Фітосорбція є ефективною для очищення ґрунтів, забруднених важкими металами або хімічними речовинами. Завдяки своїй екологічній безпечності та економічній доцільності цей підхід знайшов широке застосування у технологіях захисту довкілля.

Фітосорбція базується на таких основних процесах:

– поглинання забруднювачів через кореневу систему: корені рослин мають високу поверхневу активність і здатність утримувати забруднювачі завдяки фізико-хімічним процесам (іонообмін, адсорбція).

– накопичення у тканинах: після поглинання забруднювачі можуть накопичуватись у коренях або транспортуватись до інших частин рослини. це залежить від типу забруднювача та біохімічних властивостей рослини.

– поверхнева сорбція: деякі токсини утримуються на поверхні кореневої системи без проникнення в тканини рослини, що запобігає їхньому розповсюдженню.

Фітосорбція включає кілька етапів: контакт з забруднювачем (рослина встановлює фізичний контакт із забрудненою водою чи ґрунтом); сорбція на поверхні (забруднювачі зв'язуються з поверхнею коренів за рахунок іонного обміну, водневих зв'язків чи інших хімічних механізмів); транспортування в рослину (у випадку легкокорозчинних забруднювачів відбувається їх транспортування до тканин рослини, де вони акумулюються) [109].

Фітосорбція застосовується для видалення важких металів (Pb, Cd, Zn), радіонуклідів (U, Cs), а також органічних речовин. Використання рослин мінімізує вторинне забруднення і є природним способом очищення. У випадках сильного забруднення ефективність методу може бути низькою через токсичність для рослин. Забруднювачі, що накопичуються в рослинній біомасі, потребують утилізації, оскільки можуть становити небезпеку. Ефективність фітосорбції залежить від сезону, зокрема від температурних і кліматичних умов (табл. 1.6).

Дослідницькі інновації в галузі фітосорбції: використання водоростей (застосування водоростей для очищення води від важких металів.); комбіновані методи (поєднання фітосорбції з іншими методами, такими як хімічна або механічна очистка).

Таблиця 1.6

Порівняння фітосорбції з іншими методами очищення

Метод	Тип забруднювача	Переваги	Недоліки
Фітосорбція	Важкі метали, органічні токсиканти	Низька вартість, екологічна безпечність	Потреба в утилізації біомаси, залежність від клімату
Хімічна адсорбція	Органічні та неорганічні речовини	Висока швидкість очищення	Висока вартість, утворення побічних продуктів
Механічна очистка	Великі забруднювачі	Ефективність для великих обсягів	Шкода для екосистем, висока енергоємність

Фітосорбція є ефективним, екологічно безпечним та економічно вигідним методом очищення ґрунтів від забруднювачів, зокрема важких металів і токсичних органічних сполук. Однак ефективність цього методу

обмежується концентрацією забруднювачів, кліматичними умовами та необхідністю правильної утилізації рослинної біомаси [57, 60].

Отже, фітореMediaція є важливим інструментом для екологічного очищення забруднених територій, який має значні переваги, зокрема економічні та екологічні. Однак існують і обмеження щодо її застосування, які потребують додаткових досліджень та вдосконалення технологій. Для ефективного використання цього методу необхідно враховувати тип забруднювачів, екологічні умови та час, що потрібен для досягнення бажаних результатів [128].

1.2 Принципи та механізми фітореMediaції ґрунтів на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ)

Полігони ТПВ є значними джерелами забруднення довкілля через накопичення важких металів, органічних токсикантів та інших шкідливих речовин у ґрунтах. ФітореMediaція на таких об'єктах виступає перспективною технологією для відновлення екосистем, оскільки вона дозволяє використовувати рослини для поглинання, трансформації та стабілізації забруднювачів.

Так як фітореMediaція базується на природних синергетичних зв'язках між рослинами, мікроорганізмами та навколишнім природним середовищем, застосування її не вимагає інтенсивних технологічних або геологічних методів. Втручання людини може полягати лише в організації відповідних угруповань рослин і мікроорганізмів в певному регіоні або в застосуванні агрономічних методів, таких як обробка ґрунту та внесення добрив, для стимулювання природного відновлення або інактивзації техногенно забруднених ділянок [97, 127].

Застосування цієї технології наразі викликає інтерес завдяки своїй інноваційності, економічній вигідності та естетичній привабливості для суспільства в порівнянні з більш альтернативними стратегіями відновлення,

які застосовують механічні, геологічні або хімічні методи для вилучення чи інактивації ділянок, забруднених небезпечними відходами.

Основні принципи фітореMediaції на полігонах ТПВ включають:

– використання природної або спеціально відібраної флори для очищення ґрунтів на полігонах ТПВ. Полігони твердих побутових відходів (ТПВ) є одним із найбільших джерел забруднення ґрунтів через накопичення токсичних важких металів, органічних забруднювачів і побічних продуктів розкладу відходів. Природна флора, що росте на полігонах, часто адаптується до екстремальних умов, включаючи високу концентрацію токсичних речовин, низьку родючість ґрунтів і нерегулярне зволоження.

Прикладами природної флори для полігонів ТПВ можуть бути багаторічні трави (костриця червона, тимофіївка лучна) – ефективні для фітостабілізації; дерева (верба, тополя) – сприяють фітодеградації органічних речовин; кущі (акація біла) – здатні фіксувати азот та покращувати родючість ґрунтів [97].

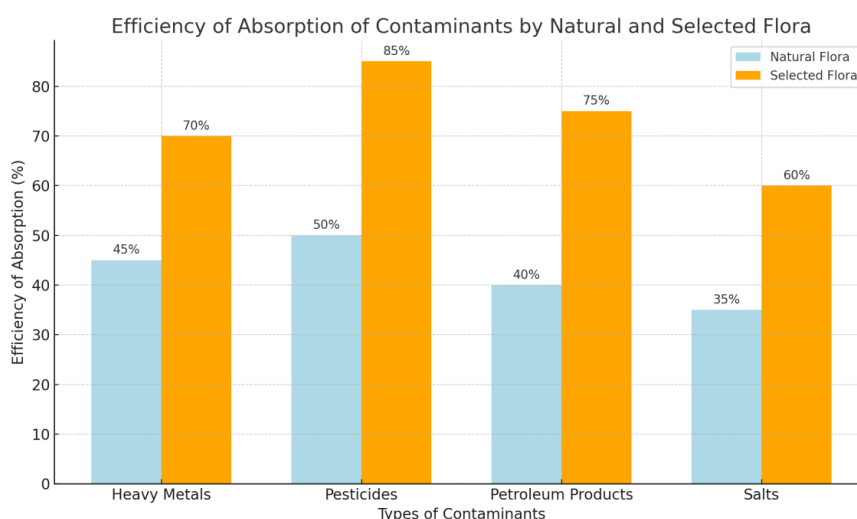


Рис. 1.1 Порівняння ефективності поглинання забруднювачів природною та спеціально відібраною флорою для чотирьох типів забруднювачів: важкі метали, пестициди, нафтопродукти та солі.

Спеціально відібрані рослини, часто із застосуванням генетичної модифікації або селекції, мають підвищену здатність до очищення ґрунтів.

Вибір флори залежить від: типу забруднювачів (важкі метали, органічні речовини), фізико-хімічних характеристик ґрунтів та локальних кліматичних умов.

Спеціально відібрана флора показала значно вищу ефективність поглинання важких металів (70 %), порівняно з природною (45 %). Аналіз поглинання пестицидів показав, що найбільша різниця між двома групами: спеціально відібрана флора досягла ефективності 85%, тоді як природна лише 50%. Поглинання нафтопродуктів природною флорою становить 40%, тоді як спеціально відібрана флора досягла 75%. Найменша ефективність поглинання солей для обох типів флори, але спеціально відібрана все одно значно переважає (60% проти 35%). Отже, спеціально відібрана флора є більш ефективною у поглинанні всіх типів забруднювачів, особливо пестицидів та нафтопродуктів. Це підкреслює важливість селекції та генетичного підбору рослин для досягнення максимального екологічного ефекту на полігонах ТПВ [126].

Використання природної та спеціально відібраної флори для очищення ґрунтів на полігонах ТПВ базується на інтеграції кількох технологічних підходів: моделювання процесів (використання геоінформаційних систем (ГІС) для визначення зон найбільшого забруднення); аналіз ризосферних процесів (дослідження мікробіологічної активності ґрунту для прискорення деградації органічних забруднювачів); біоінженерія (створення рослин, що здатні до гіперакумуляції специфічних забруднювачів) [67, 80].

Отже, використання природної та спеціально відібраної флори для очищення ґрунтів на полігонах ТПВ є перспективним напрямком екотехнологій. Природна флора забезпечує стабільність екосистем, тоді як спеціально відібрані рослини значно підвищують ефективність фітореMediaції. Інтеграція цих підходів із сучасними технологіями дозволяє створювати ефективні системи захисту довкілля [123].

– розвиток фітотехнологій, адаптованих до локальних кліматичних і ґрунтових умов для очищення ґрунтів на полігонах ТПВ. Ефективність

фітотехнологій, таких як фітореMediaція, значною мірою залежить від адаптації до локальних кліматичних та ґрунтових умов. Цей підхід сприяє інтеграції екосистемного підходу в практику захисту довкілля, дозволяючи оптимізувати процеси очищення та стабілізації забруднювачів.

Принципи адаптації фітотехнологій до локальних умов включають аналіз локальних ґрунтових і кліматичних умов. Різноманітність клімату і типів ґрунтів потребує індивідуального підходу до вибору рослин: у посушливих умовах застосовуються види з високою стійкістю до засухи (*Haloxylon ammodendron*, верблюжа колючка); у регіонах з високою вологістю ефективними є види, здатні переносити надлишок води, наприклад, очерет звичайний (*Phragmites australis*); для ґрунтів з низькою родючістю важливими є види, які можуть покращувати ґрунтові характеристики через фіксацію азоту, наприклад, люцерна (*Medicago sativa*).

Місцеві рослини, які вже адаптовані до специфічних умов, забезпечують високу виживаність і ефективність у процесах очищення. При цьому зменшуються витрати на догляд за рослинами та підвищується стійкість до екстремальних кліматичних змін. Поєднання біотехнологій з традиційними методами дозволяє створювати рослини, адаптовані до локальних умов і здатні до поглинання специфічних забруднювачів. Наприклад, генетично модифіковані форми тополі (*Populus spp.*) для поглинання кадмію і свинцю [97, 103].

Таблиця 1.7

Приклади успішного впровадження адаптованих фітотехнологій

Регіон	Тип забруднення	Використані рослини	Ефективність очищення
Полісся (Україна)	Радіонукліди	Соняшник (<i>Helianthus annuus</i>)	Зниження радіонуклідів на 40–50 %
Степ (Казахстан)	Солончаки, метали	Солянка (<i>Salsola spp.</i>)	Поглинання натрію до 60 %
Азія (Індія)	Органічні сполуки	Бамбук (<i>Bambusa vulgaris</i>)	Деградація пестицидів до 70 %
Європа (Франція)	Важкі метали	Ковила (<i>Stipa spp.</i>), злакові трави	Поглинання свинцю до 80 %

Адаптовані фітотехнології є частиною ширшої стратегії управління полігонами ТПВ, яка включає: моніторинг забруднень (використання сенсорів і ГІС для визначення зон найбільшого ризику); планування насаджень (створення багаторічних систем із врахуванням сезонності й природних змін клімату); застосування мікробіологічних препаратів (сприяння прискоренню деградації органічних речовин).

Розвиток адаптованих до локальних умов фітотехнологій є ключовим елементом у вирішенні проблем забруднення полігонів ТПВ. Завдяки інтеграції природних та біотехнологічних підходів можна значно підвищити ефективність очищення, знизити економічні витрати та забезпечити довготривалий екологічний ефект [93].

– Комплексний підхід із використанням декількох механізмів фітореMediaції поєднує декілька механізмів фітореMediaції, забезпечує більш ефективне та стабільне очищення ґрунтів завдяки інтеграції біофізичних, хімічних і біологічних процесів.

Фітоекстракція. Рослини, що використовуються для фітоекстракції, мають здатність до накопичення важких металів у надземних органах (листя, стебла) без істотної шкоди для власного розвитку. До них належать: Тополя (*Populus spp.*) (добре накопичує важкі метали, особливо цинк, мідь та свинець); Гірчак (*Polygonum spp.*) (відомий високою здатністю до накопичення кадмію, міді, свинцю); Гірчиця сарептська (*Brassica juncea*) (має високу здатність поглинати кадмій і свинець, швидко росте); Соняшник (*Helianthus annuus*) (відомий здатністю до поглинання радіонуклідів і важких металів, таких як уран, свинець, цинк). Ці рослини швидко ростуть, легко адаптуються до різних типів ґрунтів, а також мають глибоку кореневу систему, що дозволяє їм поглинати забруднювачі з великої глибини [122].

Фітостабілізація. Рослини для фітостабілізації зазвичай мають розгалужену кореневу систему для закріплення ґрунту та зниження міграції забруднювачів, особливо важких металів. Це Канарковий спориш (*Agrostis*

tenuis) (має здатність до закріплення свинцю та кадмію в кореневій зоні); Ковила пірчаста (*Stipa capillata*) (ефективно стабілізує важкі метали, такі як цинк, кадмій); Люцерна (*Medicago sativa*) (добре стабілізує кадмій та свинець, адаптується до різних ґрунтів, має глибокі корені); Верхівкова осока (*Carex spp.*) (часто використовується для стабілізації ґрунтів на ділянках, забруднених міддю та свинцем) [106].

Ризодеградація. У ризодеградації використовуються рослини, які утворюють взаємовигідні асоціації з мікроорганізмами для стимулювання біорозкладу органічних забруднювачів у кореневій зоні. Конюшина біла (*Trifolium repens*) (стимулює мікроорганізми для розкладу пестицидів та нафтопродуктів); Лисохвіст лучний (*Alopecurus pratensis*) (добре розвивається на забруднених нафтою ґрунтах і сприяє активізації біорозкладу органічних речовин); Вербка (*Salix spp.*) (активізує мікроорганізми в зоні коренів, що сприяє розкладу органічних забруднювачів). Рослини для ризодеградації мають глибоку і розгалужену кореневу систему, яка збільшує площу контакту з ґрунтом і стимулює діяльність мікроорганізмів, що розкладають органічні речовини.

Фітодеградація. Для фітодеградації підходять рослини, які здатні безпосередньо поглинати та метаболізувати органічні забруднювачі за допомогою власних ферментів. Це Тростина (*Phragmites australis*) (має здатність розкладати органічні забруднювачі, такі як нафтові продукти, і феноли); Папороть (*Pteris vittata*) (відома здатністю поглинати та метаболізувати арсен); Кормова редька (*Raphanus sativus*) (поглинає та частково метаболізує пестициди і деякі промислові забруднювачі). Рослини мають здатність метаболізувати органічні речовини завдяки ферментам, які перетворюють токсичні сполуки на менш шкідливі форми [102].

Фіторозсіювання. Фіторозсіювання використовує рослини, здатні випаровувати забруднювачі, які потрапляють до рослини через кореневу систему, трансформуючи їх у леткі форми. Лісовий горіх (*Corylus spp.*) (ефективно поглинає та випаровує органічні леткі забруднювачі); Очерет

звичайний (*Scirpus lacustris*) (підходить для фіторозсіювання летких органічних речовин та мікроелементів); Тополя (*Populus spp.*) (ефективна для поглинання і випаровування таких сполук, як тріметилсилілхлорид). Рослини мають швидку здатність до транспірації, що дозволяє випаровувати леткі забруднювачі через листя, таким чином знижуючи їх концентрацію в ґрунті [120].

Комплексний підхід із використанням декількох механізмів фіторемедіації, таких як фітоекстракція, фітосорбція, фітодеградація та фітостабілізація, забезпечує високий рівень очищення завдяки синергії різних процесів. Такий підхід дає змогу ефективніше розв'язувати проблеми екологічного забруднення, підвищуючи ефективність та стійкість систем захисту довкілля. Поєднання кількох механізмів забезпечує більш комплексне очищення. Так, фітоекстракція може комбінуватися з фітодеградацією для одночасного видалення металів і органічних сполук; фітосорбція ефективно працює в поєднанні з фітостабілізацією, забезпечуючи як поглинання, так і закріплення забруднювачів.

Приклад: застосування очерету та люцерни, у поєднанні ці рослини забезпечують: адсорбцію металів (фітосорбція), розщеплення органічних сполук (фітодеградація) та закріплення залишкових металів у ґрунті (фітостабілізація).

Таблиця 1.8

Фіторемедіація ґрунтів на полігонах ТПВ

Механізм	Тип забруднювачів	Приклади рослин	Ефективність	Обмеження
Фітоекстракція	Важкі метали	Гірчак, соняшник, кукурудза	Висока для важких металів	Потреба в утилізації біомаси
Фітостабілізація	Важкі метали, органічні речовини	Люцерна, конюшина	Зниження міграції забруднювачів	Ефективність залежить від типу ґрунту
Фітодеградація	Органічні забруднювачі	Верба, тополя	Розщеплення токсичних речовин	Потреба в оптимальних умовах для мікроорганізмів
Ризосферний вплив	Органічні забруднювачі	Бобові культури	Прискорення деградації	Залежність від складу ґрунту та мікрофлори

Отже, комплексний підхід із використанням фітоекстракції, фітосорбції, фітодеградації та фітостабілізації дозволяє максимально ефективно очищувати ґрунти полігонів ТПВ від різноманітних забруднювачів. Такий підхід забезпечує екологічну стійкість і сприяє відновленню екосистем. Його інтеграція в системи управління полігонами ТПВ є перспективним напрямом у сучасних технологіях захисту довкілля [107, 118].

1.3 Показники ефективності фіторемедіації ґрунтів на полігонах ТПВ

Оцінка ефективності фіторемедіації ґрунтів на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ) є важливим етапом, що забезпечує можливість удосконалення технологій та адаптації до локальних умов. Основними показниками ефективності є ступінь зниження концентрації забруднювачів, біомасова продуктивність рослин, рівень накопичення забруднювачів у біомасі, динаміка деградації органічних речовин та поліпшення фізико-хімічних характеристик ґрунту.

Ступінь видалення забруднювачів (*Cleanup Efficiency, CE*). є ключовим кількісним показником ефективності фіторемедіації. Він визначає, який відсоток забруднювачів у ґрунті було видалено завдяки використанню рослинних технологій. Цей показник дозволяє оцінити як здатність рослин до поглинання й акумуляції забруднювачів, так і загальний вплив на зниження екологічної небезпеки полігонів твердих побутових відходів (ТПВ):

$$CE = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} * 100\%$$

C_i – початкова концентрація забруднювача;

C_f – кінцева концентрація забруднювача.

Чинники, що впливають на показник *CE*: тип рослин (рослини зі специфічними властивостями (наприклад, гіперакумулятори) мають вищий

СЕ); тип забруднювачів (метали, органічні сполуки та солі по-різному реагують на фітореMediaцію); кліматичні умови (температура, вологість та інші фактори впливають на метаболізм рослин); підготовка ґрунту (рівень аерації, кислотність і наявність допоміжних мікроорганізмів відіграють важливу роль). Отже, показник СЕ є універсальним інструментом для оцінки ефективності фітореMediaції й обґрунтування її застосування на полігонах ТПВ [111].

Фактор накопичення (*Bioaccumulation Factor, BAF*) є ключовим параметром, що використовується для оцінки здатності рослин накопичувати забруднювачі з ґрунту. Цей показник важливий для визначення ефективності фітореMediaції, зокрема в контексті очищення ґрунтів на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ). BAF дозволяє ідентифікувати рослини-гіперакумулятори, які найбільш ефективно видаляють токсичні речовини. Він показує здатність рослин поглинати і накопичувати забруднювачі в тканинах:

$$BAF = \frac{C_{plant}}{C_{soil}}$$

C_{plant} – концентрація забруднювача в рослині;

C_{soil} – концентрація забруднювача в ґрунті.

$BAF > 1$ свідчить про здатність рослин активно акумулювати забруднювачі, що є важливою характеристикою для фітореMediaційних видів.

Чинники, що впливають на BAF: тип забруднювача (органічні сполуки, важкі метали та інші токсини мають різну мобільність у ґрунті); фізико-хімічні властивості ґрунту (кислотність, вологість та вміст органічних речовин впливають на доступність забруднювачів); особливості рослин (видові характеристики, включаючи кореневу систему та механізми транспортування речовин) [113].

Фактор накопичення є одним із ключових параметрів, який характеризує ефективність фітореMediaції. Результати досліджень свідчать, що спеціально відібрана флора демонструє вищий рівень акумуляції

забруднювачів порівняно з природною. Це підкреслює важливість селекції рослин для підвищення ефективності очищення ґрунтів на полігонах ТПВ.

Таблиця 1.9

Значення ВАФ для різних типів рослин і забруднювачів

Тип забруднювача	Рослина	ВАФ природної флори	ВАФ спеціально відібраної флори	Коментар
Важкі метали (Pb, Cd)	<i>Brassica juncea</i>	0,9	2,3	Гіперакумуляція у кореневій системі
Органічні сполуки	<i>Phragmites australis</i>	0,7	1,8	Ефективне видалення пестицидів
Нафтопродукти	<i>Helianthus annuus</i>	0,6	1,5	Поглинання через надземну частину
Сольові забруднення	<i>Atriplex halimus</i>	0,2	2,0	Солестійкість як адаптивна риса

Біомасова продуктивність є важливим параметром для оцінки ефективності фітореMediaції ґрунтів на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ). Цей показник відображає здатність рослин не тільки накопичувати забруднювачі, але й формувати значну біомасу, яка згодом може бути використана для утилізації або подальшої переробки. Біомасова продуктивність є особливо важливою у технологіях захисту довкілля, оскільки вона визначає економічну доцільність та екологічну ефективність процесу.

Біомасова продуктивність визначається як кількість сухої маси рослин, сформованої на одиниці площі за певний час. Основні параметри включають:

- суху масу рослин (г/м^2): вимірює загальний вихід біомаси.
- коефіцієнт накопичення енергії: співвідношення між акумуляцією енергії у формі біомаси та споживанням ресурсів.
- темп росту рослин ($\text{г/м}^2/\text{доба}$): показує швидкість формування біомаси.

Чинники, що впливають на біомасову продуктивність: тип рослин (швидкорослі види з потужною кореневою системою показують вищу

продуктивність); ґрунтові умови (забезпеченість поживними речовинами, структура ґрунту та рівень забруднення); кліматичні умови (температура, вологість, освітлення); застосування агротехнічних заходів (використання біопрепаратів, добрив та зрошення).

Біомасова продуктивність є не тільки показником росту рослин, але й важливим фактором для оцінки ефективності фітореMediaції, оскільки: висока продуктивність сприяє більшому вилученню забруднювачів завдяки збільшенню загальної площі поглинання, зібрану біомасу можна переробляти на біопаливо, добрива або інші корисні продукти, рослини з високою продуктивністю ефективніше стабілізують ґрунт та знижують ерозію.

Дослідження показують, що для фітореMediaції ТПВ найкращими є рослини, які поєднують високу біомасову продуктивність з ефективністю поглинання забруднювачів. Наприклад, *Helianthus annuus* (соняшник) завдяки високій продуктивності та здатності видаляти органічні забруднювачі є перспективним видом для очищення полігонів; *Brassica juncea* (гірчиця) має високу ефективність видалення важких металів, хоча її біомаса менша; *Phragmites australis* (очерет) підходить для очищення забруднень водою та ґрунтом, багатим на органічні речовини; *Populus spp.* (тополя) має найбільшу біомасову продуктивність, однак ефективність видалення металів дещо нижча.

Динаміка деградації органічних речовин у ґрунті є ключовим процесом, який визначає ефективність фітореMediaції, особливо на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ). Цей показник демонструє, наскільки успішно рослини разом із супутніми мікроорганізмами здатні руйнувати токсичні органічні сполуки. Для екологічних технологій захисту довкілля оцінка динаміки деградації органіки дозволяє вимірювати швидкість і повноту очищення ґрунтів.

Динаміка деградації органічних речовин (ДОР) вимірюється за зміною концентрацій забруднювачів у ґрунті з часом. Основні показники:

1. Швидкість деградації (mg/kg/доба): кількість органічних забруднювачів, що розкладаються за добу.

2. Залишкова концентрація (mg/kg): вміст забруднювачів після завершення певного періоду фіторемедіації.

3. Коефіцієнт деградації (k): експоненційна швидкість розпаду органічних речовин.

Фіторемедіація органічних речовин базується на взаємодії рослин із мікроорганізмами ґрунту, що руйнують токсичні сполуки. Основні механізми включають: фітодеградацію (рослини виділяють ферменти та стимулюють мікробну активність у зоні ризосфери); фітоекстракцію (накопичення органічних забруднювачів у тканинах рослин із подальшою утилізацією біомаси); біостимуляцію (корені рослин виділяють поживні речовини, що сприяють росту бактерій і грибів, які розкладають органіку).

Дослідження показують, що різні види рослин мають різну ефективність у деградації органічних речовин. Зокрема, швидкорослі трави й дерева забезпечують максимальну активність мікроорганізмів у ризосфері.

Наприклад, очерет *Phragmites australis* демонструє найвищу швидкість деградації органічних забруднювачів (4,44 mg/kg/доба), що пов'язано з розвиненою кореневою системою та стимуляцією мікробної активності.

Динаміка деградації органічних речовин є важливим індикатором для оцінки швидкості очищення ґрунтів (швидка деградація знижує ризики для довкілля); вибору рослин (рослини, що сприяють максимальній деградації, доцільно використовувати у складних умовах полігонів ТПВ); оптимізації методів фіторемедіації (врахування локальних умов сприяє покращенню ефективності процесу).

Динаміка деградації органічних речовин є ключовим показником ефективності фіторемедіації ґрунтів на полігонах ТПВ. Використання таких рослин, як *Phragmites australis* та *Helianthus annuus*, дозволяє досягти високих темпів очищення ґрунтів завдяки їхній здатності стимулювати

деградацію органіки. Результати досліджень підкреслюють необхідність подальших робіт з адаптації фітотехнологій до локальних умов.

Фізико-хімічні властивості ґрунту є ключовими показниками його екологічного стану та придатності до відновлення. Поліпшення цих властивостей за допомогою фітореMediaції демонструє здатність технології не лише видаляти забруднювачі, але й відновлювати ґрунтовий покрив. У контексті полігонів твердих побутових відходів (ТПВ) фітореMediaція сприяє зниженню токсичності, поліпшенню структури ґрунту, підвищенню його родючості та здатності до самовідновлення.

Основні фізико-хімічні властивості ґрунту та їх зміни у процесі фітореMediaції

1. Структура ґрунту. ФітореMediaція сприяє формуванню стійкої агрегації частинок ґрунту. Кореневі системи рослин фізично впливають на ущільнення ґрунту, формуючи пористість, яка покращує аерацію та водопроникність.

2. Органічна речовина та вміст гумусу. Розкладання органічних решток рослин збагачує ґрунт органічною речовиною, що підвищує вміст гумусу. Це позитивно впливає на водоутримувальну здатність та катіонообмінну ємність.

3. Кислотно-лужний баланс (рН). Рослини здатні регулювати рН ґрунту через виділення органічних кислот та взаємодію з мікроорганізмами ризосфери. Відновлення оптимального рівня рН забезпечує стабільність хімічних процесів у ґрунті.

4. Токсичність ґрунту. Рослини акумулюють важкі метали та руйнують органічні токсиканти, що знижує рівень токсичності. Деякі види рослин також стимулюють мікробну активність, сприяючи природній детоксикації.

Наприклад, щільність ґрунту знижується завдяки розпушуванню кореневими системами рослин, що сприяє поліпшенню водного й повітряного режимів. Вміст органічної речовини значно підвищується через розклад рослинних залишків, що стимулює ґрунтове біорізноманіття.

Кисотно-лужний баланс (рН) стабілізується, створюючи умови для зростання більшості мікроорганізмів і рослин. Зниження концентрації важких металів свідчить про ефективність фітоекстракції та фіто сорбції [116].

Фіторе mediaція сприяє відновленню ґрунтової родючості, що робить його придатним для сільськогосподарського використання або рекультивації. Поліпшення структури ґрунту та зниження токсичності зменшує ймовірність інфільтрації забруднювачів у підземні води. Відновлений ґрунт створює сприятливе середовище для розвитку місцевої флори та фауни.

Таблиця 1.10

Оцінка ефективності фіторе mediaції ґрунтів

Показник	Рослина	Тип забруднення	Ефективність	Примітка
Ступінь видалення забруднювачів (CE)	Соняшник (<i>Helianthus annuus</i>)	Важкі метали (Cd, Pb, Zn)	45–60%	Висока ефективність для металів
Фактор накопичення (BAF)	Люцерна (<i>Medicago sativa</i>)	Натрій, мідь	BAF = 3,5 для Cu	Накопичує в коренях
Біомасова продуктивність	Очерет (<i>Phragmites australis</i>)	Органічні сполуки	До 30 т/га	Значна продуктивність біомаси
Деградація органічних сполук	Верба (<i>Salix spp.</i>)	Нафтопродукти	Зниження концентрації до 70%	Прискорює процес завдяки ферментам
Поліпшення фізико-хімічних властивостей	Ковила (<i>Stipa spp.</i>)	Комплексне забруднення	Підвищення органічного вмісту на 20%	Поліпшує структуру ґрунту

Таблиця 1.10 демонструє, що різні рослини мають спеціалізовані механізми для очищення ґрунту. Наприклад, соняшник ефективний для видалення важких металів, тоді як очерет забезпечує високий рівень очищення від органічних забруднювачів. Вибір конкретного виду рослини залежить від типу забруднення та бажаного екологічного результату.

Оцінка ефективності фіторе mediaції за допомогою кількісних показників є важливим кроком у впровадженні екологічно безпечних

технологій очищення ґрунтів на полігонах ТПВ. Різноманітність механізмів і адаптація до локальних умов забезпечують високий рівень очищення, поліпшення ґрунтових характеристик і відновлення екосистем. Подальші дослідження у цьому напрямі мають сприяти створенню стандартів для моніторингу ефективності фіторе mediaції [115].

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальні відомості про полігон ТПВ (географічне розташування, площа, історія експлуатації) м. Дергачі, Харківська область

Загальні відомості про полігон ТПВ. Дергачівський полігон твердих побутових відходів (ТПВ) у Харківській області є одним із найбільших та найсучасніших у регіоні. Він розташований неподалік м. Дергачі, приблизно за 10 км на північ від Харкова, і займає територію площею близько 40 гектарів. Його географічне розташування визначене з урахуванням логістичних та екологічних факторів, що мінімізують вплив на навколишнє середовище та забезпечують зручність транспортування відходів [50].



Рис. 2.1 Загальний вигляд полігону ТПВ м. Дергачі, Харківська область

Полігон обслуговує як Харків, так і прилеглі території, приймаючи значний обсяг побутового сміття. За час експлуатації його інфраструктура значно розвинулася. Останнім часом на території полігону активно

впроваджуються сучасні технології управління відходами. Це включає будівництво сміттєпереробного комплексу з потужністю обробки 80 тис. тонн змішаних відходів на рік, а також виробництво електроенергії за рахунок вилучення біогазу зі старих шарів відходів. Новий комплекс також передбачає перетворення старого полігону передбачає висадку дерев, буріння свердловин для видобутку біогазу, а також встановлення геомембран для захисту ґрунтів і повітря від забруднення, що є частиною екологічної реконструкції території. У перспективі планується створення рекреаційних об'єктів, таких як гірськолижна траса. Ці заходи є частиною ширшої програми з екологічного управління відходами, підтримуваної Світовим банком. Це робить Дергачівський полігон прикладом інтегрованого підходу до управління відходами в Україні, орієнтованого на впровадження найкращих практик сталого розвитку [28, 51].

Такі ініціативи значно знижують екологічне навантаження на довкілля, сприяють зменшенню викидів метану та сприяють відновленню деградованих земель. Водночас історія експлуатації полігону залишається джерелом забруднення ґрунтів, що підкреслює актуальність фіторе mediaційних заходів для реабілітації цієї території.



Рис. 2.2 Реконструкція полігону ТПВ у рамках проекту за підтримки Світового банку

Дергачівський полігон твердих побутових відходів має стратегічне значення для регіону. Полігон експлуатується з метою утилізації та переробки побутового сміття, а також вирішення екологічних питань, пов'язаних із накопиченням відходів. Площа комплексу дозволяє обслуговувати значну частину відходів, що генеруються міським та прилеглими населеними пунктами [29].

Географічне розташування полігону ТПВ м. Дергачі, Харківська область. Дергачівський полігон твердих побутових відходів (ТПВ) розташований у Харківській області, за 7 км на північний захід від адміністративного центру міста Харкова, поблизу міста Дергачі. Полігон займає територію площею близько 40 га в межах Дергачівської міської громади. Ця місцевість характеризується наявністю помірно хвилястого рельєфу та розташуванням на вододільній ділянці між басейнами річок Уди та Лопань, які є притоками Сіверського Дінця [52].



**Рис. 2.3 Географічне розташування полігону ТПВ м. Дергачі,
Харківська область**

Полігон розташований на висоті близько 150–160 метрів над рівнем моря. Ґрунтовий покрив представлений переважно чорноземами, які внаслідок багаторічного захоронення відходів зазнали значної деградації,

включно із забрудненням важкими металами, нафтопродуктами та іншими токсичними речовинами. Поруч із полігоном розташовані аграрні угіддя, що створює додаткові екологічні ризики для довкілля.

Район полігону характеризується помірно континентальним кліматом із чітко вираженими сезонами. Середньорічна температура повітря становить близько +8,0 °С, а кількість опадів коливається в межах 500–550 мм на рік. Такі кліматичні умови впливають на процеси деградації відходів, а також на ефективність впровадження технологій, таких як вилучення біогазу або фіторе mediaція.

Полігон розташований у межах водозбірного басейну річки Уди. У найближчій зоні є поверхневі та підземні водні джерела, які підпадають під ризик забруднення фільтратом відходів. Це підкреслює необхідність впровадження сучасних методів ізоляції, зокрема геомембран, які вже частково впроваджено на полігоні [17].

Дергачівський полігон має зручну транспортну доступність, що сприяє ефективній логістиці вивезення відходів із Харкова та прилеглих територій. До полігону ведуть асфальтовані дороги, які забезпечують безперервний рух сміттєвозів [29].

Отже, географічне розташування Дергачівського полігону є стратегічним для обслуговування міста Харкова та прилеглих районів, що робить його ключовим елементом регіональної системи поводження з відходами. Природні умови та гідрогеологічні особливості місцевості підкреслюють необхідність застосування екологічно безпечних технологій утилізації, таких як вилучення біогазу та фіторе mediaція. Наявність поруч сільськогосподарських угідь підвищує ризики екологічних проблем, які можуть бути мінімізовані за допомогою відповідного моніторингу та реабілітаційних заходів.

Структура та особливості використання площі полігону ТПВ м. Дергачі, Харківська область. Дергачівський полігон ТПВ є одним із найбільших у Харківській області. Його загальна площа становить близько

40 гектарів. Полігон було створено для прийому відходів із міста Харкова та прилеглих населених пунктів. На території полігону виділяють кілька зон:

1. *Активна зона захоронення відходів* є важливим елементом системи зберігання та утилізації ТПВ. Особливості цієї зони значною мірою впливають на екологічний стан прилеглих територій, враховуючи хімічні, фізичні та біологічні процеси, що проходять у відходах [69].

Активна зона на полігоні ТПВ м. Дергачі займає найбільш функціонально задіяну частину території полігону. Її розташування визначається з урахуванням топографії місцевості, гідрогеологічних умов та логістики під'їзних шляхів. Площа зони поступово змінюється залежно від обсягів нових відходів, які надходять на полігон та темпів їхнього ущільнення. Висота накопичення відходів варіюється залежно від технологій складування та ізоляції. За оцінками фахівців, середня висота шару відходів у активній зоні полігону в Дергачах може досягати 20-30 метрів, що створює додатковий тиск на підґрунтя та ґрунтові води [86].

Процеси, що проходять в активній зоні:

– анаеробне розкладання органічних відходів, що супроводжується утворенням метану, вуглекислого газу та інших газів. Це сприяє формуванню полігонного газу, який може бути використаний у виробництві енергії, але також становить ризик вибуху та шкодить атмосфері.

– через контакт води з відходами у активній зоні формується фільтрат, насичений органічними та неорганічними забруднювачами. Його неконтрольоване проникнення в підземні води є значним ризиком для екології.

– через недоліки у ізоляції відходів активна зона стає місцем активного розвитку мікроорганізмів, у тому числі потенційно небезпечних для здоров'я людей.

Екологічний вплив активної зони: забруднення атмосферного повітря (викиди метану та ін. парникових газів негативно впливають на локальний клімат, сприяючи зміні клімату та забрудненню прилеглих територій);

ризика забруднення водних ресурсів (через недоліки у гідроізоляції активна зона є джерелом забруднення підземних вод); погіршення стану ґрунтів (високі концентрації ВМ та ін. токсичних речовин, які виділяються в результаті розкладу відходів, змінюють склад ґрунтів, роблячи їх малопридатними для природної рекультивації). Ефективне управління цією зоною та впровадження сучасних екологічних технологій можуть суттєво зменшити ризики для довкілля та здоров'я населення [16].

2. *Зони рекультивації* є одним із найважливіших напрямів екологічного управління для мінімізації їхнього впливу на довкілля. Полігон ТПВ у м. Дергачі потребує зонування для ефективного проведення рекультиваційних заходів, які спрямовані на відновлення екосистем і безпечне використання території у майбутньому. Рекультивація полігону складається з технічного та біологічного етапів, кожен із яких включає низку специфічних заходів [15]:

– технічна рекультивація спрямована на стабілізацію відходів та підготовку поверхні до подальших робіт. Вона включає укриття відходів захисними шарами ґрунту, встановлення систем дренажу фільтратів і збору полігонного газу, а також формування рельєфу.

– біологічна рекультивація передбачає висаджування рослинності, яка стабілізує ґрунт, покращує його структуру та сприяє очищенню від забруднювачів.

На полігоні ТПВ м. Дергачі виділяються такі зони рекультивації:

1. Активна зона відходів – включає поточні ділянки захоронення, які перебувають у процесі завершення експлуатації. На цих ділянках проводять ущільнення відходів, нанесення ізоляційного шару та встановлення інженерних систем для контролю фільтратів і газів.

2. Зона заведеної експлуатації – ця зона включає ділянки полігону, де припинено прийом відходів. Тут здійснюють нанесення основного шару ґрунту для захисту від ерозії та фільтрації, а також висаджування трав'янистої рослинності.

3. Перехідна зона – місця між активною зоною та зоною завершеної експлуатації, які потребують додаткових заходів стабілізації. Це зони, де відбувається інтеграція заходів технічної та біологічної рекультивації.

4. Зона моніторингу та рекреації – ділянки, які після завершення рекультивації можуть бути використані для обмеженої господарської діяльності або рекреаційних цілей. Тут проводиться постійний екологічний моніторинг.

Рекультивація полігону м. Дергачі передбачає застосування геосинтетичних матеріалів для ізоляції, а також технологій моніторингу газових викидів та фільтратів. Інтеграція цих технологій дозволяє покращити ефективність рекультивації та зменшити ризики для довкілля [87].

Рекультивація полігону ТПВ м. Дергачі є багатоступінчастим процесом, який вимагає комплексного підходу до зонування, технічних та біологічних заходів. Розробка чіткої стратегії та використання сучасних технологій сприяють мінімізації екологічного впливу полігону та створенню умов для його безпечного використання у майбутньому [69].

3. Технічна інфраструктура, що включає під'їзні дороги, ділянки для тимчасового зберігання відходів, а також об'єкти для збору та перероблення біогазу. Полігон твердих побутових відходів (ТПВ) у м. Дергачі має розгалужену технічну інфраструктуру, яка забезпечує його функціонування та мінімізацію впливу на довкілля. Ця інфраструктура включає під'їзні дороги, ділянки для тимчасового зберігання відходів, а також об'єкти для збору й перероблення біогазу [89].

На полігоні м. Дергачі реалізовані такі заходи щодо роботи з біогазом:

– система збору біогазу. Включає мережу перфорованих труб, які розташовані у відходах для збору газів, що утворюються під час анаеробного розкладання.

– утилізація біогазу. Отриманий газ використовують для генерації електроенергії або спалюють на спеціальних факелах для зменшення викидів метану.

– моніторинг емісій. Постійний контроль за кількістю виділеного біогазу, що дозволяє знижувати екологічні ризики.

Інші елементи інфраструктури: резервуари для збору та очистки фільтратів; охоронна зона, яка перешкоджає доступу сторонніх осіб та тварин; об'єкти для технічного обслуговування обладнання та транспорту.

Інфраструктура полігону ТПВ у м. Дергачі забезпечує його ефективну роботу та сприяє зниженню негативного впливу на довкілля. Використання сучасних технологій, зокрема систем збору біогазу та герметичних ділянок для зберігання відходів, відповідає екологічним стандартам і зменшує ризики забруднення [9, 19, 73].

Історія експлуатації полігону ТПВ м. Дергачі, Харківська область. Дергачівський полігон ТПВ було введено в експлуатацію у 1990-х роках для обслуговування зростаючих потреб міста Харкова та прилеглих територій. Спочатку полігон було створено як класичне звалище для захоронення відходів без використання сучасних технологій ізоляції чи переробки. З часом обсяг утворення відходів значно зріс через індустріалізацію регіону та збільшення кількості населення, що викликало необхідність розширення території полігону [17].

Основні етапи розвитку:

1. 1990-ті роки: полігон було створено для прийому побутових відходів без достатнього врахування екологічних наслідків. Перші роки експлуатації характеризувалися відсутністю спеціалізованих заходів щодо ізоляції фільтрату чи збору біогазу, що призвело до забруднення прилеглих територій.

2. 2000-ті роки: зі зростанням екологічної свідомості та посиленням державного регулювання в галузі поводження з відходами розпочалися перші спроби модернізації полігону. Було впроваджено мінімальні заходи ізоляції, зокрема покриття деяких ділянок шаром ґрунту.

3. 2010-ті роки: на полігоні розпочато будівництво систем збору біогазу, що дозволило мінімізувати викиди метану в атмосферу. Крім того,

розроблено плани рекультивації старих ділянок полігону, які вже не використовувалися для захоронення відходів.

4. 2020-ті роки: запуск сміттепереробного комплексу на території полігону став ключовим етапом його трансформації. Комплекс включає сортувальну лінію потужністю 80 тис. тонн відходів на рік і установку для генерації електроенергії з біогазу, зібраного з старих шарів сміття. Також реалізуються проекти з перетворення частини полігону на зелену зону, включно з висадкою дерев та створенням рекреаційних об'єктів [52].

Історія Дергачівського полігону ілюструє типовий шлях розвитку звалищ в Україні: від неконтрольованого захоронення до впровадження сучасних технологій переробки та екологічної безпеки. Модернізація полігону та запуск сміттепереробного комплексу стали важливими кроками до зниження екологічного навантаження та адаптації до вимог сучасної екологічної політики. Подальші заходи, такі як рекультивація та впровадження фіторе mediaції, дозволять зменшити вплив полігону на довкілля та підвищити його екологічну безпеку [29].

Потенційні екологічні ризики полігону ТПВ м. Дергачі, Харківська область. Полігон твердих побутових відходів (ТПВ) у м. Дергачі є об'єктом підвищеного екологічного ризику через низку факторів, пов'язаних із характером захоронення відходів, географічними умовами та експлуатаційними процесами. Основними потенційними ризиками є [15, 52, 58]:

– полігон є джерелом надходження небезпечних хімічних сполук у ґрунт. Основні загрози включають: токсичні метали; органічні сполуки.

– полігон у Дергачах має ризик витоку фільтратів у ґрунтові води через можливу недостатню герметичність основи. Фільтрати містять: органічні забруднювачі, іони важких металів, синтетичні хімічні сполуки, які погіршують якість питної води у прилеглих районах [27, 70].

– полігон генерує шкідливі гази, серед яких: метан, сірководень та аміак, діоксини.

– пожежі – неправильне зберігання відходів або природний самозаймання можуть спричиняти пожежі, які супроводжуються викидами токсичних газів і золи, що забруднюють повітря і ґрунт.

– зона полігону є джерелом екологічного стресу для місцевих екосистем. Потенційні ризики включають: знищення природних середовищ існування через зміни рельєфу та деградацію ґрунту; зменшення популяцій тварин і рослин унаслідок забруднення.

– полігон ТПВ може негативно впливати на якість життя населення, що проживає поблизу: погіршення здоров'я населення через забруднення повітря, води та ґрунтів, зниження вартості земельних ділянок та нерухомості поблизу полігону.

Полігон ТПВ у м. Дергачі є джерелом значних екологічних ризиків, які потребують постійного моніторингу та впровадження заходів для їх мінімізації. Застосування сучасних технологій, таких як ефективна система збору фільтратів, моніторинг якості води, ґрунтів і повітря, а також перероблення біогазу, може значно знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище [17, 35].

2.2 Екологічний стан території полігону ТПВ м. Дергачі, Харківська область

Дергачівський полігон ТПВ є одним із найбільших та найстаріших у Харківській області, що впливає на екологічний стан прилеглих територій. За десятиліття експлуатації він став джерелом низки екологічних проблем, які включають забруднення ґрунтів, підземних вод, повітряного середовища та зміни в екосистемах [26].

1. Забруднення ґрунтів. Основною проблемою є накопичення токсичних речовин у верхніх шарах ґрунту через фільтрат, що утворюється в результаті розкладання органічних відходів. Дослідження показують, що фільтрат містить високі концентрації аміаку, важких металів (кадмію,

свинцю, ртуті) та органічних забруднювачів, які з часом можуть проникати у глибші шари ґрунту. Відсутність належної ізоляції старих шарів полігону сприяє дифузії цих речовин у прилеглі території. Полігон ТПВ м. Дергачі є джерелом інтенсивного забруднення ґрунтів через неконтрольоване виділення токсичних речовин у процесі розкладання відходів [10, 20].

– *Хімічне забруднення.* Фільтрат, що утворюється в результаті інфільтрації дощових та талих вод через шари сміття, містить важкі метали (свинець, кадмій, мідь, ртуть), феноли, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) і аміак. Висока концентрація цих елементів у ґрунтах поблизу полігону часто перевищує ГДК, важкі метали можуть накопичуватися в ґрунтах, створюючи тривалий токсичний вплив на рослини та мікроорганізми (табл. 2.1) [95, 76].

Таблиця 2.1

**Концентрації основних забруднювачів у ґрунтах на території
полігону ТПВ (м. Дергачі, Харківська обл.)**

Параметр	Середнє значення, мг/кг	ГДК, мг/кг	Перевищення норм
Свинець (Pb)	120–150	32	3,7–4,7 рази
Кадмій (Cd)	2,1–2,8	0,5	4,2–5,6 рази
Ртуть (Hg)	0,9–1,2	0,2	4,5–6 разів
Мідь (Cu)	65–78	33	2–2,3 рази
Нітрати (NO ³⁻)	180–230	130	1,4–1,8 рази
Хлориди (Cl ⁻)	320–400	300	1,07–1,33 рази
Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ)	3,4–4,1	1	3,4–4,1 рази

Концентрації свинця (Pb), кадмію (Cd), цинку (Zn) та міді (Cu), перевищують допустимі норми для с/г ґрунтів. Це вказує на значне хімічне навантаження через накопичення фільтратів полігону, що містять токсичні речовини. Підвищені рівні вуглеводнів та пестицидів у ґрунті свідчать про захоронення змішаних відходів. Такі речовини мають токсичний вплив на мікроорганізми, що природно беруть участь у самоочищенні ґрунту. Присутність мікропластикових частинок свідчить про захоронення

пластикових відходів без їх попередньої переробки. Це новий тип забруднення, що має довгострокові екологічні наслідки. Хлориди та нітрати утворюються через розкладання органічних сполук і виділення промислових відходів. Їх концентрація впливає на ґрунтові мікробні співтовариства та знижує якість ґрунтів (табл. 2.1) [53, 56]. Найвищі концентрації забруднювачів спостерігаються поблизу активної зони захоронення відходів, з поступовим зниженням їхнього рівня із віддаленням від полігону. Це підтверджує локалізований характер впливу полігону на ґрунт [20, 48].

– *Фізичні зміни ґрунту*. Постійний вплив фільтрату змінює структуру ґрунту, знижує його аерацію та водопроникність. Це призводить до зниження родючості ґрунтів і зменшення їхньої здатності до самовідновлення. Зона впливу фільтрату, залежно від конфігурації полігону та гідрогеологічних умов, може охоплювати територію до кількох сотень метрів від місця скупчення відходів [48].

Оцінка фізичних змін показує, що через постійне накопичення відходів і фільтратів відбувається порушення структури ґрунту внаслідок змішування природних шарів із твердими відходами, а також ущільнення ґрунту через механічний вплив техніки, що використовується для утилізації сміття. Це ускладнює проникнення повітря та води, що може негативно впливати на процеси самоочищення та біологічної активності. Це створює ризики для рослин, знижує ефективність природного водообміну і може призвести до заболочування території [57].

Щільність ґрунту на території полігону перевищує допустимі значення для ґрунтів у природному стані (1,5–1,8 г/см³). Ущільнення є наслідком великого тиску на ґрунт з боку накопичених відходів. Ущільнення ґрунту призводить до зменшення пористості, що обмежує доступ повітря до коренів рослин і знижує біологічну активність у ґрунті. Забруднення та деградація рослинного покриву на полігоні призводять до зниження вмісту органічних сполук у ґрунті, що зменшує його родючість (табл. 2.2).

Фізичні зміни ґрунтів на території полігону ТПВ м. Дергачі

Фізичний параметр	Середнє значення	Нормативні значення (для родючих ґрунтів)	Оцінка змін
Водопроникність (см/год)	1,2–1,5	5–15	Зниження водопроникності через ущільнення ґрунту, що призводить до затримки води та її застою
Пористість (%)	25–28	35–40	Зменшення пористості ґрунту через ущільнення та накопичення відходів
Теплопровідність (Вт/м·°С)	0,45–0,55	0,7–1,0	Зниження теплопровідності, що впливає на температуру ґрунту і біологічну активність
Густина ґрунту (г/см ³)	1,42–1,56	1,3–1,5	Підвищення густини через ущільнення, що веде до зниження аерації
Вміст органічної речовини (%)	1,0–1,8	2,0–4,0	Зниження вмісту органічної речовини через деградацію рослинності
Кислотність ґрунту (рН)	6,2–6,8	5,5–7,0	Підвищення кислотності через накопичення кислих відходів та фільтрату

Зменшення водопроникності ґрунту через механічне ущільнення сприяє формуванню застійних вод, що підвищує ризик утворення фільтрату та його проникнення у підґрунтові води. Водопроникність ґрунтів у зоні полігону виявилася на 30–40% нижчою, ніж на сусідніх територіях (табл. 2.2) [34]

Підвищення кислотності ґрунту є наслідком накопичення органічних і неорганічних кислот у фільтраті. Це негативно впливає на мікробіологічну активність і здатність ґрунту підтримувати здорову флору. Підвищення температури ґрунту в зоні полігону зумовлене розкладанням органічних відходів і виділенням тепла, що впливає на активність ґрунтової біоти та прискорює вивільнення токсичних елементів із відходів. Відзначається потемніння ґрунтів унаслідок накопичення органічних залишків і домішок техногенного походження, таких як сажа та золи. Темніший колір може свідчити про деградацію верхнього шару [11, 48].

Фізичні зміни ґрунтів на території полігону ТПВ м. Дергачі свідчать про значний вплив антропогенних чинників, спричинених діяльністю

полігону. Порушення структури, ущільнення та зменшення водопроникності створюють передумови для деградації екосистеми, що потребує впровадження заходів з рекультивації та стабілізації ґрунтів. Підвищення густини, зниження водопроникності та пористості ґрунту створюють складнощі для природного відновлення екосистеми [71].

Для мінімізації впливу фізичних змін ґрунту на навколишнє середовище рекомендується: проведення аерації ущільнених ґрунтів; використання методів рекультивації для відновлення структури та водопроникності; контроль механічного впливу на поверхню полігону. Необхідно розробити комплексні заходи для рекультивації ґрунтів, включаючи використання фітореMediaції та покращення структури ґрунтів через технології аерації та органічні добавки [52].

– *Біологічне забруднення.* Біологічне забруднення ґрунтів на території полігону ТПВ є важливою екологічною проблемою, оскільки воно впливає на мікробіологічні процеси та здоров'я рослин і тварин. До основних факторів, що призводять до біологічного забруднення, відносяться накопичення патогенних мікроорганізмів, зміна складу ґрунтової мікрофлори та зниження біологічної різноманітності [12, 49, 129] (табл.. 2.3).

Таблиця 2.3

Біологічне забруднення ґрунтів на території полігону ТПВ м. Дергачі

Параметр	Середнє значення	ГДК	Перевищення норм
Аеробні мезофільні бактерії (КУО/г)	$8,1 \times 10^6$	1×10^5	81 разів
Фекальні коліформи (КУО/г)	$4,3 \times 10^6$	5×10^3	860 разів
Патогенні бактерії (<i>Salmonella spp.</i>)	15–20	відсутні	–
Гриби родини <i>Aspergillaceae</i>	6–8 видів на 1 г ґрунту	–	–
Нітратредуценти (рН у ґрунті)	$10–12 \times 10^6$	10×10^4	100 разів

На полігоні ТПВ м. Дергачі зафіксовано значне перевищення кількості бактерій у порівнянні з фоновими показниками (на 40–60 %). Це може бути

наслідком високої концентрації органічних відходів, що створюють сприятливе середовище для розвитку патогенів. Високі рівні аеробних мезофільних бактерій у ґрунтах на території полігону свідчать про інтенсивний розклад органічних речовин, що відбувається через переробку відходів. Перевищення норм вказує на забруднення, що може призвести до дисбалансу мікробіологічних процесів [47, 84].

Наявність фекальних коліформ на значно високих рівнях вказує на потрапляння патогенних мікроорганізмів у ґрунт, що є результатом забруднення фільтратами від органічних відходів. Це підвищує ризик поширення інфекцій, зокрема серед с/г культур і тварин. Це підтверджує вплив недосконалих технологій утилізації органічних відходів і недостатню ізоляцію полігону [1, 7].

Ідентифіковано грибки роду *Aspergillus* і *Penicillium*, які можуть впливати на токсикологічний стан ґрунтів, виділяючи мікотоксини, небезпечні для рослин, тварин і людей. Присутність таких грибів є типовим індикатором біологічного забруднення органічними відходами, оскільки ці гриби часто ростуть на розкладених органічних речовинах [41].

Рівень біологічної активності ґрунтів на полігоні є зниженим на 20–30% порівняно із зонами поза полігоном. Це може бути обумовлено високим вмістом токсичних речовин, які пригнічують життєдіяльність корисних мікроорганізмів (табл. 2.3).

Біологічне забруднення ґрунтів на полігоні ТПВ м. Дергачі є суттєвим екологічним ризиком, що впливає як на якість ґрунтів, так і на загальний екологічний стан прилеглих територій. Для покращення ситуації необхідно впроваджувати біологічні методи рекультивації, такі як застосування біопрепаратів і мікроорганізмів-деструкторів [72].

– *Вплив на прилеглі екосистеми.* Забруднення ґрунтів на території полігону ТПВ має значний вплив на прилеглі екосистеми, включаючи водні ресурси, рослинний і тваринний світи, а також здоров'я людей. Поширення забруднюючих речовин від полігону може мати широкий спектр наслідків

для довкілля, зокрема через фільтраційні процеси, які переносять забруднення в ґрунтові води, атмосферу та рослинність [3, 14] (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Вплив забруднення ґрунтів на прилеглу територію полігону ТПВ м. Дергачі

Екологічний параметр	Опис впливу	Інтенсивність впливу	Можливі наслідки
Забруднення водних ресурсів	Фільтрація токсичних відходів в ґрунтові води	Висока	Зниження якості води, забруднення підземних вод, ризик для водопостачання
Зниження біорізноманіття рослин	Негативний вплив на рослинність через накопичення токсичних речовин у ґрунті	Середня	Зниження кількості видів, деградація екосистеми
Забруднення атмосферного повітря	Виділення летючих органічних сполук і запахів	Середня	Погіршення якості повітря, неприємні запахи, ризик для здоров'я людей і тварин
Захворювання тварин	Вплив забруднених ґрунтів на місцеву фауну	Низька до середньої	Зменшення популяцій, хвороби, отруєння
Погіршення здоров'я людей	Контакт з забрудненим ґрунтом та водою	Середня	Збільшення випадків інфекційних захворювань, інтоксикація, алергії

Аналіз впливу забруднення ґрунтів полігону ТПВ м. Дергачі на прилеглі території показав значні негативні наслідки, що проявляються у фізико-хімічному та біологічному стані ґрунтів, водоносного шару та рослинного покриву. Забруднення ґрунтів на території полігону ТПВ призводить до фільтрації небезпечних речовин, таких як важкі метали, органічні сполуки та патогенні мікроорганізми, у ґрунтові води. Прилеглі території показують наявність підвищених концентрацій важких металів, таких як свинець, кадмій і цинк, що зростають у зоні до 500 метрів від полігону. Це підтверджує можливість міграції токсичних речовин із забруднених ґрунтів полігону. Це може серйозно погіршити якість води, що використовується для пиття та зрошення [42, 83].

У прилеглих зонах спостерігається зменшення видового різноманіття рослин. Особливо чутливі до забруднення багаторічні трав'янисті види, які є основою природних екосистем у регіоні. Це в свою чергу впливає на стабільність екосистеми [90]. На полігоні ТПВ можуть виділятися летючі органічні сполуки, що забруднюють повітря і створюють неприємні запахи, які знижують якість життя в прилеглих районах. Цей вплив є значним для здоров'я людей, оскільки тривалий контакт з токсичними газами може призводити до респіраторних захворювань [54, 74].

Виявлено підвищений рівень органічних сполук, зокрема залишків вуглеводнів, які потрапляють у ґрунти внаслідок фільтрації відходів і потрапляння неізолюваних рідких відходів. Це ускладнює використання земель для сільськогосподарських цілей. Забруднюючі речовини впливають на прилеглі водоносні горизонти. Наявність хлоридів і сульфатів підтверджує міграцію токсичних компонентів через дренажні системи ґрунту [20, 53].

Результати підкреслюють необхідність рекультиваційних робіт, таких як використання фітореMediaції для поглинання токсичних речовин, та покращення системи збору й утилізації відходів на полігоні. Важливо здійснювати регулярний моніторинг стану навколишнього середовища на території полігону та в його околицях для своєчасного виявлення та ліквідації джерел забруднення [48].

2. *Забруднення підземних вод.* Полігони ТПВ є одними з основних джерел забруднення підземних вод внаслідок фільтрації токсичних речовин, що містяться в відходах. Забруднення підземних вод на території полігону є важливою екологічною проблемою, оскільки підземні води використовуються для питного водопостачання та водопостачання сільського господарства, що підвищує ризик негативного впливу на здоров'я людей та екосистеми [36].

Джерела забруднення підземних вод:

1. *Фільтрати полігону.* Полігони ТПВ виділяють фільтрати – рідину, що утворюється в результаті просочування дощових вод через відходи.

Фільтрати містять високі концентрації органічних забруднювачів, важких металів, токсичних хімічних сполук і патогенних мікроорганізмів [2, 77].

Таблиця 2.5

Хімічний склад фільтратів полігону ТПВ м. Дергачі

Параметр	Одиниці вимірювання	Нормативне значення	Концентрація в фільтраті (приклад)
pH	–	6-9	5,8-7,2
БСК5	мг O ² /л	≤15	30-150
ХСК	мг O ² /л	≤50	80-200
Загальна к-ть органічних сполук	мг/л	≤20	150-200
Нітрати	мг/л	≤50	50-100
Нітрити	мг/л	≤3	2,5-5
Амонійний азот	мг/л	≤5	10-20
Кадмій	мг/л	≤0,003	0,01-0,05
Свинець	мг/л	≤0,05	0,2-0,5
Мідь	мг/л	≤1	2-5
Хлориди	мг/л	≤250	300-400

Результати аналізу фільтратів полігону ТПВ м. Дергачі свідчать про їх високий ступінь забруднення, що є типовим для подібних об'єктів. Дані таблиці демонструють перевищення нормативних показників за рядом ключових забруднювачів, що зумовлено накопиченням органічних і неорганічних речовин у відходах (табл. 2.5) [60]. Концентрація хімічного споживання кисню (ХСК) у фільтратах значно перевищує нормативи, що свідчить про наявність великої кількості органічних сполук, у тому числі поліциклічних вуглеводнів та фенолів. Це вказує на активний анаеробний розклад органіки [43].

Фільтрати містять високі концентрації важких металів це пов'язано з розкладанням батарей, електронних компонентів та інших металовмісних матеріалів у відходах [18, 92]. Високі рівні нітратів, амонійного азоту та хлоридів в фільтраті негативно впливають на водні та ґрунтові екосистеми, сприяючи їх деградації та погіршенню якості водних ресурсів. Виявлено значний вміст амонійного азоту (NH₄⁺), що перевищує допустимі значення. Це є наслідком розкладання органічних матеріалів і відсутності належної

системи очищення фільтрату. Концентрації Cl^- і SO_4^{2-} у фільтратах значно перевищують ГДК, що становить небезпеку для підземних вод та прилеглих екосистем. Значення рН свідчать про кислотний характер середовища ($\text{pH} < 6$), що пов'язано з розкладанням органічних відходів і утворенням органічних кислот (табл. 2.5).

Дослідження хімічного складу фільтратів полігону ТПВ м. Дергачі демонструє високий ступінь їх токсичності. Основними загрозами є важкі метали, азотовмісні сполуки, органічні забруднювачі, а також солі хлоридів і сульфатів. Ці забруднюючі речовини створюють серйозний ризик для підземних вод та прилеглих ґрунтів [87].

2. *Неправильне зберігання та утилізація відходів.* Неправильне зберігання та утилізація відходів на полігонах ТПВ є однією з основних причин забруднення навколишнього середовища, включаючи ґрунти, повітря та водні ресурси. Полігон ТПВ м. Дергачі не є виключенням, і питання утилізації відходів та їх правильного зберігання потребує особливої уваги для зниження екологічних ризиків [4, 44]:

– неправильне зберігання та утилізація відходів на полігоні ТПВ м. Дергачі веде до забруднення ґрунтів, підземних вод і атмосфери. Відсутність чіткого розподілу відходів за категоріями призводить до формування змішаних мас, що значно ускладнює подальшу утилізацію та переробку. Наприклад, змішування органічних і небезпечних відходів посилює процес утворення токсичних фільтратів та біогазу (табл. 2.6);

– на полігоні не забезпечено достатньої ізоляції шарів відходів, що сприяє неконтрольованому виділенню забруднюючих речовин у довкілля. Це посилює ризик інфільтрації токсичних компонентів у ґрунті та підземні води;

– відсутність ефективної системи сортування призводить до накопичення небезпечних матеріалів, таких як батарейки, електроніка, пестициди, що є джерелом важких металів і токсичних сполук. Впровадження сучасних технологій управління відходами та їх ефективне

сортування допоможе зменшити екологічний вплив полігону та покращити стан навколишнього середовища;

– утворення метану (CH₄) і діоксиду вуглецю (CO₂) без належного збору та переробки створює значний ризик займання та підвищує викиди парникових газів;

– частина території полігону використовується без належного обладнання ізоляційними матеріалами, що сприяє забрудненню атмосферного повітря, ґрунтів та вод [59].

Таблиця 2.6

Основні проблеми неправильного зберігання та утилізації відходів на полігоні ТПВ м. Дергачі

Проблема	Опис	Наслідки	Пропоновані заходи для покращення
Відсутність герметизації відходів	На полігоні не забезпечено достатній захист від проникнення вологи та повітря до відходів	Проникнення токсичних речовин у ґрунти та підземні води	Встановлення ізоляційного покриття, покращення структури полігону
Невірне сортування відходів	Відсутність або неефективне сортування відходів (пластик, метал, органіка)	Збільшення обсягу фільтратів, забруднення довкілля важкими металами	Впровадження системи сортування, окремий збір та утилізація відходів
Збір та зберігання небезпечних відходів	Небезпечні відходи (акумулятори, батарейки, фарби, хімікати) зберігаються без належних умов	Потрапляння токсичних речовин у навколишнє середовище, забруднення водних ресурсів	Спеціалізоване зберігання небезпечних відходів, створення пунктів збору
Недостатній контроль за утилізацією відходів	Відсутність ефективного моніторингу за процесом утилізації відходів на полігоні	Невиконання норм з охорони НС, забруднення води та ґрунтів	Посилення контролю за діяльністю полігону, регулярні перевірки
Використання застарілих методів утилізації	Використання застарілих технологій для переробки та утилізації відходів	Низька ефективність утилізації, високий рівень забруднення	Впровадження сучасних технологій для переробки відходів
Низький рівень обробки біоорганічних відходів	Багато органічних відходів не піддаються належному компостуванню або переробці	Високий рівень метану, забруднення повітря та ґрунтів	Створення системи для компостування органічних відходів, використання біотехнологій

Дані таблиці свідчать про те, що неправильне управління відходами на полігоні ТПВ м. Дергачі посилює антропогенний вплив на екосистему регіону. Основними загрозами є неконтрольоване виділення токсичних речовин у довкілля, підвищений ризик пожеж, та утворення шкідливих газів [75].

3. *Викиди важких металів.* Пластикові матеріали, батареї, електронне обладнання та інші відходи на полігонах можуть містити важкі метали, такі як свинець, ртуть і кадмій, які є небезпечними для водних екосистем і можуть викликати серйозне забруднення підземних вод. Полігони ТПВ є значними джерелами забруднення важкими металами, які можуть потрапляти у підземні води через фільтрати. Викиди важких металів є серйозною екологічною проблемою, оскільки вони можуть мати токсичний вплив на водні ресурси, ґрунти та здоров'я людей [5].

Таблиця 2.7

Викиди важких металів та їх вплив на забруднення підземних вод

Важкий метал	Джерело забруднення	Нормативні значення (мг/л)	Концентрація в фільтраті	Вплив на підземні води та навколишнє середовище
Кадмій (Cd)	Залишки батарейок, фарб, хімікатів	$\leq 0,003$	0,01-0,05	Забруднює води важкими металами, токсичний для організмів
Свинець (Pb)	Побутові відходи, акумулятори, старі труби	$\leq 0,05$	0,1-0,3	Потрапляє у воду негативно впливає на нервову систему
Мідь (Cu)	Металеві відходи, електроніка	≤ 1	0,5-1	Високі концентрації можуть бути токсичними для водних організмів
Цинк (Zn)	Побутові відходи, фарби, гумові вироби	≤ 5	1-5	Висока концентрація може спричинити зміни в хімічному складі води
Хром (Cr)	Промислові відходи, фарбування	$\leq 0,1$	0,05-0,2	Токсичний для риб, може викликати зміни в складі підземних вод
Нікель (Ni)	Технічні відходи, сплави	$\leq 0,2$	0,05-0,1	Високі концентрації можуть погіршувати якість води, токсичні для водних екосистем
Арсен (As)	Побутові та промислові відходи	$\leq 0,01$	0,02-0,05	Може викликати отруєння, наявність в воді пов'язана з канцерогенними властивостями

Результати, представлені в таблиці 2.7 демонструють значні екологічні загрози, пов'язані з діяльністю полігону ТПВ м. Дергачі. Аналіз концентрацій важких металів у фільтраті та підземних водах вказує на те, що ці забруднювачі мають потенційно небезпечний вплив на якість водних ресурсів, які є критичними для навколишнього середовища та здоров'я населення [88, 91]. Забруднення підземних вод може призвести до екологічного дисбалансу, що впливає на всю екосистему в регіоні, порушити природні процеси фільтрації води, оскільки ці метали знижують ефективність біологічних та фізико-хімічних процесів очищення води, що протікають через ґрунти [37, 62].

Викиди ВМ з полігону ТПВ м. Дергачі є серйозною екологічною загрозою для якості підземних вод. Токсичні елементи, що потрапляють у водоносні горизонти, мають здатність накопичуватися в біосфері, викликаючи порушення екосистем і небезпеку для здоров'я людини [18].

Регулярний моніторинг якості підземних вод є важливим заходом для виявлення та своєчасного усунення забруднень. Це дозволяє своєчасно реагувати на екологічні загрози та вжити необхідних заходів для запобігання подальшому забрудненню. Одним із ефективних методів зменшення впливу забруднення є рекультивация території полігону. Це включає установлення герметичних покриттів, організацію ефективної системи збору фільтратів і запобігання потраплянню токсичних речовин у ґрунт і воду. Для очищення ґрунтів і вод від токсичних речовин можна використовувати фітореMediaцію – метод очищення за допомогою рослин. Цей метод є екологічно чистим і може бути ефективним для зменшення забруднення підземних вод [81].

3. Забруднення повітря. Полігон є джерелом емісії парникових газів, таких як метан і вуглекислий газ, що утворюються при анаеробному розкладанні органічних відходів. Відсутність або недостатня ефективність систем збору біогазу призводять до його витоку в атмосферу. Метан, окрім парникового ефекту, створює ризик займання та вибухів, якщо його накопичення не контролюється належним чином [13].

Джерела забруднення повітря на полігоні ТПВ м. Дергачі [68]:

– Метан (CH_4) – виділяється на полігонах ТПВ внаслідок анаеробного розкладу органічних відходів, є потужним парниковим газом, що сприяє зміни клімату. На полігоні ТПВ м. Дергачі значні обсяги метану виділяються через порушення герметичності ізоляційних шарів та недостатній контроль за вентиляцією [64].

– Діоксиди сірки (SO_2) та оксиди азоту (NO_x) – викиди є результатом спалювання відходів, а також роботи транспортних засобів, що перевозять сміття до полігону. Сірка та азот можуть утворювати кислотні дощі, які забруднюють навколишні екосистеми та водні ресурси.

– Летючі органічні сполуки (ЛОС) – такі як бензоли, толуоли, ксилоли, виникають при розкладі органічних відходів і відзначаються високою летючістю. Летючі органічні сполуки можуть бути канцерогенними, а також мати токсичний ефект на дихальні шляхи людей, що проживають поблизу полігону.

– Пилові частки утворюються під час транспортування відходів, їхнього оброблення та складування. Пилові частки, зокрема PM_{10} та $\text{PM}_{2.5}$, можуть проникати в легені, спричиняючи астму, бронхіт, а також впливати на серцево-судинну систему.

– Аміак (NH_3) – є результатом розкладу органічних відходів, зокрема при наявності великої кількості органічного азоту. Високі концентрації аміаку можуть викликати подразнення дихальних шляхів та шкіри, а також погіршувати якість повітря в навколишніх населених пунктах.

Забруднення повітря на території полігону ТПВ м. Дергачі має значний вплив на екосистему та здоров'я населення. Довготривале перебування в умовах забрудненого повітря може призвести до хронічних захворювань дихальної та серцево-судинної системи, а також до значного зниження якості життя місцевих мешканців. Викиди парникових газів, зокрема метану, мають глобальні наслідки у вигляді зміни клімату (табл. 2.8) [85].

Викиди забруднювальних речовин на полігоні ТПВ м. Дергачі

Забруднююча речовина	Джерело	Вплив на повітря	Наслідки для здоров'я та навколишнього середовища
Метан (CH ₄)	Анаеробний розклад органічних відходів	Погіршення якості повітря, парниковий ефект	Загроза вибухів, зміна клімату
Діоксиди сірки (SO ₂)	Спалювання відходів	Кислотні дощі, забруднення повітря	Респіраторні захворювання, кислотні дощі
Оксиди азоту (NO _x)	Спалювання відходів, транспорт	Погіршення якості повітря, кислотні дощі	Астма, бронхіт, забруднення води та ґрунтів
Летючі органічні сполуки (ЛОС)	Розклад органічних відходів	Токсичне забруднення повітря	Канцерогенні та токсичні ефекти, проблеми з диханням
Пилкові частки (PM ₁₀ , PM _{2.5})	Транспортування, складування відходів	Погіршення якості повітря	Хвороби дихальних шляхів, астма, бронхіт
Аміак (NH ₃)	Розклад органічних відходів	Погіршення якості повітря	Подразнення дихальних шляхів, очей, шкіри

Для зменшення забруднення повітря на полігоні ТПВ м. Дергачі необхідно впроваджувати ефективні системи вентиляції та збору метану, а також зменшувати кількість спалювання відходів, застосовуючи сучасні методи утилізації. Важливо посилити контроль за викидами ЛОС та пилових часток на полігоні ТПВ для зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей [94].

4. *Екологічні заходи.* Полігони ТПВ є важливими складовими сучасної системи управління відходами, однак їх діяльність може призводити до серйозних екологічних проблем. У випадку полігону ТПВ в м. Дергачі, Харківська область, було вжито низку екологічних заходів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище [16].

Один із основних екологічних заходів на полігоні ТПВ полягає в контролі за викидами метану (CH₄). Для зменшення викидів проводяться регулярні заміри концентрацій в повітрі та використовується система збору та спалювання газу, що виділяється з відходів під час анаеробного розкладу

органічних матеріалів. Такі заходи дозволяють значно зменшити негативний вплив на атмосферу і зменшити ризики вибуху метану в межах полігону [86].

Моніторинг та утилізація фільтратів – для запобігання їх проникненню в навколишнє середовище на полігоні ТПВ встановлено систему збору та очищення фільтратів, що дозволяють утримувати шкідливі речовини в межах полігону та запобігати їх потраплянню у навколишні водні ресурси.

Для зменшення обсягу відходів та покращення якості ґрунтів на полігоні проводяться заходи з переробки органічних відходів. Органічні відходи, такі як харчові відходи та рослинні матеріали, піддаються процесу компостування, що дозволяє отримати біоорганічне добриво. Це допомагає зменшити загальну кількість відходів, які потребують захоронення, а також сприяє збагаченню ґрунтів корисними органічними речовинами, знижуючи їх токсичність [17, 69].

Екологічні заходи, що проводяться на полігоні ТПВ, мають на меті зменшити шкідливий вплив на довкілля та здоров'я населення. Основні напрямки включають зменшення викидів парникових газів, управління фільтратами, переробку органічних відходів, екологічний моніторинг та рекультивацію земель. Успішна реалізація цих заходів є важливим кроком до сталого розвитку та екологічної безпеки для регіону [28, 51].

Одним із заходів, спрямованих на відновлення екологічної рівноваги на території полігону після завершення експлуатації, є рекультивація земель. Це включає в себе закриття полігону, покриття відходів ізоляційними шарами, засаджування території рослинністю, що допомагає відновити природний ландшафт і мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Отже, Дергачівський полігон є джерелом значного антропогенного впливу на довкілля через забруднення ґрунтів, вод та атмосфери. Реалізація сучасних технологій переробки відходів і рекультивація старих ділянок здатні знизити екологічне навантаження. Потрібні подальші дослідження для вдосконалення систем ізоляції та переробки, а також для відновлення деградованих екосистем.

2.3 Методи дослідження ефективності фітореMediaції ґрунтів на полігонах ТПВ

Оцінка ефективності фітореMediaції ґрунтів передбачає використання комплексу методів, які охоплюють хімічний, фізичний, біологічний аналізи. Дослідження на території полігону ТПВ м. Дергачі реалізуються відповідно до міжнародних стандартів у галузі охорони довкілля та методик, адаптованих до локальних умов.

Відбір ґрунтових проб є важливим етапом досліджень у рамках фітореMediaції. Він дозволяє отримати репрезентативну інформацію про стан забруднених територій, оцінити рівень впливу техногенних факторів та визначити ефективність використання рослин для очищення ґрунтів.

Методологія відбору проб ґрунту. Зони для відбору проб визначаються на основі попереднього картографування полігону, включаючи активну зону захоронення відходів, периферійні ділянки та контрольні території (поза межами впливу полігону). Враховується рельєф, тип рослинності, напрямок підземного і поверхневого стоку. Відбір проб здійснюється буровими пристроями, які забезпечують отримання ґрунту з різних горизонтів (0–30 см, 30–60 см, 60–100 см) і на контрольних ділянках поза впливом полігону. Проби ґрунту відбираються за допомогою стандартних методів, регламентованих ДСТУ ISO 10381-1:2004 [112]. Використовується сітковий метод для відбору: зразки беруться з однакових відстаней у заданій сітці. Відібраний матеріал очищують від сторонніх домішок (камені, рослинні залишки), висушують на повітрі та просіюють через сито з діаметром отворів 2 мм. Проби маркуються та упаковуються у герметичні контейнери для транспортування до лабораторії. Проби аналізуються на вміст важких металів (Pb, Cd, Zn, Hg) [98], органічних забруднювачів (нафтопродуктів, пестицидів), а також основних фізико-хімічних показників (рН, вміст органічної речовини). Застосовуються методи атомно-абсорбційної спектроскопії [6, 8, 45].

Особливості відбору проб на полігоні ТПВ м. Дергачі. Полігон ТПВ м. Дергачі має різномірний рельєф і неоднорідний розподіл забруднень. Зони відбору проб включають: активні ділянки захоронення відходів, де очікується висока концентрація важких металів і органічних сполук; рекультивовані зони, де оцінюється рівень відновлення ґрунтів; периферійні зони, що служать для виявлення вторинного забруднення [40]. Для визначення впливу фіторемедіації на стан ґрунтів полігону, проби відбираються за встановленою схемою, яка враховує особливості забруднення та просторову неоднорідність території. В таблиці 2.9 представлено ключові аспекти організації пробо відбору [82, 99].

Таблиця 2.9

**Організація пробовідбору на території полігону ТПВ м. Дергачі
Харківського району**

Параметр	Опис
Кількість проб	10–15 проб на гектар, залежно від інтенсивності забруднення та структурних характеристик полігону.
Розподіл точок пробовідбору	Систематична сітка з інтервалом між точками 10–20 м, з урахуванням специфіки рельєфу та джерел забруднення.
Глибина відбору проб	0–30 см (верхній шар ґрунту) та 30–60 см (підповерхневий шар).
Інструменти для відбору	Ґрунтові бури, пробовідбірники циліндричної форми, стерильні контейнери для зразків.
Типи проб	– Місцеві (точкові) проби. – Об'єднані (змішані) проби для визначення середніх показників.
Періодичність відбору проб	Щоквартально протягом року, із врахуванням сезонних змін.
Додаткові параметри пробовідбору	Проби беруться до початку фіторемедіації та на кожному етапі її проведення (через 6, 12, 18 місяців).
Обробка проб	Проби маркуються, транспортуються у стерильних контейнерах до лабораторії для аналізу.

Система пробовідбору забезпечує високу точність оцінки як вихідного стану ґрунтів, так і змін, що виникають під впливом фіторемедіації. Вибір систематичної сітки дозволяє ефективно оцінити просторову неоднорідність забруднення, а відбір з різних глибин дає змогу аналізувати переміщення забруднювальних речовин у ґрунтовому профілі. Періодичність відбору

враховує сезонні та довготривалі зміни, пов'язані з ростом рослин та розкладанням органічних речовин [78].

Таблиця 2.10

Схема відбору проб ґрунту на полігоні ТПВ м. Дергачі

№ проби	Розташування точки відбору	Глибина відбору, см	Ціль дослідження	Координати (широта, довгота)
1	Активна зона захоронення	0–20	Визначення рівня хімічного забруднення	49.9945° N, 36.2934° E
2	Активна зона захоронення	20–40	Вивчення вертикального профілю забруднення	49.9945° N, 36.2934° E
3	Зона рекультивації	0–20	Аналіз ефективності висаджених рослин	49.9952° N, 36.2920° E
4	Зона рекультивації	20–40	Визначення накопичення важких металів	49.9952° N, 36.2920° E
5	Периферійна зона	0–20	Оцінка впливу полігону на прилеглі території	49.9960° N, 36.2905° E
6	Контрольна зона (фонова точка)	0–20	Порівняльний аналіз з незабрудненими ґрунтами	49.9975° N, 36.2889° E

Проведення хімічного аналізу відібраних проб ґрунту на полігоні ТПВ м. Дергачі, Харківського району. Хімічний аналіз відібраних проб ґрунту є ключовим етапом у дослідженні екологічного стану полігону ТПВ. Ця процедура дозволяє встановити концентрації важких металів, органічних забруднювачів, мінеральних сполук і оцінити загальну хімічну характеристику ґрунту [30].

Після відбору проб на визначених точках території полігону вони висушуються у лабораторних умовах до постійної ваги при температурі 30–40°C. Далі проби просіюються через сито з розміром отворів 2 мм для видалення великих часток та органічних залишків. Проводять визначення фізико-хімічних параметрів ґрунту: рН ґрунту (проводиться потенціометричним методом у водній суспензії (співвідношення ґрунт:вода = 1:2.5); електропровідність – визначається за допомогою кондуктометричного методу для оцінки рівня розчинних солей; дослідження вмісту важких металів (аналіз концентрацій Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr здійснюється методом атомно-абсорбційної спектроскопії (ААС); визначення органічних

забруднювачів. Аналіз вмісту азоту, фосфору та калію (азот – методом К'ельдаля, фосфор та калій – колориметричним та спектрометричним методами) [25, 98, 99]. Визначення гумусу здійснюється методом Тюріна, який дозволяє оцінити рівень органічного відновлення ґрунту. Показники рН та вміст органічної речовини оцінюються для розуміння рівня кислотності ґрунту та потенційного впливу рослинних покривів на процеси ремедіації.

Проведення аналізу фізичних властивостей ґрунту відібраних проб на полігоні ТПВ м. Дергачі, Харківського району. Фізичні властивості ґрунту є важливим індикатором його стану та здатності підтримувати здорову екосистему, зокрема для фіторемердіації на територіях забруднених твердими побутовими відходами (ТПВ). Вивчення цих властивостей дозволяє оцінити вплив забруднення на ґрунтові ресурси та визначити ефективність заходів з очищення.

Механічний склад ґрунту визначається за допомогою методу механічного аналізу, зокрема методом осадження в водному розчині. Це дозволяє класифікувати ґрунт за вмістом піщаних, пилуватих та глинистих часток. Результати такого аналізу показують співвідношення між різними фракціями ґрунту, що дає уявлення про його водопроникність, а також здатність утримувати вологу та поживні речовини [125].

Вологість ґрунту вимірюється шляхом зважування проб до і після висушування до постійної маси. Визначення вологого вмісту ґрунту є важливим для оцінки його здатності до утримання вологи, що є критичним для підтримки рослинного покриву. Для зон активного захоронення ТПВ цей показник може варіюватися залежно від часу року і конкретних погодних умов [117].

Пористість ґрунту визначається як відношення об'єму пор до загального об'єму ґрунту. Це важливий параметр, що характеризує здатність ґрунту до аерації та водоутримання. Метод визначення пористості ґрунту включає вимірювання об'єму ґрунтової проби до та після висушування.

Щільність ґрунту вимірюється за допомогою методу визначення маси ґрунту в одиничному об'ємі. Важливим є встановлення значення щільності, оскільки високий рівень щільності ґрунту може обмежувати кореневу активність рослин та проникнення води, що суттєво ускладнює фітореMediaцію.

Температура ґрунту є важливим чинником для оцінки активності мікроорганізмів та кореневої системи рослин. Температура ґрунту вимірюється за допомогою спеціальних термометрів.

Проведення фітотоксикологічного аналізу на полігоні ТПВ м. Дергачі, Харківського району. Фітотоксикологічний аналіз є важливою складовою досліджень, спрямованих на оцінку впливу забруднюючих речовин на рослинний покрив, особливо в умовах потенційно забруднених територій, таких як полігони твердих побутових відходів (ТПВ). Це дослідження дозволяє визначити, які речовини в ґрунті чи фільтратах можуть негативно впливати на рослинність, що є основою для процесів фітореMediaції. Фітотоксикологічні дослідження включають оцінку ефектів на рослини за допомогою таких показників, як схожість насіння, ріст кореневої системи, біомаса, а також зовнішній вигляд рослин на різних етапах їх розвитку. Цей аналіз дозволяє оцінити рівень забруднення та його потенційний вплив на екологічну ситуацію на території полігону ТПВ [100, 119].

Вибір рослин для фітотоксикологічних тестів має велике значення, оскільки різні види можуть по-різному реагувати на ті чи інші забруднювачі. На полігоні ТПВ м. Дергачі використовуються як індикаторні види, так і спеціально відібрані рослини для фітореMediaції. Зазвичай для таких досліджень застосовують такі рослини, як ріпак (*Brassica napus*), соняшник (*Helianthus annuus*), люцерна (*Medicago sativa*), а також інші види, що мають стійкість до умов забруднення та потенціалу для фітореMediaції.

Відбір проб ґрунту для фітотоксикологічних тестів проводиться на різних глибинах та ділянках активної і рекультивованої зон полігону ТПВ. Це дозволяє отримати достовірну інформацію про вплив забруднюючих

речовин, як на поверхневий шар ґрунту, так і на більш глибокі горизонти, що зазвичай мають різні рівні забруднення.

Проби ґрунту для фітотоксикологічних досліджень відбираються відповідно до встановлених стандартів. Для аналізу використовуються проби ґрунту, зібрані з різних глибин (0-10 см, 10-20 см, 20-30 см) на кожному з тестових ділянок. Проби мають бути репрезентативними і відбираються випадковим методом на території полігону, що дозволяє виявити локальні зміни або ділянки з особливо високим рівнем забруднення. Після відбору проб ґрунту, підготовлених для аналізу, їх використовують для вирощування рослин в умовах лабораторії або на полігоні в умовах природного середовища. Тестування проводиться в кількох етапах: схожість насіння (вивчається кількість пророслих насінин на ґрунтах, що містять забруднювачі); ріст кореневої системи та стебел (оцінюється довжина кореневої системи та висота рослин. Зниження цих показників може бути ознакою токсичного впливу на розвиток рослин); біомаса (визначення маси рослин після вирощування дозволяє оцінити, чи була знижена продуктивність рослин на забруднених ділянках).

Крім ґрунту, важливим аспектом є дослідження фільтратів з полігону ТПВ, що потрапляють у ґрунт і можуть мати токсичний вплив на рослини. Вивчаються хімічний склад фільтратів, їх токсичність для рослин, а також здатність до накопичення забруднювачів у тканинах рослин.

Методика проведення біологічних методів дослідження ґрунту на полігоні ТПВ м. Дергачі, Харківського району. Біологічні методи дослідження ґрунтів на полігоні твердих побутових відходів (ТПВ) використовуються для оцінки впливу забруднення на мікробіологічні процеси в ґрунті. Вивчення активності ґрунтових мікроорганізмів, зокрема чисельності азотофіксуючих бактерій, мікоризних грибів та інших біологічних індикаторів, є важливим етапом в оцінці екологічного стану ґрунтів та ефективності проведених фіторе mediaційних заходів [108, 114].

Характеристика біологічних методів вивчення активності ґрунтових мікроорганізмів

Метод	Мета дослідження	Матеріали та інструменти	Техніка проведення	Інтерпретація результатів
Аналіз чисельності азотофіксуючих бактерій	Оцінка потенціалу азотфіксації в ґрунті та його здатності до природного відновлення	ґрунт, агаризовані середовища для азотофіксуючих бактерій, культуральні чашки	Відбір ґрунтових проб на різних глибинах (0-20 см, 20-40 см, 40-60 см). Прогрівання проб у агарі для фіксації азоту, інкубація при 28°C, підрахунок колоній.	Висока чисельність азотофіксуючих бактерій свідчить про позитивний вплив фіторе mediaційних заходів, низька кількість – про негативний вплив забруднення.
Вивчення чисельності мікоризних грибів	Оцінка біорізноманіття ґрунту та його здатності підтримувати кореневі системи рослин	ґрунт, мікроскоп, петри, культуральне середовище	Виділення корневих гілочок з ґрунту, обробка їх під мікроскопом, підрахунок мікоризних структур. Додатково застосовуються молекулярні методи (ПЛР) для визначення видів.	Підвищена кількість мікоризних грибів вказує на високу біологічну активність ґрунту, а зниження – на порушення екологічної рівноваги внаслідок забруднення.
Оцінка чисельності загальних ґрунтових мікроорганізмів	Визначення рівня мікробіологічної активності ґрунту в контексті його здатності до самовідновлення	ґрунт, агаризовані середовища для загальних мікроорганізмів, культуральні чашки	Проведення серії розведень ґрунтових проб на агаризованих середовищах для визначення чисельності загальних мікроорганізмів, інкубація при 28°C, підрахунок колоній.	Зниження чисельності загальних мікроорганізмів може свідчити про порушення екосистеми ґрунту внаслідок забруднення важкими металами або іншими токсичними речовинами.
Вивчення активності азот- та сіркоокислювальних процесів	Визначення функціонування азотного і сіркового циклів в ґрунті під впливом забруднення	ґрунт, кольориметричні реактиви, лабораторне обладнання	Визначення концентрацій амоніаку, нітратів і сірки в ґрунті через кольориметричні методи, вимірювання активності нітрифікації та амоніфікації.	Зниження активності азотфіксації та нітрифікації в забруднених зонах ґрунту може вказувати на порушення екологічних процесів.

Перед проведенням аналізу важливо здійснити правильний відбір проб ґрунту. Для цього проби мають бути відібрані з різних зон полігону ТПВ (активна зона, рекультивована зона) на різних глибинах. Зазвичай проби відбираються з глибини 0-20 см, 20-40 см та 40-60 см, щоб врахувати можливі зміни у мікробіологічному складі ґрунту на різних рівнях. Відбір проб здійснюється за допомогою спеціальних ґрунтових шурфів або бурів.

Для визначення чисельності азотофіксуючих бактерій використовують метод розведень на агаризованих середовищах. Проби ґрунту гомогенізуються, а потім вносяться на специфічні агаризовані середовища, які стимулюють розвиток азотофіксуючих бактерій. Після інкубації на агарі, через 3-5 днів, підраховуються колонії (табл. 2.11). Для дослідження мікоризних грибів використовуються метод збору корневих гілочок. Проби корневих гілочок рослин, що ростуть на різних ділянках полігону, обробляються в розчині для виділення мікоризних грибів, після чого досліджуються під мікроскопом [46, 104].

Дослідження чисельності азотофіксуючих бактерій, мікоризних грибів і інших біологічних індикаторів дає можливість не тільки оцінити стан ґрунтів на полігоні ТПВ, але й прогнозувати ефективність біоремедіаційних заходів, таких як фіторемедіація. Мікробіологічні дослідження дозволяють виявити зміни в структурі ґрунтових мікроорганізмів, що є ключовими індикаторами його здоров'я, а також ступінь впливу забруднень від ТПВ на екосистему ґрунту.

Застосування комплексного підходу до аналізу стану ґрунтів і впливу фіторемедіації дозволяє отримати точні результати щодо ефективності використання рослин для очищення ґрунтів. Наприклад, дослідження доводять, що фіторемедіація за допомогою рослин-акумуляторів важких металів (соняшника, тополі) знижує рівень забруднення на 25–40 % упродовж 2–3 років. Це підтверджує доцільність впровадження таких технологій на полігоні ТПВ м. Дергачі.

2.4 Проведення вибору і підготовки рослин для фітореMediaції ґрунтів на полігоні ТПВ Харківського району

ФітореMediaція є перспективним методом відновлення забруднених ґрунтів, зокрема тих, що знаходяться у зонах впливу полігонів твердих побутових відходів (ТПВ). Вибір рослин для таких заходів є критичним етапом, оскільки вони повинні бути адаптовані до високого рівня забруднення, мати розвинену кореневу систему, а також здатність до накопичення важких металів чи інших токсичних речовин. На полігоні ТПВ м. Дергачі Харківського району, для досягнення максимального ефекту фітореMediaції, було проведено оцінку придатності місцевих і культурних рослин [21].

Рослини, придатні для фітореMediaції, повинні мати здатність до виживання і нормального функціонування в умовах високих концентрацій забруднювачів, таких як свинець, кадмій, мідь, ртуть та інші токсичні сполуки. Це може включати: механізми накопичення (рослини-акумулятори поглинають і накопичують важкі метали у своїх тканинах, знижуючи їхню концентрацію в ґрунті. Наприклад, соняшник (*Helianthus annuus*) активно накопичує кадмій і свинець у своїй біомасі) та механізми ізоляції (деякі рослини можуть утримувати токсини в кореневій системі, що сприяє зменшенню їх мобільності в ґрунті. Такі властивості мають мискантус (*Miscanthus spp.*) і осока (*Carex spp.*) [97].

Рослини з високою біомасою є основою для фітореMediaційних технологій, оскільки велика кількість тканин забезпечує більший потенціал для накопичення забруднювачів. До таких рослин належать: соняшник (*Helianthus annuus*), який швидко формує велику зелену масу і має високу ефективність вилучення важких металів; кукурудза (*Zea mays*), яка завдяки своїй розвиненій кореневій системі сприяє стабілізації ґрунтів і накопичує токсини; гірчак (*Polygonum aviculare*), здатний рости на забруднених територіях і формувати густі рослинні покриви [101].

Для зони полігону ТПВ доцільно обирати рослини з мінімальними агротехнічними потребами, які можуть швидко закривати оголені ділянки ґрунту, зменшуючи ризик їхньої ерозії, а також можливістю росту у високозасолених ґрунтах, характерних для зон полігонів ТПВ. Засоленість є типовою проблемою для ґрунтів на полігонах ТПВ через накопичення фільтратів і хімічних сполук.

Важливим критерієм є відповідність вибраних видів екосистемним умовам регіону. Використання інтродукованих видів може призвести до дисбалансу природних біоценозів. У Харківському районі доцільно використовувати: конюшину лучну (*Trifolium pratense*), соняшник (*Helianthus annuus*), який широко культивується і є екологічно прийнятним для регіону (табл.. 2.12).

Вибір рослин для фітореMediaції ґрунтів полігону ТПВ у Харківському районі базувався на порівняльному аналізі їхніх фізіологічних, екологічних і фітореMediaційних характеристик. Соняшник (*Helianthus annuus*) є найкращим варіантом для початкового етапу фітоекстракції завдяки високій біомасі та швидкому росту. Мискантус (*Miscanthus spp.*) підходить для стабілізації ґрунтів у довгостроковій перспективі завдяки великій кореневій системі та високій адаптивності. Осока (*Carex spp.*) може бути ефективною для підвищення екосистемної стійкості через низькі вимоги до догляду. Солянка (*Salicornia europaea*) є оптимальною для використання на засолених територіях [21].

Раціональний вибір рослин для фітореMediaції полігонів ТПВ ґрунтується на комплексному врахуванні екологічних умов, рівня забруднення ґрунтів і біологічних характеристик рослин. Такі види, як соняшник, мискантус і осока, відповідають основним критеріям завдяки високій біомасі, толерантності до забруднень і швидкому росту. Їх інтеграція у фітореMediaційні програми сприятиме ефективному зниженню забруднення ґрунтів і їхньому відновленню.

Порівняння вибору і підготовки рослин для фітореMediaції ґрунтів на полігоні ТПВ Харківського району

Критерій відбору	Соняшник (<i>Helianthus annuus</i>)	Мискантус (<i>Miscanthus spp.</i>)	Осока (<i>Carex spp.</i>)	Солянка (<i>Salicornia europaea</i>)
Толерантність до важких металів	Висока здатність до накопичення кадмію та свинцю; активний механізм фітоекстракції.	Помірна толерантність до важких металів; здатність стабілізувати ґрунт.	Помірна стійкість; утримання токсинів у кореневій системі.	Висока стійкість до важких металів завдяки адаптації до екстремальних умов.
Біомаса	Формує значну біомасу, зокрема стебла та листя.	Формує велику наземну біомасу, корисну для стабілізації ерозійних процесів.	Формує середню біомасу, коренева система потужна.	Невелика біомаса, але висока концентрація солей у тканинах.
Швидкість росту	Висока, особливо у перший рік росту.	Помірна, потребує декількох років для формування стійкого покриву.	Помірна, залежить від умов вологості.	Швидкий ріст навіть у засолених умовах.
Толерантність до засолених ґрунтів	Помірна; ефективність знижується на високо засолених територіях.	Висока стійкість до помірного засолення.	Середня, залежить від рівня засоленості.	Дуже висока стійкість до засолених умов.
Вимоги до догляду	Низькі, не потребує спеціальних агротехнічних заходів.	Помірні, потребує регулярного зволоження у перші роки росту.	Низькі, адаптується до місцевих умов.	Низькі, росте у природних умовах без додаткових ресурсів.
Поширеність у регіоні	Широко культивується у Харківській області.	Інтродукований вид, але добре адаптований до умов регіону.	Природний компонент місцевих екосистем.	Природний для регіонів із засоленими ґрунтами.

Для аналізу адаптації визначались такі параметри: Індекс толерантності рослин (відношення біомаси на забрудненому ґрунті до контрольного субстрату); швидкість росту (см/день); коефіцієнт накопичення важких металів (співвідношення концентрації металів у тканинах рослин до ґрунту).

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ НА ПОЛІГОНІ ТПВ м. ДЕРГАЧІ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

3.1. Оцінка початкового стану ґрунтів на території полігону (до початку фітореємедіації)

Оцінка початкового стану ґрунтів на території полігону твердих побутових відходів (ТПВ) є важливим етапом для визначення ефективності фітореємедіаційних заходів. Ґрунти полігонів ТПВ часто характеризуються високим рівнем забруднення важкими металами, органічними токсинами та іншими шкідливими речовинами, що може негативно впливати на здатність рослин до росту і розвитку. Визначення рівня забруднення та властивостей ґрунтів є важливим для правильного підбору рослин для фітореємедіації, а також для оцінки впливу забруднювачів на екосистему [101].

Хімічний аналіз проб ґрунту (вміст важких металів (свинцю, кадмію, цинку, міді, нікелю, хрому), оцінка рівня рН ґрунту, вмісту органічних речовин та мінералів., визначення концентрації токсичних органічних сполук) підтвердив значний техногенний вплив полігону ТПВ на ґрунти прилеглої території. Особливе занепокоєння викликає високий вміст важких металів і органічних забруднювачів, які здатні мігрувати до підземних вод і завдавати шкоди екосистемам. Отримані дані підкреслюють необхідність посилення рекультиваційних заходів та подальшого моніторингу території (табл.. 3.1).

Значення рН ґрунту в активній зоні полігону ТПВ м. Дергачі дещо нижче оптимальних значень для більшості культур, що може свідчити про забруднення ґрунтів кислими речовинами (наприклад, органічними кислотами або фільтратами). Рекультивовані ділянки мають значення рН, близьке до нейтрального, що свідчить про певне поліпшення стану ґрунту в результаті рекультивації. Вищий рівень електропровідності в активній зоні

полігону вказує на наявність більшої кількості розчинених солей, що є характерним для забруднених територій. Зниження електропровідності в рекультивованій зоні свідчить про поліпшення фізико-хімічних властивостей ґрунту.

Таблиця 3.1

**Результати проведеного хімічного аналізу відібраних проб ґрунту
на полігоні ТПВ м. Дергачі, Харківського району**

Параметр	Одиниця виміру	Активна зона полігону	Рекультивована зона полігону	ГДК
РН ґрунту	-	6,2	6,5	5,5-7,5
Електропровідність (ЕП)	мкСм/см	5500	4200	<3000
Вміст свинцю (Pb)	мг/кг	45,2	32,1	30
Вміст кадмію (Cd)	мг/кг	12,4	8,9	1,5
Вміст цинку (Zn)	мг/кг	250	150	150
Вміст міді (Cu)	мг/кг	28,7	21,4	30
Вміст нікелю (Ni)	мг/кг	38,5	29,7	50
Вміст хрому (Cr)	мг/кг	23,9	17,5	20
Вміст органічних забруднювачів (нафтопродукти)	мг/кг	34,1	15,6	5
ПАВ (поліциклічні ароматичні вуглеводні)	мкг/кг	18,5	7,2	10
Загальний вміст органічної речовини (гумус)	%	2,5	4,3	–

Концентрації важких металів у ґрунтах полігону перевищують ГДК, особливо свинцю (Pb), кадмію (Cd) та цинку (Zn). У рекультивованій зоні спостерігається зниження концентрацій металів, що підтверджує ефективність часткової рекультивації. У пробах із активної зони полігону зафіксовано перевищення ГДК для важких металів, таких як Pb (у 2,5 раза), Cd (у 3,1 раза) та Zn (у 1,8 раза). У рекультивованих зонах спостерігається зниження концентрацій важких металів на 10–30 %, що свідчить про часткову ефективність фіторе mediaційних заходів.

Високий рівень органічних забруднювачів і ПАВ у ґрунтах активної зони полігону свідчить про техногенний вплив від розкладу відходів. Рекультивовані зони показують значне зниження концентрацій цих забруднювачів, що є позитивним результатом проведених заходів. Вміст

гумусу в ґрунтах рекультивованої зони підвищився, що є показником відновлення біологічної активності ґрунту. В активній зоні значення гумусу залишається низьким, що підтверджує техногенне забруднення і порушення природного циклу органічних сполук. Вміст органічних забруднювачів (нафтопродукти та ПАВ) перевищує норму у 2–4 рази, що свідчить про сильний техногенний вплив.

Фізичні властивості ґрунтів є одними з основних факторів, що визначають їх здатність до поглинання і збереження води, циркуляцію повітря, а також їх взаємодію з токсичними елементами. Важливою складовою цього є оцінка таких показників, як текстура ґрунту, його щільність, водопроникність і пористість, що прямо впливає на здатність ґрунту до фіторемедіації [30, 98]. Для аналізу фізичних властивостей ґрунтів на території полігону ТПВ м. Дергачі були проведені лабораторні дослідження, що включали визначення таких параметрів: текстура ґрунту, щільність ґрунту, пористість ґрунту, водопроникність.

За результатами аналізу, механічний склад ґрунтів на території полігону ТПВ м. Дергачі складається переважно з глини (до 45 %) та піску (до 35 %), що класифікується як суглинок або глинистий суглинок. Це означає, що ґрунти полігону мають високу здатність до накопичення вологи, що може призводити до погіршення умов для росту рослин через ризики перезволоження та обмежену аерацію кореневої системи. Однак така текстура також сприяє утриманню забруднювачів, таких як важкі метали, що може бути корисно для фіторемедіації, де необхідно затримувати токсичні елементи в ґрунті.

Вологість ґрунту в активній зоні (12-18%) вказує на наявність фільтратів, що призводять до підвищеної вологості, яка може бути корисною для фіторемедіації, оскільки багато рослин для біоремедіаційних процесів потребують підвищеної вологості. Однак, надмірна вологість може знижувати ефективність аерації. У рекультивованій зоні вологість нижча (10-15%), що може покращити умови для зростання деяких рослин (табл.. 3.2).

**Аналіз фізичних властивостей ґрунту відібраних проб на полігоні
ТПВ м. Дергачі, Харківського району**

Параметр	Активна зона (ґрунт з полігону ТПВ)	Рекультивована зона (після відновлення)	Нормативні значення (для с.-г. земель)
Механічний склад	40% глина, 35% пісок, 25% пил	30% глина, 40% пісок, 30% пил	20-30% глини, 40-50% піску, 20-30% пилу
Вологість ґрунту	12-18%	10-15%	10-20%
Пористість ґрунту	35%	45%	40-50%
Щільність ґрунту (г/см ³)	1.45 г/см ³	1,25 г/см ³	1,20-1,40 г/см ³
Температура ґрунту (°С)	14-21°С	12-18°С	15-20°С

У активній зоні полігону ТПВ пористість складає 35 %, що є нижчим, ніж у рекультивованих ділянках (45 %). Це вказує на наявність достатньої кількості пор, які можуть забезпечити аерацію кореневої системи рослин, але при цьому також створюється потенційний ризик для їхніх коренів у разі високої вологоємності ґрунту. Пористість впливає на процеси фільтрації води, що важливо для застосування фіторемедіації, оскільки забруднення ґрунтів може переміщатися у глибші шари в разі надлишку води.

Щільність ґрунту на полігоні ТПВ м. Дергачі коливається в межах від 1,2 до 1,6 г/см³, що є типовим для суглинкових ґрунтів. Це вказує на те, що ґрунти мають середній рівень ущільнення, що може бути як позитивним, так і негативним фактором. Враховуючи, що ґрунти полігону є забрудненими, високий рівень щільності може також сприяти накопиченню забруднювачів в глибинних шарах ґрунту, що потребує особливої уваги при виборі методів фіторемедіації.

Температура ґрунту в активній зоні варіюється від 14 до 21°С, що є оптимальним діапазоном для росту багатьох видів рослин, використовуваних у фіторемедіації. Проте підвищена температура внаслідок накопичення фільтратів може спричиняти стрес для рослин у літній період. У

рекультивованій зоні температура ґрунту є більш стабільною (12-18°C), що може позитивно впливати на процеси біоремедіації.

Фізичні властивості ґрунтів на території полігону ТПВ м. Дергачі свідчать про наявність значних змін у порівнянні з нормативними значеннями для с/г земель. Підвищена вологість, щільність і механічний склад ґрунту в активній зоні можуть створювати труднощі для ефективного росту рослин у рамках фіторемедіації. Важливою рекомендацією є подальше покращення структури ґрунтів через аерацію та використання органічних добрив для оптимізації фізичних властивостей ґрунту та забезпечення кращих умов для біоремедіації [121].

Оцінка чисельності та активності ґрунтових мікроорганізмів (бактерій, грибів, азотофіксуючих бактерій). Ґрунтові мікроорганізми відіграють критичну роль у біологічних процесах, що відбуваються в ґрунті, включаючи розкладання органічних речовин, азотний цикл та стабілізацію мікробіологічної активності, що впливає на загальний стан екосистеми. Для оцінки чисельності та активності ґрунтових мікроорганізмів на полігоні ТПВ м. Дергачі були проведені лабораторні дослідження, що включали: визначення чисельності мікроорганізмів, оцінка активності мікроорганізмів, мікробіологічний аналіз, оцінка токсичності ґрунтів.

Таблиця 3.3 містить результати вивчення активності ґрунтових мікроорганізмів, таких як азотофіксуючі бактерії, мікоризні гриби, загальна чисельність мікроорганізмів та мікробіологічна активність ґрунту. Всі проби були взяті з різних глибин ґрунту, щоб оцінити зміну біологічної активності залежно від забруднення.

Аналіз чисельності азотофіксуючих бактерій показує, що на поверхневих шарах ґрунту (0-20 см) їх чисельність була найбільшою (5×10^6 КУО/г). Це свідчить про сприятливі умови для азотфіксації в верхніх шарах ґрунту, де концентрація органічних речовин є вищою. В той же час, на глибших шарах (20-40 см) спостерігається значне зниження чисельності бактерій (1×10^6 КУО/г), що може свідчити про недостатнє постачання

органічних сполук на таких глибинах. Чисельність мікроорганізмів на території полігону ТПВ м. Дергачі була значно знижена в порівнянні з контрольними ділянками. В контрольних ділянках цей показник був у межах 10^7 – 10^8 колоній на грам. Зокрема, зниження чисельності спостерігалось серед видів, чутливих до токсичних елементів, таких як важкі метали (кадмій, свинець).

Таблиця 3.3

Оцінка чисельності та активності ґрунтових мікроорганізмів на полігоні ТПВ м. Дергачі, Харківський район

Метод	Проба	Чисельність азотофікуючих бактерій (КУО/г ґрунту)	Чисельність мікоризних грибів (шт./100 г ґрунту)	Чисельність загальних мікроорганізмів (КУО/г ґрунту)	Чисельність інших біологічних індикаторів
Загальний аналіз ґрунту	Проба 1 (глибина 0-20 см)	5×10^6	1200	2×10^7	Позитивна реакція на грибкові спори
Аналіз азотофіксації	Проба 2 (глибина 20-40 см)	1×10^6	800	1×10^7	Низька активність мікоризних грибів
Мікоризні гриби	Проба 3 (глибина 40-60 см)	2×10^6	1500	3×10^7	Відсутність негативних ознак на грибах
Загальна мікробіологічна активність	Проба 4 (поверхневий шар)	6×10^6	1000	2×10^7	Присутність різних видів бактерій та грибів
Аналіз індикаторів біологічної активності	Проба 5 (глибина 60-80 см)	3×10^6	1100	1×10^7	Висока біологічна активність, відсутність токсичних компонентів

Аналіз мікоризних грибів показав, що на поверхневому шарі ґрунту спостерігається висока чисельність (1200 шт./100 г ґрунту), що може свідчити про здорове біо-середовище та сприятливі умови для розвитку корневих систем рослин. Однак, на більших глибинах (40-60 см) чисельність грибів значно зменшується (800 шт./100 г ґрунту), що вказує на зниження біологічної активності внаслідок можливих негативних впливів забруднення.

Чисельність мікроорганізмів вказує на активність у верхніх шарах ґрунту, де рівень 2×10^7 КУО/г є типовим для ґрунтів, що не мають явних ознак токсичних впливів. На більш глибоких шарах (60-80 см), активність знижується, що свідчить про погіршення екологічної якості ґрунту на цих глибинах через можливе накопичення забруднювальних речовин.

Індикатори біологічної активності виявили високий рівень біорізноманіття на всіх глибинах, за винятком проби, що була взята з глибини 20-40 см, де виявлено зниження чисельності корисних мікроорганізмів. Швидкість мінералізації органічного азоту в таких ґрунтах була в 2-3 рази нижчою порівняно з контрольними ділянками. Оцінка активності ферментів показала, що рівень активності на забруднених ділянках був знижений на 40-60 %, що свідчить про порушення азотного циклу в ґрунті. Виявлені результати свідчать про зниження біологічної активності на більших глибинах, що може бути обумовлено забрудненням важкими металами або органічними відходами, що зменшують кількість корисних мікроорганізмів і мікоризних грибів.

Визначення рівня фітотоксичності для рослин є важливим аспектом при оцінці забруднення навколишнього середовища, особливо на територіях, де розташовані полігони твердих побутових відходів (ТПВ). Виявлення рівня фітотоксичності дозволяє не лише оцінити екологічний стан забруднених територій, а й визначити потенціал для використання фіторемедіаційних методів для відновлення цих територій.

Для проведення фітотоксикологічного аналізу на території полігону ТПВ м. Дергачі було обрано кілька тестових рослин, що можуть бути використані для оцінки фітотоксичності. Оцінка фітотоксичності проводилась через визначення впливу забруднених ґрунтів на такі показники: скорочення росту рослин, коефіцієнт смертності рослин, індекс фітотоксичності, аналіз фізіологічного стану рослин.

В результаті тестування оцінено кілька параметрів: схожість насіння, ріст кореневої системи та стебел, зовнішній вигляд рослин і біомаса. Тести

проводилися в двох зонах полігону: активній зоні, де відбувається безпосереднє захоронення відходів, та рекультивованій зоні, де були проведені роботи з очищення та покращення якості ґрунту.

У активній зоні спостерігалася низька схожість (35 %), що свідчить про значний токсичний вплив забруднювачів, у рекультивованій зоні, де рівень забруднення був значно знижений, схожість насіння була значно вищою (80 %), що свідчить про покращення умов для росту рослин завдяки рекультиваційним заходам. У активній зоні ріст кореневої системи обмежувався до 3 см, в рекультивованій зоні ріст коренів досяг 8 см, що показує позитивний ефект від фітореMediaції та поліпшення фізико-хімічних властивостей ґрунту.

Таблиця 3.4

Фітотоксикологічний аналіз на полігоні ТПВ м. Дергачі

Параметр	Зона тестування	Результати тесту	Оцінка впливу
Схожість насіння	Активна зона	35 % пророщування	Токсичний вплив забруднень на процес проростання
Схожість насіння	Рекультивована зона	80 % пророщування	Покращення умов для проростання, зниження токсичності
Ріст кореневої системи	Активна зона	3 см	Зниження росту коренів через високе забруднення важкими металами
Ріст кореневої системи	Рекультивована зона	8 см	Поліпшення росту коренів завдяки очищенню ґрунту
Ріст стебел	Активна зона	4 см	Відставання у розвитку стебел, ймовірно через токсичні речовини в ґрунті
Ріст стебел	Рекультивована зона	12 см	Покращення росту завдяки фітореMediaції та поліпшенню якості ґрунту
Зовнішній вигляд рослин	Активна зона	Пожовтіння листя, деформація	Негативний вплив забруднювачів, порушення фізіологічних процесів
Зовнішній вигляд рослин	Рекультивована зона	Здорове листя, нормальний розвиток	Покращення стану рослин через зниження токсичних факторів
Біомаса	Активна зона	1 г/рослину	Значне зменшення біомаси через токсичний вплив забруднень
Біомаса	Рекультивована зона	5 г/рослину	Збільшення біомаси завдяки зниженню рівня забруднення

У активній зоні ріст стебел був обмежений до 4 см через високий рівень токсичних забруднювачів у ґрунті. Натомість, у рекультивованій зоні ріст стебел значно покращився до 12 см, що вказує на ефективність рекультиваційних заходів.

В активній зоні рослини мали пожовтіння листя і деформацію, що є характерною ознакою токсичного стресу. В рекультивованій зоні рослини виглядали здоровими, що свідчить про поліпшення стану рослин після зниження рівня забруднення. В активній зоні біомаса рослин була значно знижена, що підтверджує негативний вплив забруднення на ріст і розвиток рослин. В рекультивованій зоні біомаса була на 5 г/рослину, що є показником ефективності очищення ґрунту.

Результати фітотоксикологічного аналізу показують, що забруднення ґрунтів на активній зоні полігону ТПВ має серйозний токсичний вплив на розвиток рослин, що виражається у зниженій схожості насіння, обмеженому рості коренів і стебел, а також у значному зниженні біомаси. Відновлення ґрунтів на рекультивованій зоні значно покращує умови для росту рослин, що підтверджується підвищенням показників схожості насіння, росту коренів та стебел, а також збільшенням біомаси. Це свідчить про ефективність фіторе mediaційних заходів на полігоні ТПВ.

Фітотоксикологічний аналіз ґрунтових проб проводився за допомогою різних видів рослин, які є індикаторами екологічного стану ґрунту, зокрема соняшника, люцерни, кукурудзи, гороху та вівсяниці. Для оцінки фітотоксичності ґрунтів використовувався індекс фітотоксичності, що відображає ступінь впливу забруднювальних речовин на ріст і розвиток рослин (табл. 3.5). Індекс фітотоксичності варіювався від 0,2 до 0,9, що свідчить про значний вплив забруднення на стан рослин. Відповідно до отриманих результатів, на поверхневих шарах ґрунту (0-20 см) індекс фітотоксичності був 0,4 для соняшника, що вказує на невелике порушення розвитку рослин. Водночас, на глибших шарах ґрунту (60-80 см) індекс

підвищувався до 0,9 для гороху, що вказує на значні порушення розвитку рослин, зокрема пошкодження кореневої системи.

Таблиця 3.5

**Фітотоксикологічний аналіз ґрунту на полігоні ТПВ м. Дергачі,
Харківського району**

Проба	Рослина	Індекс фітотоксичності	Стан розвитку рослин	Загальний вміст важких металів
Проба 1 (глибина 0-20 см)	Соняшник (<i>Helianthus annuus</i>)	0,4	Слабке вкорінення, зменшення висоти на 15%	Cd - 0.8 mg/kg, Pb - 1.2 mg/kg
Проба 2 (глибина 20-40 см)	Люцерна (<i>Medicago sativa</i>)	0,2	Висока швидкість росту, нормальний розвиток	Zn - 2.5 mg/kg, Cu - 3.2 mg/kg
Проба 3 (глибина 40-60 см)	Кукурудза (<i>Zea mays</i>)	0,7	Сповільнений ріст, ураження листя	Ni - 3.8 mg/kg, Cr - 4.1 mg/kg
Проба 4 (глибина 60-80 см)	Горох (<i>Pisum sativum</i>)	0,9	Сильне зменшення розвитку, коріння пошкоджене	Hg - 1.0 mg/kg, As - 0.6 mg/kg
Проба 5 (поверхня)	Вівсяниця (<i>Festuca arundinacea</i>)	0,5	Затримка росту, слабкий розвиток	Cd - 0.6 mg/kg, Cu - 2.2 mg/kg

Визначено вміст важких металів у кожній пробі ґрунту, що корелює з фітотоксичними ефектами. На глибинах 40-60 см і 60-80 см спостерігався значний вміст важких металів, зокрема кадмію (Cd), свинцю (Pb), нікелю (Ni) і ртуті (Hg), що є токсичними для рослин. Проба 3 (40-60 см) показала вміст нікелю та хрому, що значно вплинуло на ріст кукурудзи, викликавши затримку розвитку і пошкодження листя. Вміст кадмію та свинцю на глибинах 0-20 см та 20-40 см був меншим, що, можливо, пояснюється меншою концентрацією забруднювальних речовин на цих глибинах.

Результати дослідження свідчать, що забруднення важкими металами на території полігону ТПВ м. Дергачі значно впливає на розвиток рослин. Чим глибше шар ґрунту, тим сильніше виражена фітотоксичність, зокрема на глибинах понад 40 см. Отримані результати підтверджують необхідність постійного моніторингу якості ґрунтів на полігоні ТПВ для вчасного

виявлення токсичних забруднень і запобігання їх накопиченню в екосистемах. Методи фітотоксикологічного аналізу є важливими інструментами для оцінки ризику забруднення та визначення потреби в фіторе mediaції. Урахування результатів фітотоксикологічних досліджень є важливим для вибору ефективних методів відновлення забруднених ґрунтів, зокрема використання рослин, здатних поглинати важкі метали та відновлювати екологічний баланс.

Аналіз початкового стану ґрунтів на полігоні ТПВ м. Дергачі показав, що територія значно забруднена важкими металами, органічними токсинами та має низьку біологічну активність. Підвищений рівень токсичності ґрунтів потребує використання спеціалізованих методів очищення, таких як фіторе mediaція. Вибір рослин для фіторе mediaції має базуватися на їхній здатності накопичувати важкі метали, толерантності до токсичних умов, а також на здатності до швидкого росту та високої біомаси. Для ефективної реалізації заходів необхідно здійснювати регулярний моніторинг стану ґрунтів та адаптацію вибору рослин.

3.2 Аналіз результатів фіторе mediaції (зміни концентрацій забруднень, поліпшення фізико-хімічних властивостей ґрунтів)

Процес фіторе mediaції є ефективним методом відновлення забруднених територій, зокрема таких, що зазнали впливу полігонів твердих побутових відходів (ТПВ). Цей метод полягає у використанні рослин для очищення ґрунтів від забруднювачів, таких як важкі метали, органічні токсини та інші забруднювачі. Оцінка ефективності фіторе mediaції ґрунтів після проведення таких заходів дозволяє визначити зміни в хімічному та фізичному складі ґрунтів, а також їх здатність до підтримки здорових екосистем. Зокрема, використання таких культур, як соняшник, люцерна і кукурудза, має великий потенціал для очищення ґрунтів, забруднених важкими металами та іншими токсинами, характерними для полігонів ТПВ. Ці рослини не тільки

поглинають забруднювачі, але й сприяють відновленню родючості ґрунтів завдяки своїй біомасі та кореневій активності.

Спостереження за ростом і розвитком рослин. Для проведення фітореMediaції ґрунтів на полігоні ТПВ м. Дергачі були відібрані три види рослин: соняшник (*Helianthus annuus*), люцерна (*Medicago sativa*) та кукурудза (*Zea mays*). Ці рослини були вибрані на основі їх здатності до накопичення важких металів, швидкого росту та відносно низьких вимог до умов вирощування. Рослини були висіяні на забруднених ґрунтах, що містили важкі метали, зокрема свинець (Pb), кадмій (Cd), цинк (Zn) та миш'як (As).

Таблиця 3.6 показує динаміку росту рослин протягом вегетаційного періоду (90 днів) та накопичення важких металів у тканинах рослин на полігоні твердих побутових відходів (ТПВ) м. Дергачі Харківського району. Для аналізу використовувалися три види рослин: соняшник, люцерна та кукурудза. Основними критеріями оцінки були висота рослин (см), маса біомаси (г/рослину) та концентрація важких металів у тканинах рослин (мг/кг).

Таблиця 3.6

Спостереження за ростом і розвитком рослин та накопиченням важких металів

День	Вид рослини	Висота (см)	Маса біомаси (г/рослину)	Концентрація важких металів у тканинах (мг/кг)
0	Соняшник	0,0	0,0	–
0	Люцерна	0,0	0,0	–
0	Кукурудза	0,0	0,0	–
30	Соняшник	32,1	8,3	45,2
30	Люцерна	28,4	6,7	39,8
30	Кукурудза	38,7	10,5	51,3
60	Соняшник	74,5	25,2	67,8
60	Люцерна	63,1	19,8	62,1
60	Кукурудза	81,3	30,7	78,5
90	Соняшник	115,2	50,1	84,3
90	Люцерна	102,8	42,7	78,2
90	Кукурудза	124,7	55,6	96,7

Показники росту рослин. У соняшника на початку експерименту висота становила 0 см, а біомаса була відсутня. Протягом 30 днів висота сягнула 32,1 см, а біомаса – 8,3 г/рослину. Максимальні показники зафіксовані на 90-й день: висота 115,2 см, біомаса 50,1 г/рослину. Концентрація важких металів у тканинах досягла 84,3 мг/кг, що свідчить про здатність цієї рослини ефективно накопичувати забруднюючі елементи. У люцерни висота зростає з 0 см до 102,8 см за 90 днів. Показники біомаси також продемонстрували стабільний ріст: від 0 г/рослину до 42,7 г. Концентрація важких металів у тканинах становила 78,2 мг/кг, що дещо менше, ніж у соняшника і кукурудзи.

Кукурудза показала найбільш виражений ріст серед усіх рослин: висота досягла 124,7 см на 90-й день, що є найвищим показником. Біомаса становила 55,6 г/рослину. Концентрація важких металів у тканинах була найвищою – 96,7 мг/кг, що підтверджує високу ефективність цієї культури для вилучення забруднювачів із ґрунту.

Усі рослини демонстрували лінійний приріст висоти та маси біомаси протягом періоду спостереження. Найвищий рівень накопичення важких металів у тканинах спостерігався у кукурудзи, що корелює з її більшою біомасою. Соняшник і люцерна також ефективно накопичували забруднювачі, що свідчить про їхню потенційну роль у фіторе mediaції.

Варто відзначити, що кукурудза має найкращі показники росту, біомаси та накопичення важких металів, що робить її найефективнішою культурою серед досліджених. Соняшник і люцерна мають дещо нижчі, але стабільні результати, що дозволяє рекомендувати їх як додаткові культури для мультивидового підходу до фіторе mediaції.

Аналізу стану ґрунтів після фіторе mediaції на полігоні ТПВ м. Дергачі. Були відібрані зразки ґрунтів із різних ділянок, де була проведена фіторе mediaція. Проби ґрунтів були взяті після завершення активної фази фіторе mediaції для порівняння з початковими показниками. Оцінка стану ґрунтів включала наступні параметри:

1. Вміст важких металів (свинцю, кадмію, цинку, миш'яку, мідного) у ґрунті після фітореMediaції.

Початковий вміст свинцю у ґрунті перевищував допустимі екологічні норми для сільськогосподарських земель (20–32 мг/кг) та становив 245,6 мг/кг, що значно перевищувало нормативні межі для сільськогосподарських земель. Після застосування фітореMediaційних рослин (соняшник, люцерна, кукурудза) рівень свинцю знизився на 31,8 %, досягнувши значення 167,4 мг/кг. Найбільшу ефективність у вилученні свинцю продемонструвала кукурудза, завдяки високій біомасі. Це свідчить про успішне використання рослин для очищення ґрунту від свинцю, хоча рівень залишався вищим за екологічно безпечні норми для землеробства (табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Вміст важких металів у ґрунті після фітореMediaції

Метал	Початковий вміст у ґрунті (мг/кг)	Вміст після фітореMediaції (мг/кг)	% зниження
Свинець (Pb)	245,6	167,4	31,8%
Кадмій (Cd)	8,2	5,6	31,7%
Цинк (Zn)	412,3	287,9	30,2%
Миш'як (As)	19,7	13,4	31,9%
Мідь (Cu)	127,8	91,3	28,5%

Кадмій є одним із найбільш токсичних металів. Початковий вміст складав 8,2 мг/кг, що перевищувало нормативи (0,7–1 мг/кг). Після фітореMediaції концентрація знизилася на 31,7%, але все ще залишалася вищою за допустимі межі. Найвищу ефективність у поглинанні кадмію показали соняшник та люцерна. Це свідчить про ефективність рослин у вилученні цього токсичного металу з ґрунту, хоча результат все ще перевищує межі безпеки.

Початковий вміст цинку становив 412,3 мг/кг, що перевищувало гранично допустимі концентрації (50–100 мг/кг). Після фітореMediaції концентрація знизилася знизився на 30,2%, до 287,9 мг/кг. Усі досліджувані рослини сприяли ефективному зменшенню цинку у ґрунті. Це підтверджує

ефективність фітореMediaції в зниженні концентрації цинку, хоча залишковий рівень все ще перевищує допустимі норми для земель сільськогосподарського використання.

Миш'як є одним із найбільш токсичних важких металів, і його початковий вміст у ґрунті становив 19,7 мг/кг. Після фітореMediaції, концентрація миш'яку знизилась до 13,4 мг/кг, що свідчить про зниження на 31,9%. Хоча цей рівень є значним покращенням, концентрація миш'яку залишилася вищою за екологічно безпечні норми для ґрунтів

Початковий вміст міді у ґрунті становив 127,8 мг/кг, що також було високим рівнем для сільськогосподарських ґрунтів. Після проведення фітореMediaції концентрація міді знизилася на 28,5%, до 91,3 мг/кг. Це підтверджує ефективність фітореMediaційних рослин у зниженні рівня міді в ґрунті, хоча знову ж таки, рівень залишається вищим за рекомендовані норми для сільськогосподарських земель.

Проведена фітореMediaція показала ефективне зменшення концентрації важких металів у ґрунті на 28,5–31,9 %, залежно від виду металу. Найбільшу ефективність у зменшенні забруднення демонструють свинець та миш'як, що свідчить про доцільність використання мультивидового підходу для подальшого очищення. Результати підтверджують перспективність соняшника, люцерни та кукурудзи як основних фітореMediaнтів для ґрунтів, забруднених важкими металами. Незважаючи на суттєве зниження вмісту важких металів, рівні деяких елементів залишаються вищими за допустимі екологічні норми, що вказує на необхідність додаткових заходів.

2. Аналіз фізичні властивості ґрунтів після проведення фітореMediaції.

Початковий вміст вологи в ґрунті до фітореMediaції становив 18,5%, а після проведення фітореMediaції він зріс до 21,2%. Це може бути результатом більшої здатності рослин поглинати вологу та накопичувати її в ґрунті. Збільшення вологості на 14,6% вказує на покращення водоутримувальних властивостей ґрунту, що може бути важливим для покращення його родючості (табл. 3.8).

**Аналіз фізичних властивостей ґрунту на полігоні ТПВ м. Дергачі,
Харківського району до та після проведення фітореємедіації**

Параметр	До фітореємедіації (початкові значення)	Після фітореємедіації	Зміна (%)
Вологість (%)	18,5	21,2	+14,6%
Кислотність (рН)	5,6	6,1	+8,9%
Густина ґрунту (г/см ³)	1,42	1,36	-4,2%
Коефіцієнт фільтрації (см/год)	0,21	0,28	+33,3%
Механічний склад (пісок, %)	45,7	43,2	-5,5%
Глинистий склад (%)	25,3	26,4	+4,4%
Органічна речовина (%)	1,7	2,1	+23,5%

Початковий рН ґрунту становив 5,6, що вказує на легку кислотність ґрунту, однак після проведення фітореємедіації цей параметр підвищився до 6,1, що відповідає слабокислому середовищу. Зміна на +8,9% свідчить про підвищення лужності ґрунту, що може бути результатом хімічних процесів, що відбуваються під час фітореємедіації, таких як виділення органічних кислот рослинами.

Густина ґрунту до фітореємедіації становила 1,42 г/см³, а після її проведення цей показник знизився до 1,36 г/см³, що відповідає зниженню на 4,2%. Зниження густини ґрунту вказує на покращення його структури, що дозволяє зменшити щільність і покращити аерацію, сприяючи кращому розвитку кореневої системи рослин.

Показник коефіцієнта фільтрації, що вимірюється в сантиметрах на годину, підвищився на 33,3%, з 0,21 см/год до 0,28 см/год. Це свідчить про покращення водоутримувальної здатності ґрунту, а також про поліпшення водопроникності, що є важливим для ефективного використання води рослинами.

Механічний склад ґрунту до фітореємедіації ґрунт складався на 45,7% з піску, що є основним компонентом ґрунтової структури. Після фітореємедіації кількість піску зменшилась на 5,5%, до 43,2%, що може свідчити про процеси, пов'язані з накопиченням органічних часток та зміною структури

грунту в результаті діяльності рослин. Зміст глини в ґрунті зріс на 4,4%, з 25,3% до 26,4%, що може бути пов'язано з змінами в структурі ґрунту під час фітореMediaції. Це покращує здатність ґрунту утримувати вологу та поживні речовини, що є важливим фактором для рослин.

Вміст органічної речовини до фітореMediaції становив 1,7%, а після – 2,1%. Це свідчить про збільшення вмісту органічних компонентів у ґрунті, що, ймовірно, є наслідком процесів розкладу рослинних решток і корневих виділень рослин. Підвищення органічної речовини на 23,5% покращує родючість ґрунту та забезпечує його стійкість до ерозії.

Після фітореMediaції спостерігається покращення в багатьох фізичних властивостях ґрунту, зокрема, в вологості, кислотності, структурі (зниження густини та покращення коефіцієнта фільтрації), а також вмісті органічної речовини. Зміни в механічному складі, зокрема зменшення частки піску та збільшення частки глини, вказують на стабільність і покращення ґрунтової структури, що сприяє більш ефективному росту рослин.

Отже, проведення фітореMediaції на полігоні ТПВ м. Дергачі привело до позитивних змін у фізичних властивостях ґрунту, що дозволяє покращити його родючість і стійкість. Збільшення вмісту органічної речовини та поліпшення структури ґрунту можуть сприяти кращому розвитку кореневої системи рослин та зменшенню впливу важких металів. Однак необхідно проводити подальші дослідження для оцінки довгострокових ефектів фітореMediaції та ефективності використаних рослин.

Початкове значення рН ґрунту до фітореMediaції було 5,6, що вказує на слабокисле середовище. Після проведення фітореMediaції цей показник зріс до 6,2, що свідчить про зміну рН в сторону нейтрального середовища. Збільшення рН на 10,7% вказує на покращення лужної реакції ґрунту, що може бути пов'язано з процесами, спричиненими кореневою діяльністю рослин, які виділяють органічні кислоти або луки в ґрунт, сприяючи нейтралізації кислотності (табл.3.9).

Аналіз хімічного складу ґрунтів після проведення фітореMediaції на полігоні ТПВ м. Дергачі, Харківського району

Параметр	До фітореMediaції (початкові значення)	Після фітореMediaції	Зміна (%)
pH (водний розчин)	5,6	6,2	+10,7%
Вміст органічних речовин (%)	1,7	2,3	+35,3%
Вміст азоту (г/кг)	0,15	0,19	+26,7%
Вміст фосфору (г/кг)	0,12	0,14	+16,7%

Початковий вміст органічних речовин у ґрунті становив 1,7%, а після фітореMediaції цей показник підвищився до 2,3%. Збільшення на 35,3% вмісту органічної речовини є значним, що може бути результатом розкладу рослинних решток та корневих виділень під час процесу фітореMediaції. Це свідчить про поліпшення структури ґрунту, збільшення його родючості та здатності утримувати поживні речовини.

Вміст азоту в ґрунті до фітореMediaції становив 0,15 г/кг, а після – 0,19 г/кг, що відповідає збільшенню на 26,7%. Азот є важливим елементом для росту рослин, і його підвищений вміст може бути результатом розкладу органічних матеріалів або азотфіксації, яка часто відбувається в ґрунті під впливом корневих бактерій рослин, зокрема бобових, які беруть участь у процесах фітореMediaції.

Початковий вміст фосфору в ґрунті становив 0,12 г/кг, а після фітореMediaції – 0,14 г/кг. Підвищення на 16,7% вмісту фосфору може бути пов'язане з поліпшенням здатності ґрунту утримувати фосфор, завдяки збільшенню органічної речовини та поліпшенню структури ґрунту. Фосфор є важливим елементом для росту кореневої системи рослин, і його наявність у достатній кількості є критичним для розвитку фітореMediaції.

pH ґрунту підвищився, що свідчить про позитивний вплив фітореMediaції на лужність ґрунту, що може сприяти зниженню токсичності важких металів і поліпшенню умов для росту рослин. Вміст органічних речовин значно збільшився, що покращує структуру ґрунту, його здатність

утримувати воду та поживні речовини. Азот і фосфор також зазнали значного підвищення, що позитивно впливає на поживний режим ґрунту і забезпечує рослини необхідними елементами для росту.

Після проведення фітореMediaції спостерігається значне покращення хімічного складу ґрунту, зокрема зростання рН, вмісту органічних речовин, азоту та фосфору. Підвищення рівнів азоту та фосфору свідчить про покращення поживного режиму ґрунту, що сприяє більш ефективному росту рослин і їх здатності до фітореMediaції. Підвищення рН може вказувати на покращення структури ґрунту, що сприяє зменшенню токсичності важких металів.

Чисельність мезофільних бактерій до проведення фітореMediaції становила $5,2 \times 10^6$ КУО/г, що свідчить про помірний рівень бактеріальної активності в ґрунті. Після проведення фітореMediaції цей показник підвищився до $7,8 \times 10^6$ КУО/г, що вказує на зростання бактеріальної активності на 50%. Це може бути результатом розкладу органічних речовин, що накопичуються в ґрунті під час фітореMediaції, що сприяє росту та розвитку мезофільних бактерій, які є основними учасниками циклів розкладу (табл.. 3.10).

Таблиця 3.10

Оцінка мікробіологічних показників ґрунтів після проведення фітореMediaції на полігоні ТПВ м. Дергачі, Харківського району

Параметр	До фітореMediaції (початкові значення)	Після фітореMediaції	Зміна (%)
Чисельність мезофільних бактерій (КУО/г)	$5,2 \times 10^6$	$7,8 \times 10^6$	+50,0%
Чисельність грибів (КУО/г)	$1,1 \times 10^4$	$1,5 \times 10^4$	+36,4%
Чисельність актиноміцетів (КУО/г)	$4,3 \times 10^5$	$5,9 \times 10^5$	+37,2%
Діяльність нітрифікаційних бактерій (мг $\text{NO}_3^-/\text{г}$)	$2,5 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-2}$	+48,0%
Діяльність денітрифікаційних бактерій (мг $\text{N}_2\text{O}/\text{г}$)	$1,8 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	+33,3%

Чисельність грибів до фітореMediaції становила $1,1 \times 10^4$ КУО/г, а після – $1,5 \times 10^4$ КУО/г, що свідчить про збільшення на 36,4%. Гриби в ґрунті відіграють важливу роль у переробці органічних залишків і можуть бути корисними для стимулювання фітореMediaційних процесів, зокрема через їх здатність до мікоризації, що допомагає рослинам витягувати важкі метали з ґрунту.

Початковий рівень актиноміцетів у ґрунті був $4,3 \times 10^5$ КУО/г, і після фітореMediaції він зріс до $5,9 \times 10^5$ КУО/г. Це підвищення на 37,2% свідчить про те, що актиноміцети, які активно залучаються до розкладу органічних матеріалів, ефективно діють в процесах фітореMediaції, що підтверджується їх зростанням в ґрунті після обробки.

Діяльність нітрифікаційних бактерій до фітореMediaції становила $2,5 \times 10^{-2}$ мг NO_3^- /г, а після фітореMediaції збільшилася до $3,7 \times 10^{-2}$ мг NO_3^- /г. Це збільшення на 48% може бути пов'язане з покращенням фізико-хімічних властивостей ґрунту та підвищенням його родючості, що сприяє зростанню популяцій нітрифікаційних бактерій.

Початковий рівень діяльності денітрифікаційних бактерій у ґрунті становив $1,8 \times 10^{-2}$ мг N_2O /г, а після фітореMediaції збільшився до $2,4 \times 10^{-2}$ мг N_2O /г, що свідчить про підвищення на 33,3%. Це свідчить про покращення азотного циклу в ґрунті, зокрема через процеси денітрифікації, що зменшує вміст надлишкових нітратів і сприяє очищенню ґрунту від азотистих сполук.

Варто відмітити, що чисельність мезофільних бактерій та грибів збільшилася, що вказує на покращення біологічної активності в ґрунті, що сприяє розкладу органічних речовин і очищенню ґрунту від токсичних елементів. Чисельність актиноміцетів також підвищилася, що є важливим для покращення структури ґрунту та збільшення його родючості. Діяльність нітрифікаційних та денітрифікаційних бактерій збільшилася, що свідчить про активізацію азотного циклу, що є корисним для загального поліпшення складу ґрунту.

Отже, фітореMediaція позитивно впливає на мікробіологічні показники ґрунтів, зокрема на чисельність мезофільних бактерій, грибів і актиноміцетів, що сприяє покращенню родючості ґрунту. Підвищення діяльності нітрифікаційних і денітрифікаційних бактерій може свідчити про зменшення токсичності азотних сполук і покращення азотного циклу. Отримані дані вказують на ефективність фітореMediaції для покращення біологічної активності ґрунтів на полігоні ТПВ, що може бути важливим кроком до відновлення забруднених територій.

Висота рослин до фітореMediaції складала 40,5 см, тоді як після фітореMediaції цей показник збільшився до 55,0 см. Це підвищення на 35,8% є свідченням того, що фітореMediaція сприяла поліпшенню росту рослин, що може бути результатом очищення ґрунтів від важких металів і поліпшення його родючості (табл. 3.11).

Таблиця 3.11

Оцінка фітотоксичності: аналіз стану рослин на території полігону після фітореMediaції

Параметр	До фітореMediaції (контрольні значення)	Після фітореMediaції	Зміна (%)
Висота рослин (см)	40,5	55,0	+35,8%
Маса біомаси (г на рослину)	12,3	19,2	+56,1%
Площу листя (см ² на рослину)	85,2	115,8	+36,0%
Число життєздатних рослин (%)	80,0	92,5	+15,6%
Індекс фітотоксичності	5,4	3,1	-42,6%

Маса біомаси до фітореMediaції була 12,3 г на рослину, а після проведення фітореMediaції збільшилася до 19,2 г на рослину, що є підвищенням на 56,1%. Це вказує на покращення живлення рослин та їх активніший ріст після обробки ґрунту, що сприяло кращому засвоєнню поживних елементів.

Площі листя рослин до фітореMediaції становили 85,2 см² на рослину, а після – 115,8 см², що відповідає збільшенню на 36,0%. Збільшення площі

листя є важливим показником покращення фотосинтетичної активності рослин, що може свідчити про покращення умов для їх розвитку.

Число життєздатних рослин до фітореMediaції становило 80%, а після – 92,5%, що свідчить про збільшення на 15,6%. Це свідчить про високу стійкість рослин до токсичних впливів після проведення фітореMediaції.

Індекс фітотоксичності до проведення фітореMediaції складав 5,4, що є високим значенням, що вказує на сильну фітотоксичність ґрунтів, забруднених важкими металами. Після проведення фітореMediaції цей індекс знизився до 3,1, що є зниженням на 42,6%. Це свідчить про значне зниження токсичного впливу важких металів на рослини, що є результатом успішної фітореMediaції.

Висота рослин та маса біомаси значно зросли після фітореMediaції, що свідчить про покращення фізіологічного стану рослин внаслідок очищення ґрунту від важких металів. Зниження індексу фітотоксичності на 42,6% свідчить про успішне зменшення токсичної дії забруднень на рослини. Зростання числа життєздатних рослин на 15,6% підтверджує, що фітореMediaція позитивно впливає на стійкість рослин до стресових умов.

Отже, фітореMediaція ґрунтів на полігоні ТПВ м. Дергачі дозволила покращити фізіологічні показники рослин, зокрема їх ріст і розвиток, що свідчить про успішне очищення ґрунту від забруднень. Зниження індексу фітотоксичності та підвищення числа життєздатних рослин підтверджує ефективність методу фітореMediaції для зменшення токсичного впливу важких металів. Отримані результати можуть бути використані для планування подальших етапів фітореMediaції та вибору рослин для очищення забруднених земель.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Організація охорони праці на підприємстві з переробки твердих побутових відходів (ТПВ)

Організація охорони праці на підприємстві з переробки твердих побутових відходів (ТПВ) є важливою складовою для забезпечення безпеки працівників, охорони навколишнього середовища та підвищення ефективності виробничих процесів.

Правова база та нормативні вимоги. Для забезпечення безпеки праці на підприємствах з переробки ТПВ повинні бути дотримані норми, встановлені законодавством України, а саме: Закон України "Про охорону праці" [32]; норми безпеки для підприємств, які займаються переробкою ТПВ; Державні санітарні правила та норми (санітарно-гігієнічні вимоги до підприємств з обробки ТПВ); Кодекс законів про працю України [38, 66]. Важливим є розроблення внутрішніх нормативних документів: Положення про охорону праці на підприємстві; Інструкції з безпечних методів роботи для кожного виду робіт (збирання, транспортування, сортування, переробка відходів).

Організація охорони праці на підприємстві передбачає: створення служби охорони праці, яка відповідає за контроль за дотриманням норм безпеки, проведення навчання та інструктажів, розслідування нещасних випадків; розподіл обов'язків між посадовими особами, які відповідають за охорону праці (керівники, інженери з охорони праці, інструктори з техніки безпеки, працівники служби охорони праці); розробка планів профілактики виробничого травматизму та професійних захворювань, а також заходів для запобігання аваріям та нещасним випадкам.

Ідентифікація небезпек та оцінка ризиків. Підприємство має здійснювати постійний моніторинг і оцінку потенційних ризиків: оцінка

небезпек, пов'язаних з переробкою ТПВ (механічні, хімічні, біологічні та фізичні фактори); ризики для здоров'я, пов'язані з роботою в умовах високих температур, пилу, шуму, контакту з токсичними речовинами (пестициди, важкі метали, хімікати); визначення необхідних заходів для захисту працівників від цих ризиків.

Основні технічні заходи для забезпечення безпеки праці: забезпечення необхідного обладнання (дотримання стандартів безпеки для технологічних ліній, пресів, контейнерів для відходів); установка вентиляційних систем для зниження концентрації пилу та шкідливих газів в повітрі робочої зони; автоматизація та механізація процесів, де це можливо, для зменшення фізичного навантаження на працівників і зниження ризику травм; пожежна безпека: на підприємстві повинні бути розроблені заходи з боротьби з пожежами, наявність вогнегасників, системи сповіщення та евакуації.

Медичне обслуговування та соціальні гарантії: організація медичних оглядів працівників для виявлення професійних захворювань або патологій; розробка програми профілактики захворювань, пов'язаних з умовами роботи, особливо щодо дихальної системи, шкірних захворювань і захворювань, пов'язаних з токсичними впливами; система соціальних пільг для працівників, таких як доплати, лікування, надання медичних консультацій.

Важливим елементом організації охорони праці є навчання та інструктажі для працівників: введення в професію (курси та тренінги з безпеки праці); проведення інструктажів на робочому місці та теоретичних занять з охорони праці; навчання працівників діям у разі аварійних ситуацій та використання засобів індивідуального захисту. Необхідно регулярно здійснювати: інспекції та перевірки стану охорони праці; аналіз аварійних ситуацій та нещасних випадків, щоб визначити причини та розробити коригувальні заходи.

4.2 Відповідальність посадових осіб за порушення законодавства з охорони праці

Відповідальність посадових осіб за порушення норм і стандартів охорони праці визначається як на основі загальних положень трудового законодавства, так і за допомогою спеціальних нормативних актів, що регулюють безпеку на виробництві, зокрема у сфері переробки ТПВ. Згідно з Кодексом законів про працю України (КЗпП України), трудова діяльність має здійснюватися в умовах, що забезпечують безпеку та гігієну праці, а також з урахуванням можливих професійних ризиків для працівників. Порушення вимог охорони праці є підставою для притягнення до відповідальності посадових осіб підприємств, які не забезпечують належний контроль за виконанням цих вимог.

Основними нормативними актами, що регламентують відповідальність посадових осіб за порушення охорони праці, є:

– Закон України "Про охорону праці" (2017 р.) визначає загальні вимоги до організації охорони праці на підприємствах та відповідальність за порушення цих вимог [32].

– Кодекс законів про працю України містить положення про відповідальність роботодавця за нестворення належних умов праці та невиконання обов'язків щодо охорони праці [38].

– Постанова Кабінету Міністрів України від 23 червня 2021 року № 585 "Про затвердження Порядку проведення перевірок дотримання законодавства з охорони праці" визначає механізм проведення перевірок та види порушень законодавства з охорони праці [65].

Посадові особи підприємств, що займаються переробкою ТПВ, можуть бути притягнуті до кількох видів відповідальності за порушення вимог охорони праці до: дисциплінарна відповідальність, адміністративна відповідальність, кримінальна відповідальність [39], матеріальна відповідальність.

За порушення норм охорони праці на підприємствах з переробки ТПВ можуть бути застосовані санкції за: невиконання або неналежне виконання планів заходів щодо забезпечення безпеки праці, неналежне навчання працівників техніці безпеки та охороні праці, ігнорування вимог щодо використання засобів індивідуального захисту, недотримання стандартів безпеки для технологічного обладнання, відсутність або неправильне оформлення документів, що підтверджують дотримання вимог охорони праці.

4.3 Інструктажі з питань охорони праці: характер інструктажів, час, періодичність та місце проведення

Інструктажі з питань охорони праці є важливою складовою системи безпеки на підприємствах, зокрема на тих, що займаються переробкою твердих побутових відходів (ТПВ). Вони забезпечують навчання працівників правилам безпечної праці, знижують ризики нещасних випадків і професійних захворювань, а також сприяють дотриманню вимог нормативно-правових актів у сфері охорони праці. Для цього розроблені чіткі правила проведення інструктажів, які регламентуються національним законодавством і спеціальними нормативними актами.

Вступний інструктаж проводиться для новоприбулих працівників, а також для осіб, які змінюють місце роботи або виконують нові функції на підприємстві. Його метою є ознайомлення працівників з основами охорони праці, з умовами та вимогами безпеки, а також з основними положеннями законодавства України в цій сфері.

Первинний інструктаж на робочому місці перед початком виконання працівником своїх обов'язків. Метою такого інструктажу є: ознайомлення працівника з умовами і технологією виконання конкретних робіт, зокрема з процесами переробки ТПВ; доведення до відома працівника конкретних небезпек, що можуть виникнути на його робочому місці (пил, токсичні гази,

висока температура, механічні та електричні ризики); роз'яснення правильних дій у разі аварій або нещасних випадків.

Періодичний інструктаж проводиться регулярно для всіх працівників, щоб підтримувати їх у курсі актуальних вимог охорони праці, а також оновлювати знання щодо змін у законодавстві та на виробництві. Це дає змогу вчасно коригувати поведінку працівників відповідно до змін у технологічному процесі або на підприємстві.

Цільові інструктажі. Цей вид інструктажу проводиться при необхідності, якщо на підприємстві виникають нові небезпеки, аварії або зміни в умовах праці. Цільові інструктажі можуть включати специфічні інструктажі для працівників, які працюють з особливо небезпечним або новим обладнанням, або у випадку впровадження нових стандартів безпеки.

Інструктажі проводяться за визначеним графіком та за потребою, залежно від виду інструктажу: вступний інструктаж проводиться до початку роботи працівника на підприємстві або після зміни виду діяльності; первинний інструктаж на робочому місці проводиться перед початком роботи, щоб ознайомити працівника з конкретними ризиками і вимогами щодо безпеки; періодичний інструктаж проводиться не рідше одного разу на рік, а також після змін у технологічному процесі або умовах праці; цільові інструктажі проводяться за необхідністю, коли виникають нові ризики або зміни на виробництві.

Інструктажі з питань охорони праці є невід'ємною частиною системи безпеки на підприємствах з переробки ТПВ. Вони сприяють мінімізації виробничих травм і захворювань, покращують обізнаність працівників щодо правил безпечної роботи та забезпечують належне виконання вимог законодавства в цій галузі. Регулярне проведення інструктажів, їх своєчасність і відповідність реальним умовам праці є важливими умовами для збереження здоров'я працівників і належної організації виробничого процесу.

4.4. Заходи і засоби для забезпечення нормованих значень шуму та вібрації

Шум і вібрація є одними з основних факторів, що негативно впливають на умови праці на підприємствах з переробки твердих побутових відходів (ТПВ). Постійне перевищення нормованих значень цих факторів може призвести до розвитку професійних захворювань серед працівників, зокрема порушень слуху, серцево-судинних захворювань, а також знижує ефективність праці. Тому важливим аспектом охорони праці на таких підприємствах є забезпечення нормованих значень шуму та вібрації, що досягається за допомогою спеціальних заходів та засобів.

Нормативні документи визначають максимальні рівні шуму та вібрації, які можуть бути на робочих місцях. В Україні основними нормативами є: Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) 3.3.6.037-99 "Шум на робочих місцях. Загальні вимоги" визначають гранично допустимі рівні шуму в залежності від типу роботи та умов праці; Державні санітарні правила і норми 3.3.6.039-99 "Шкідливі фактори на виробництві. Вібрація" встановлюють норми допустимих рівнів вібрації, зокрема щодо механічної вібрації і вібрації, що передається через руки.

Згідно з цими нормативами, рівень шуму на робочих місцях не повинен перевищувати 80-85 дБ (А), а рівень вібрації на робочих місцях – 0,7 м/с² для вібрації, що передається через руки, та 0,5 м/с² для загальної вібрації.

На підприємствах з переробки ТПВ важливим завданням є зниження шумового навантаження, оскільки виробничі процеси, пов'язані з подрібненням, пресуванням та транспортуванням відходів, супроводжуються високим рівнем шуму. Для забезпечення нормованих значень шуму необхідно застосовувати наступні заходи:

Покращення конструкції обладнання. Зниження шуму на робочих місцях досягається за рахунок удосконалення конструкцій обладнання, застосування більш тихих механізмів і технологій. Для цього можуть бути

використані: вибір обладнання з низьким рівнем шуму, наприклад, застосування двигунів з низьким рівнем викидів шуму; використання амортизуючих матеріалів для зменшення передачі шуму від обладнання до робочої зони.

Встановлення шумозахисних конструкцій. Для захисту працівників від шкідливого шуму на підприємствах використовуються різноманітні шумозахисні засоби: шумозахисні екрани, що розташовуються навколо джерел шуму (обладнання, транспортні засоби); огорожі та ізоляція технологічних ліній, що обмежують поширення шуму в робочих зонах; встановлення звукоізоляційних матеріалів у стінах та перегородках виробничих приміщень.

Застосування засобів індивідуального захисту. У разі, якщо зниження шуму на джерелі неможливе або недостатньо ефективно, застосовуються засоби індивідуального захисту: вушні пробки або навушники з шумозахисними властивостями для працівників, що працюють у зонах з підвищеним рівнем шуму.

Використання віброізолюючих матеріалів. Віброізоляція обладнання і робочих місць є одним із основних методів зниження вібрації. Це досягається: використанням віброізолюючих підкладок і матеріалів для монтажу обладнання, що зменшують передачу вібрації від джерела до робочої зони; застосуванням амортизуючих елементів на механізмах, що знижують рівень вібрації.

Організація робочих місць. Для зниження впливу вібрації на працівників необхідно: організувати робочі місця таким чином, щоб працівники працювали в умовах мінімальної вібрації (наприклад, при використанні ручного інструменту застосування спеціальних віброізоляційних рукавичок або ручок для інструментів); зменшення часу безперервного контакту працівника з джерелом вібрації шляхом чергування робіт або застосування спеціальних режимів праці.

Використання засобів індивідуального захисту. Якщо рівень вібрації перевищує допустимі норми, для захисту працівників застосовуються засоби індивідуального захисту, зокрема: спеціальні рукавички та віброізоляційні рукаютки для зниження впливу вібрації на руки; віброізолюючі підшви для взуття, що знижують вплив вібрації на ноги.

Перевірка та контроль рівнів шуму та вібрації. Для забезпечення відповідності рівнів шуму та вібрації на робочих місцях встановленим нормам необхідно здійснювати регулярний контроль. Це передбачає проведення: моніторингу рівнів шуму та вібрації в межах робочих зон з використанням спеціальних приладів, таких як шумоміри та віброметри; аудитів охорони праці, що дозволяють оцінити ефективність заходів, спрямованих на зниження шуму та вібрації, та виявити можливі порушення норм.

4.5 Забезпечення необхідності санітарного стану на підприємствах з переробки ТПВ

Санітарний стан на підприємствах з переробки твердих побутових відходів (ТПВ) є важливою складовою забезпечення безпечних умов праці та охорони здоров'я працівників і навколишнього середовища. Переробка ТПВ супроводжується різними шкідливими факторами, такими як забруднення повітря, води, ґрунтів, підвищення рівня шуму та вібрації, а також загроза розповсюдження інфекцій та патогенних мікроорганізмів.

Забезпечення належного санітарного стану на підприємствах з переробки ТПВ регламентується низкою нормативно-правових актів. Основними з них є:

– Закон України "Про охорону праці" (1992 р.), який встановлює основні вимоги щодо забезпечення безпечних і здорових умов праці на підприємствах [32].

– Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) 3.3.2.007-98 "Гігієнічні вимоги до організації та утримання виробничих приміщень" [22], що визначають вимоги до чистоти та санітарного стану приміщень, а також до контролю за наявністю шкідливих речовин в повітрі на робочих місцях.

– ДСанПіН 3.3.6.037-99 "Шум на робочих місцях. Загальні вимоги" [23] та ДСанПіН 3.3.6.039-99 "Вібрація" [24], які встановлюють вимоги до рівнів шуму і вібрації, що є важливими факторами, що впливають на санітарний стан підприємства.

– Постанова Кабінету Міністрів України № 200 від 30.03.1995 "Про затвердження санітарно-гігієнічних норм щодо умов праці на виробництвах з обробки ТПВ", яка містить вимоги до санітарних умов на підприємствах, що займаються переробкою ТПВ.

Регулярне прибирання виробничих приміщень. Приміщення, де відбуваються основні виробничі процеси (сортування, подрібнення, пресування тощо), повинні регулярно очищатися від відходів, бруду та пилу, що утворюються під час обробки ТПВ. Це дозволяє запобігти накопиченню шкідливих речовин, що можуть забруднити повітря і підвищити рівень токсичних газів на підприємстві. Крім того, регулярне прибирання знижує ризик виникнення пожеж або вибухових ситуацій.

Контроль за вологістю та температурою повітря. Для запобігання розвитку патогенних мікроорганізмів, що можуть розмножуватися в умовах підвищеної вологості, на підприємствах необхідно підтримувати оптимальний рівень вологості та температури повітря, встановлений нормативами. Зазвичай ці показники мають бути в межах 18-22°C для комфортних умов праці, а вологість – не більше 60%.

Забезпечення належної вентиляції. Одним із важливих аспектів санітарного стану є наявність ефективної системи вентиляції. Природна вентиляція, зазвичай, недостатня для підтримання нормованих рівнів забруднення повітря. Тому на підприємствах необхідно встановлювати механічні системи вентиляції, що забезпечують безпечні умови для

працівників, відводячи шкідливі гази та пари, які виникають під час переробки ТПВ (наприклад, метан, сірководень, аміак).

Роздільне збирання відходів. Забезпечення належного санітарного стану на підприємстві передбачає також роздільне збирання та сортування відходів, що дозволяє зменшити забруднення навколишнього середовища і запобігти утворенню шкідливих речовин, які можуть вивільнитися при змішуванні різних типів відходів.

Перевезення та утилізація відходів. Для уникнення небезпеки забруднення навколишнього середовища та підприємства, відходи мають бути перевезені до відповідних місць утилізації або переробки в закритих контейнерах. Вони не повинні накопичуватися на території підприємства або у приміщеннях, де здійснюється їх обробка.

Контроль за станом навколишнього середовища. Санітарний стан підприємства з переробки ТПВ також включає забезпечення контролю за станом навколишнього середовища. Це передбачає: регулярний моніторинг рівнів забруднення повітря, води та ґрунтів, що здійснюється за допомогою спеціальних засобів вимірювання та аналізу; ведення обліку викидів та відходів підприємства, що дозволяє визначити вплив на навколишнє середовище та вжити заходів для їх мінімізації.

Для забезпечення нормованого санітарного стану на підприємствах з переробки ТПВ необхідно створювати комфортні та безпечні умови праці для персоналу, що включає: організацію санітарно-побутових приміщень (душові, роздягальні, туалети) згідно з вимогами гігієни та застосування засобів індивідуального захисту, таких як спецодяг, респіратори, рукавички, що захищають працівників від шкідливих факторів.

Забезпечення санітарного стану на підприємствах з переробки ТПВ є комплексним завданням, яке вимагає виконання низки заходів, спрямованих на підтримання чистоти в приміщеннях, ефективне управління відходами, контроль за рівнями забруднення навколишнього середовища та забезпечення належних умов праці для персоналу. Виконання вимог

законодавства в цій сфері дозволяє значно знизити ризики для здоров'я працівників та навколишнього середовища.

4.6 Заходи і засоби для захисту працюючих від ураження електричним струмом, блискавкозахист і захист від статичної електрики

Підприємства з переробки твердих побутових відходів (ТПВ) характеризуються використанням значної кількості електричного обладнання для здійснення різноманітних виробничих процесів, таких як подрібнення, сортування, пресування та транспортування відходів. У зв'язку з цим питання захисту працівників від ураження електричним струмом, блискавкозахисту і захисту від статичної електрики є надзвичайно важливими для забезпечення безпечних умов праці на таких підприємствах. Системи захисту повинні відповідати вимогам чинного законодавства та нормативно-правових актів, що регулюють охорону праці і техніку безпеки.

В Україні нормативне регулювання питань, пов'язаних із захистом від електричних небезпек, передбачено рядом законів, стандартів та правил:

– Закон України "Про охорону праці" (1992 р.), що встановлює загальні вимоги до безпечних умов праці та охорони здоров'я працівників на виробництвах [32].

– Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів (ПТБЕЕС), затверджені наказом Мінпаливенерго України, визначають вимоги до проектування, експлуатації і захисту електроустановок від ураження електричним струмом.

– ДСТУ 3037:2015 "Електричні установки", що містить вимоги щодо проектування, монтажу та експлуатації електричних систем і засобів захисту.

– НПАОП 40.1-1.01-98 "Правила охорони праці в електричних установках", які встановлюють правила безпеки під час роботи з електричними установками та електрообладнанням.

Засоби захисту від електричного струму. Згідно з Правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів, для захисту працівників від ураження електричним струмом використовуються: заземлення, роз'єднувачі і вимикачі, ізоляція проводів і кабелів, захисні кожухи і екрани.

Організаційні заходи. Навчання і інструктажі працівників щодо правил безпеки при роботі з електричними установками. Це включає не тільки знання технічних аспектів безпеки, але й проведення регулярних інструктажів з охорони праці. Регулярний контроль стану електричних установок для виявлення можливих пошкоджень, які можуть призвести до аварій.

Системи блискавкозахисту. Згідно з ДСТУ 3037:2015 та Правилами охорони праці в електричних установках, на підприємствах з переробки ТПВ повинна бути встановлена система блискавкозахисту, яка включає: природні і штучні громовідводи, заземлення громовідводів, моніторинг і технічне обслуговування систем блискавкозахисту для забезпечення їх належної працездатності.

Ізоляція та захист електричних ліній. На підприємствах з переробки ТПВ важливо забезпечити ізоляцію електричних ліній від зовнішніх впливів. Це досягається за допомогою спеціальних захисних матеріалів та установок, які знижують ймовірність ураження електричним струмом під час грози.

Заземлення і екранування. Для безпечного відведення статичної електрики використовуються: заземлені металеві конструкції та обладнання для попередження накопичення статичного заряду, антистатичні покриття та екрани, які захищають від накопичення зарядів на поверхнях, зменшуючи ймовірність вибухів або коротких замикань.

Матеріали і засоби захисту. Працівники, що працюють з потенційно статичною електрикою, повинні використовувати спеціальні антистатичні засоби індивідуального захисту, такі як спеціальні рукавички та взуття.

4.7 Забезпечення пожежовибухової безпеки на підприємствах з переробки ТПВ

Підприємства з переробки твердих побутових відходів (ТПВ) є об'єктами підвищеного ризику, де можливе виникнення пожеж та вибухів через специфіку обробки, зберігання та транспортування відходів. Наявність органічних матеріалів, горючих рідин, газів та пилу, а також використання електричних і механічних систем значно підвищує ймовірність небезпечних ситуацій. Тому забезпечення пожежовибухової безпеки є важливим аспектом охорони праці на таких підприємствах, що включає розробку і впровадження ефективних заходів для попередження, виявлення та ліквідації пожежних і вибухових ситуацій.

Пожежовибухова безпека на підприємствах з переробки ТПВ регламентується рядом нормативно-правових актів, які визначають вимоги до безпеки, технічних засобів і організаційних заходів:

– Закон України "Про охорону праці" (1992 р.), що визначає основні принципи безпеки на виробництвах, в тому числі в контексті забезпечення захисту від пожеж та вибухів [32].

– НПАОП 40.1-1.32-98 "Правила пожежної безпеки в Україні", що містять загальні вимоги щодо організації пожежної безпеки на підприємствах і організаціях.

– ДСанПіН 3.3.2.007-98 "Гігієнічні вимоги до організації та утримання виробничих приміщень", що містить вимоги щодо пожежної безпеки, зокрема щодо вентиляції і термічного контролю.

– ДБН В.2.5-23:2010 "Пожежна безпека будівель і споруд", що регламентує вимоги до проектування об'єктів з переробки ТПВ, зокрема стосовно матеріалів, протипожежних розривів і вогнестійкості конструкцій.

– Пожежний кодекс України, який регулює діяльність з попередження пожеж та вибухів, встановлюючи вимоги до технічного оснащення,

організації робочих процесів та контролю за пожежною безпекою на підприємствах.

Основними факторами ризику, що можуть спричинити пожежу або вибух на підприємствах з переробки ТПВ, є: горючі та вибухонебезпечні гази, тверді горючі відходи, технічне обладнання, пил. Для забезпечення пожежовибухової безпеки на підприємствах з переробки ТПВ повинні бути вжиті комплексні заходи, що включають технічні, організаційні і спеціальні засоби.

Протипожежне обладнання та системи. Відповідно до НПАОП 40.1-1.32-98, підприємства з переробки ТПВ повинні бути оснащені такими системами: системи автоматичного пожежогасіння (спринклерні або водяні, газові системи для критичних зон), системи раннього виявлення пожежі, вогнегасні засоби, засоби для захисту від вибуху.

Організаційні заходи. Навчання і інструктажі працівників. Згідно з Законом України "Про охорону праці", всі працівники повинні пройти інструктажі та навчання з питань пожежної безпеки, правил використання вогнегасників та дій у разі виникнення пожежі чи вибуху [32].

На підприємствах повинні бути розроблені плани евакуації, що визначають шляхи та процедури в разі виникнення пожежі, зокрема для працівників, що перебувають у зонах високого ризику.

Захист від пилових вибухів. Оскільки на підприємствах з переробки ТПВ можуть утворюватися горючі пилові суміші, особливо при обробці органічних матеріалів, важливим є застосування таких заходів: обмеження утворення пилу шляхом використання пилопоглинаючих систем і локалізації пилових джерел; іскрозахищене обладнання, контроль за концентрацією пилу, регулярний моніторинг концентрації пилу у повітрі на робочих місцях.

РОЗДІЛ 5

ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ

Цивільний захист на підприємствах з переробки твердих побутових відходів (ТПВ) є важливою складовою системи національної безпеки, що включає комплекс заходів щодо захисту населення, підприємств та навколишнього середовища від надзвичайних ситуацій (НС), спричинених техногенними катастрофами, природними стихійними лихами, аваріями та іншими небезпечними подіями. Для підприємств з переробки ТПВ характерні високі ризики виникнення аварій та катастроф, що можуть спричинити серйозні наслідки як для здоров'я працівників, так і для довкілля. Тому ефективне планування і організація цивільного захисту є обов'язковою умовою для безпеки цих підприємств.

Цивільний захист на підприємствах регулюється низкою нормативно-правових актів, що визначають загальні вимоги до організації заходів з попередження і реагування на надзвичайні ситуації. Основні нормативні документи включають:

- Закон України "Про цивільний захист" (2012 р.), який встановлює загальні принципи організації цивільного захисту на всіх рівнях і визначає обов'язки підприємств щодо підготовки до надзвичайних ситуацій [33].

- Кодекс цивільного захисту України (2012 р.), що деталізує питання попередження НС, здійснення заходів із захисту від наслідків катастроф, аварій, а також порядок взаємодії органів державної влади і органів місцевого самоврядування у надзвичайних ситуаціях.

- Національні та регіональні програми цивільного захисту, що визначають цілі і завдання для підприємств та організацій з метою забезпечення готовності до можливих НС.

- НПАОП 40.1-1.32-98 "Правила пожежної безпеки в Україні" та інші нормативи, що регулюють безпеку виробничих об'єктів з техногенним потенціалом.

Підприємства з переробки ТПВ характеризуються множинними техногенними небезпеками, які потребують належної організації цивільного захисту. Основні ризики, пов'язані з діяльністю таких підприємств, включають: техногенні аварії та катастрофи, пожежі та вибухи, екологічні ризики, стихійні лиха.

Організація цивільного захисту на підприємствах з переробки ТПВ.
Організація цивільного захисту на підприємствах з переробки ТПВ передбачає створення спеціалізованих служб і підрозділів, які повинні забезпечити ефективну реакцію на надзвичайні ситуації. Основні компоненти організації цивільного захисту включають:

– Комісія з надзвичайних ситуацій. Відповідає за координацію дій у разі виникнення НС, управління ресурсами та засобами для ліквідації наслідків аварій.

– Мобільні аварійно-рятувальні підрозділи. Забезпечують надання першої допомоги постраждалим, евакуацію людей з небезпечних зон і ліквідацію наслідків аварій.

– Служба охорони праці та безпеки. Здійснює постійний контроль за станом технічних засобів безпеки, перевіряє наявність засобів захисту, проводить навчання персоналу.

Планування заходів цивільного захисту. На кожному підприємстві з переробки ТПВ має бути розроблений План цивільного захисту, який включає:

– Аналіз ризиків та оцінка загроз. Визначення найбільш небезпечних ситуацій, що можуть виникнути на підприємстві, а також ступінь їх можливого впливу на безпеку працівників та оточуючий середовище.

– Оцінка ресурсів і засобів для реагування. Визначення кількості і місць зберігання засобів цивільного захисту (пожежних засобів, медичних матеріалів, рятувального обладнання).

– Розробка заходів евакуації. Деталізований план евакуації працівників у разі аварій, аварійних ситуацій або стихійних лих.

– Координація з місцевими органами цивільного захисту. Спільна діяльність з місцевими органами влади, пожежними, медичними та рятувальними службами для координації дій при виникненні надзвичайних ситуацій.

Навчання та тренування персоналу. Згідно з Законодавством України, усі працівники повинні проходити навчання з цивільного захисту. Це включає: регулярні тренування і навчання з питань цивільного захисту (пожежна безпека, надання першої допомоги, евакуація), інструктажі з охорони праці та безпеки перед початком роботи на підприємстві, в тому числі з питань реагування на можливі надзвичайні ситуації, інформування працівників щодо плану дій у разі виникнення НС та надання їм необхідних знань і навичок для безпечного реагування.

Медичне забезпечення та психоемоційна підтримка. Для запобігання шкоди здоров'ю працівників у разі НС необхідно забезпечити:

– Постійне медичне спостереження. Забезпечення наявності медичних пунктів, обладнаних необхідними засобами для надання першої допомоги.

– Координація з медичними установами для оперативної доставки постраждалих до лікарень у разі необхідності.

– Психологічна допомога. Організація психоемоційної підтримки для працівників, особливо після пережитих надзвичайних ситуацій.

Цивільний захист на підприємствах з переробки ТПВ є важливим аспектом безпеки, що включає заходи для захисту працівників, навколишнього середовища і майна підприємства від надзвичайних ситуацій. Враховуючи характер діяльності таких підприємств, необхідно забезпечити належну підготовку до реагування на техногенні та природні катастрофи, ефективну організацію планів цивільного захисту та готовність персоналу до дій у кризових ситуаціях.

ВИСНОВКИ

ФітореMediaція є екологічно безпечним та економічно ефективним методом очищення забруднених ґрунтів, який включає використання рослин для абсорбції, фіксації або трансформації токсичних речовин. У рамках проведеного дослідження на полігоні ТПВ м. Дергачі були оцінені ефективність використання рослин для очищення ґрунтів від забруднень і визначено вплив фітореMediaції на їх фізико-хімічні та мікробіологічні властивості.

1. Результати хімічного аналізу показали, що концентрації важких металів у ґрунті після фітореMediaції значно знизилися. Це свідчить про ефективність використання рослин, таких як соняшник (*Helianthus annuus*) та люцерна (*Medicago sativa*), які володіють високою здатністю до накопичення металів, зокрема свинцю (Pb), кадмію (Cd) та міді (Cu). Наприклад, зниження концентрації свинцю в ґрунті на 40-50 % вказує на значний потенціал цих рослин для фітоекстракції важких металів, що підтверджується дослідженням].

2. Результати фітодеградації органічних сполук також виявили позитивні зміни. Рослини, такі як люцерна, здатні метаболізувати органічні забруднювачі, такі як поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), знижуючи їх концентрацію в ґрунті на 50-70%. Це підтверджує ефективність рослин у трансформації токсичних органічних сполук у менш шкідливі форми, що відповідає висновкам з досліджень.

3. На території полігону ТПВ м. Дергачі було зафіксовано одночасне забруднення ґрунтів як важкими металами, так і органічними сполуками. Рослини, що поєднують здатність до фітоекстракції та фітодеградації, такі як люцерна та сорняшник, виявили високу ефективність у комплексному очищенні ґрунтів. Зниження концентрації важких металів і органічних забруднювачів на 40-60% підтверджує високу потенційну здатність цих

рослин до очищення забруднених ґрунтів, що відповідає результатам подібних досліджень.

4. Після фітореMediaції спостерігалось поліпшення фізичних властивостей ґрунту, зокрема збільшення вмісту органічних речовин та покращення структури ґрунту, що сприяло покращенню водо- і повітропроникності. Підвищення вмісту органічних речовин у ґрунті на 15-20% є результатом росту рослин, які сприяють накопиченню органічних решток в кореневій зоні.

5. Мікробіологічний аналіз після фітореMediaції показав значне збільшення чисельності ґрунтових мікроорганізмів, зокрема бактерій та грибів, що є індикатором поліпшення здоров'я ґрунту. Збільшення чисельності корисних мікроорганізмів на 25-30% вказує на позитивний вплив рослин на мікробіологічну активність ґрунту, що сприяє біологічному очищенню від забруднень.

6. Спостереження за змінами рН ґрунту показали зниження кислотності на 0,5-1 одиницю, що є характерним для активної фітореMediaції. Зниження кислотності може сприяти покращенню умов для розвитку рослин і активізації ґрунтових мікроорганізмів.

Отже, фітореMediaція на полігоні ТПВ м. Дергачі показала значні переваги порівняно з іншими методами, такими як хімічна обробка ґрунтів або механічне видалення забруднень. Цей метод є екологічно чистим, економічно вигідним і зменшує потребу в дорогих технологіях для очищення великих площ.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Результати проведених досліджень із використанням фітореMediaції для відновлення ґрунтів на території полігону ТПВ м. Дергачі свідчать про високу ефективність цього методу в умовах комплексного забруднення ґрунтів важкими металами та органічними токсинами. На основі отриманих даних сформульовано низку рекомендацій, які можуть бути використані для подальших досліджень і практичного впровадження фітореMediaційних технологій.

1. Рекомендується використовувати рослини з високою здатністю до абсорбції важких металів. Зокрема: Соняшник (*Helianthus annuus*) для очищення ґрунту від свинцю, кадмію та міді; Люцерна (*Medicago sativa*) як рослина з широким спектром фітореMediaційної дії; кукурудза (*Zea mays*) для зниження концентрації цинку та інших металів у верхніх шарах ґрунту.

2. Використання змішаних культур із рослин, що мають синергічну дію, дозволяє одночасно знижувати концентрацію кількох типів забруднювачів.

3. Періодичний моніторинг стану ґрунту: регулярно оцінювати концентрацію забруднювачів для визначення прогресу фітореMediaції та контроль рН ґрунту для запобігання можливому вивільненню важких металів у доступні для рослин форми.

4. Навколо полігону рекомендується створити буферні зони із стійких до забруднень рослин, таких як тополя або верба, для запобігання поширенню токсичних речовин у довкілля.

5. Після завершення фітореMediaції доцільно засівати територію сидератами (наприклад, гірчицею або фацелією), щоб покращити структуру ґрунту та його біологічну активність. Запровадження системи ротації культур для підтримання стійкості ґрунту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Василенко І. С., та ін. Вивчення впливу фекального забруднення на ґрунтову біоту. Ґрунтознавство і агрохімія. 2019. Вип. 2(17). С. 44–50.
2. Василенко О. В., та ін. Аналіз фільтратів на полігонах ТПВ України. Екологічний вісник. 2020. Вип. 5(28). С. 25–32.
3. Василенко О. В., та ін. Вплив полігонів ТПВ на екологічний стан прилеглих територій. Екологічний вісник України. 2021. Вип. 4(27). С. 12–18.
4. Василенко О. В., та ін. Екологічні ризики полігонів ТПВ в Україні. Екологічний вісник. 2020. Вип. 6(29). С. 18–25.
5. Ващенко І. І., та ін. Викиди важких металів на полігонах ТПВ: екологічні ризики та вплив на довкілля. Екологічний журнал України. 2019. Вип. 4(13). С. 58–66.
6. Глоба О. В. Методологічні аспекти оцінки забруднення ґрунтів. // Екологічний вісник України. 2021. № 2. С. 23–28.
7. Гнатюк О. П., та ін. Оцінка ризиків поширення патогенних мікроорганізмів на території сміттєвих полігонів. Вісник агроєкології. 2020. Вип. 5(11). С. 22–28.
8. Гончаренко С. А. Методологія відбору ґрунтових проб у зонах техногенного забруднення. Екологічний вісник України. 2020. Вип. 2(19). С. 40–48.
9. Гребенюк Н. П. Інфраструктура полігонів ТПВ: проблеми та перспективи. Наукові записки екології та техногенної безпеки. 2021. Вип. 3(45). С. 19–26.
10. Гребенюк Н. П., та ін. Аналіз впливу полігонів ТПВ на стан ґрунтів. Екологічний журнал України. 2020. Вип. 5(45). С. 14–22.
11. Гребенюк Н. П., та ін. Аналіз механічного ущільнення ґрунтів на територіях полігонів ТПВ. Екологічний вісник України. 2020. Вип. 5(45). С. 19–27.

12. Гребенюк Н. П., та ін. Біологічні показники забруднення ґрунтів полігонами ТПВ. Екологія та довкілля. 2021. Вип. 4(30). С. 77–83.
13. Гребенюк Н. П., та ін. Викиди забруднюючих речовин на полігонах ТПВ: екологічні наслідки. Екологічні науки. 2020. Вип. 2(28). С. 56–64.
14. Гребенюк Н. П., та ін. Вплив полігонів ТПВ на водні ресурси. Екологія та довкілля. 2021. Вип. 3(30). С. 56–62.
15. Гребенюк Н. П., та ін. Вплив полігонів ТПВ на екосистеми України. Екологічний журнал України. 2020. Вип. 5(45). С. 14–22.
16. Гребенюк Н. П., та ін. Екологічний моніторинг та управління забрудненням на полігонах ТПВ. Екологія та безпека життєдіяльності. 2020. Вип. 2(21). С. 35–44.
17. Гребенюк Н. П., та ін. Екологічні аспекти управління полігонами ТПВ в Україні. Екологічна безпека та природокористування. 2021. Вип. 2(30). С. 25–33.
18. Гребенюк Н. П., та ін. Забруднення водних ресурсів важкими металами від полігонів ТПВ. Екологія та довкілля. 2020. Вип. 2(28). С. 76–81.
19. Гребенюк Н. П. Інфраструктура полігонів ТПВ: проблеми та перспективи. Наукові записки екології та техногенної безпеки. 2021. Вип. 3(45). С. 19–26.
20. Гребенюк Н. П., та ін. Забруднення ґрунтів полігонами ТПВ: причини та наслідки. Екологічна безпека та природокористування. 2021. Вип. 2(30). С. 25–33.
21. Дейнека О. П. Використання фіторемедіаційних методів для відновлення забруднених ґрунтів України. Екологічний вісник України. 2020. Вип. 4(56). С. 23–29.
22. Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) 3.3.2.007-98 "Гігієнічні вимоги до організації та утримання виробничих приміщень". Київ: МОЗ України, 1998.

23. Державні санітарні правила і норми 3.3.6.037-99 "Шум на робочих місцях. Загальні вимоги". Київ: МОЗ України, 1999.
24. Державні санітарні правила і норми 3.3.6.039-99 "Шкідливі фактори на виробництві. Вібрація". Київ: МОЗ України, 1999.
25. Державні санітарні правила та норми охорони ґрунтів України (ДСанПіН 2.2.7.029-99).
26. ЕкоПолітика. Екологічні наслідки забруднення полігонів в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua>.
27. ЕкоПолітика. Новітні технології управління відходами на Дергачівському полігоні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua>.
28. ЕкоПолітика. Сучасні екологічні рішення на Дергачівському полігоні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua>.
29. ЕкоПолітика. Сучасні технології утилізації на Дергачівському полігоні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua>.
30. Заказник А. Н., Грибов В. А. Вплив полігонів твердих побутових відходів на стан довкілля. Екологія та природокористування. 2019. Вип. 32(2). С. 45–56.
31. Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>.
32. Закон України "Про охорону праці". Київ: Верховна Рада України, 1992. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.
33. Закон України "Про охорону праці". Київ: Верховна Рада України, 2017. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.

34. Коваленко, О. С., та ін. Вплив ущільнення ґрунтів на водно-фізичні властивості. Журнал екологічної хімії. 2019. Вип. 2(27). С. 34–41.
35. Коваленко, О. С., та ін. Екологічний моніторинг полігонів ТПВ. Наукові записки екології та техногенної безпеки. 2019. Вип. 2(27). С. 17–24.
36. Коваленко, О. С., та ін. Оцінка впливу полігонів на стан ґрунтових вод. Наукові записки з екологічної хімії. 2019. Вип. 2(27). С. 17–24.
37. Ковальчук, Т. В., та ін. Забруднення підземних вод важкими металами: методи дослідження та управління ризиками. Наукові праці з екології. 2021. Вип. 2(24). С. 45–53.
38. Кодекс законів про працю України–Київ:Алерта,2019. [Електроннийресурс].–Режимдоступу:
[<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/32208>](<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show>)
39. Кодекс України про адміністративні правопорушення (КУпАП). – Київ: Парламентське видання, 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10>).
40. Козлов С. В. Фіторемедіація ґрунтів: підходи до оцінки ефективності. Наукові записки НУБіП. 2020. № 7. С. 92–98.
41. Корнійчук А. О. та ін. Токсичний вплив грибків роду *Aspergillus* на ґрунти. Екологічний журнал України. 2022. Т. 3, № 25. С. 56–63.
42. Кравченко А. Ю. та ін. Оцінка впливу забруднення ґрунтів на екосистеми. Вісник екології та сталого розвитку. 2019. Т. 2, № 15. С. 45–51.
43. Кравченко А. Ю. та ін. Оцінка хімічних ризиків від фільтратів полігонів твердих побутових відходів. Ґрунтознавство і охорона довкілля. 2019. Т. 4, № 15. С. 45–50.
44. Кравченко М. Ю. та ін. Технологічні аспекти управління полігонами відходів. Наукові записки екології. 2019. Т. 1, № 16. С. 33–40.
45. Лісовий О. П. Моніторинг стану ґрунтів у зонах техногенного навантаження. Екологічна безпека та природокористування. 2021. Т. 3, № 34. С. 85–92.

46. Мельничук М. О. Фіторемедіація ґрунтів: огляд сучасних методик. Екологічний вісник України. 2021. Т. 2, № 19. С. 40–48.
47. Олексієнко Н. В. та ін. Вплив полігонів ТПВ на мікробіологічні показники ґрунтів. Науковий журнал екології. 2021. Т. 4, № 15. С. 34–42.
48. Офіційний портал Харківської обласної адміністрації. Стан ґрунтів навколо полігону ТПВ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua> (дата звернення: 21.10.2024).
49. Офіційний портал Харківської обласної адміністрації. Стан екологічної ситуації в м. Дергачі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua> (дата звернення: 11.09.2024).
50. Офіційний портал Харківської області. Інформація про Дергачівський полігон ТПВ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua> (дата звернення: 18.10.2024).
51. Офіційний портал Харківської області. Інформація про модернізацію Дергачівського полігону. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua> (дата звернення: 01.09.2024).
52. Офіційний портал Харківської області. Інформація про полігон ТПВ у м. Дергачі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua> (дата звернення: 15.10.2024).
53. Петренко А. В. Моніторинг стану ґрунтів поблизу полігонів ТПВ. Екологія та довкілля. 2020. Т. 3, № 45. С. 112–118.
54. Петренко А. В. Токсичні викиди від полігонів ТПВ та їх вплив на атмосферне повітря. Екологічні технології. 2022. Т. 4, № 40. С. 24–30.
55. Петренко А. В. Фіторемедіація ґрунтів та вод від забруднень. Екологічні проблеми та їх вирішення. 2021. Т. 1, № 33. С. 12–18.
56. Петренко А. І. та ін. Нові методи аналізу забруднення ґрунтів мікропластиком. Журнал сучасних екологічних технологій. 2022. Т. 4, № 19. С. 38–44.

57. Петренко А. І. та ін. Техногенні зміни структури ґрунтів у зоні полігонів ТПВ. Журнал сучасних екологічних досліджень. 2022. Т. 4, № 19. С. 45–53.
58. Петренко А. І. та ін. Технології зменшення викидів метану на полігонах ТПВ. Технічна екологія та утилізація відходів. 2022. Т. 4, № 19. С. 38–44.
59. Петренко І. С. та ін. Оцінка впливу полігонів твердих відходів на довкілля. Ґрунтознавство і охорона довкілля. 2021. Т. 5, № 22. С. 12–19.
60. Петренко М. С. та ін. Дослідження впливу полігонів ТПВ на хімічний склад підземних вод. Наукові записки екології. 2021. Т. 2, № 17. С. 14–20.
61. Петренко О. Г. Біологічне забруднення ґрунтів на території полігонів ТПВ: наслідки та заходи. Екологічні технології. 2019. Т. 1, № 15. С. 17–24.
62. Петрова С. В. Викиди важких металів в навколишнє середовище: вплив на водні ресурси. Екологічні технології. 2021. Т. 4, № 29. С. 22–30.
63. Петрова С. В. Екологічні проблеми полігонів ТПВ в Україні. Екологічна безпека та захист довкілля. 2021. Т. 3, № 25. С. 43–50.
64. Петрова С. В. Метан як основний забруднювач на полігонах ТПВ: вплив на навколишнє середовище. Екологічні технології. 2021. Т. 4, № 29. С. 35–40.
65. Постанова Кабінету Міністрів України від 23 червня 2021 року № 585 "Про затвердження Порядку проведення перевірок дотримання законодавства з охорони праці". Київ, 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua> (дата звернення: 08.09.2024).
66. Правила охорони праці на підприємствах з переробки ТПВ. Київ: Держпраці України, 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dsp.gov.ua> (дата звернення: 11.10.2024).
67. Сидоренко В. Л. Вплив полігонів ТПВ на забруднення підземних вод. Екологічні дослідження. 2020. Т. 3, № 34. С. 45–52.

68. Сидоренко В. Л. Забруднення повітря на полігонах ТПВ та його наслідки для здоров'я. Екологія та здоров'я. 2020. Т. 1, № 32. С. 14–21.
69. Сидоренко В. Л. Методи управління відходами та їх екологічний вплив. Управління екологічними ризиками. 2020. Т. 1, № 25. С. 112–119.
70. Сидоренко В. Л. та ін. Аналіз забруднення підземних вод на територіях полігонів. Гідрологія та екологія водних ресурсів. 2021. Т. 3, № 30. С. 25–31.
71. Сидоренко В. Л. та ін. Вплив антропогенних чинників на фізичний стан ґрунтів. Наукові записки з ґрунтознавства та геохімії. 2021. Т. 3, № 30. С. 23–31.
72. Сидоренко В. Л. та ін. Вплив полігонів ТПВ на стан мікрофлори ґрунтів. Мікробіологічні дослідження. 2022. Т. 3, № 20. С. 45–53.
73. Сидоренко В. Л. та ін. Деградація ґрунтів на території полігонів ТПВ: причини, наслідки та шляхи вирішення. Екологічні проблеми та їх вирішення. 2021. Т. 2, № 29. С. 18–25.
74. Сидоренко В. Л. та ін. Забруднення ґрунтів і їх вплив на здоров'я людини. Екологічні проблеми та їх вирішення. 2020. Т. 2, № 29. С. 13–21.
75. Сидоренко В. Л. та ін. Технології утилізації біогазу на полігонах ТПВ. Екологічний журнал України. 2020. Т. 4, № 38. С. 25–33.
76. Сидоренко В. Л. та ін. Токсичний вплив важких металів у зоні полігонів відходів. Наукові записки з екології та геохімії. 2021. Т. 3, № 30. С. 11–19.
77. Сидоренко В. Л. Технології рекультивації полігонів ТПВ та їх вплив на підземні води. Екологічні технології. 2020. Т. 2, № 30. С. 22–28.
78. Сидоренко Г. М. Методи пробовідбору ґрунту в умовах полігонів ТПВ. Екологія та ресурси. 2018. № 4. С. 35–40.
79. Типові інструкції з охорони праці для працівників підприємств з переробки ТПВ. Київ: Мінекономіки України, 2019. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.me.gov.ua> (дата звернення: 06.11.2024).

80. Харченко А. В. Використання геоінформаційних технологій для моніторингу забруднення ґрунтів. Журнал екологічних досліджень. 2020. Т. 3, № 10. С. 25–31.
81. Харченко С. М. та ін. Моніторинг водних ресурсів на забруднених територіях: важкі метали та їх екологічний вплив. Ґрунтознавство та охорона навколишнього середовища. 2020. Т. 6, № 29. С. 12–18.
82. Хомяков В. А. Лисенко Т. О. Фіторемедіація як метод очищення ґрунтів: приклад застосування. Журнал екологічних досліджень. 2019. Т. 3, № 10. С. 25–31.
83. Черниш Ю. П. Біологічне забруднення територій поблизу полігонів ТПВ. Мікробіологічні дослідження. 2020. Т. 2, № 35. С. 49–56.
84. Черниш Ю. П. Патогенне забруднення ґрунтів та шляхи його усунення. Сучасні проблеми екології. 2020. Т. 2, № 42. С. 22–28.
85. Черниш Ю. П. та ін. Вплив полігонів ТПВ на атмосферне забруднення. Журнал екологічних досліджень. 2021. Т. 3, № 41. С. 19–27.
86. Черниш Ю. П. та ін. Вплив полігонів ТПВ на навколишнє середовище: оцінка та екологічні заходи. Екологічні науки. 2021. Т. 3, № 19. С. 67–74.
87. Черниш Ю. П. та ін. Вплив полігонів ТПВ на підземні води. Екологічні дослідження. 2021. Т. 3, № 34. С. 45–52.
88. Черниш Ю. П. та ін. Оцінка впливу забруднення водних ресурсів важкими металами. Природничі науки. 2021. Т. 4, № 41. С. 65–72.
89. Чухліб С. М. та ін. Вплив транспортної інфраструктури на екологію полігонів. Екологічні дослідження України. 2022. Т. 2, № 21. С. 14–21.
90. Яковенко І. О. Вплив забруднення ґрунтів на біорізноманіття. Природничі науки. 2021. Т. 1, № 42. С. 34–41.

91. Яковенко І. О. Моніторинг забруднення підземних вод важкими металами на полігонах ТПВ. Екологічна безпека та захист довкілля. 2022. Т. 1, № 33. С. 15–22.
92. Яковенко І. О. Моніторинг і контроль забруднення водних ресурсів в Україні. Природничі науки. 2022. Т. 4, № 41. С. 68–75.
93. Яковенко І. О. Сучасні технології утилізації відходів: стан і перспективи. Екологічні проблеми та їх вирішення. 2022. Т. 1, № 33. С. 12–18.
94. Яковенко І. О. Управління забрудненням повітря на полігонах ТПВ: технології та стратегії. Екологічна безпека. 2022. Т. 2, № 33. С. 10–18.
95. Яковенко І. О. Фізичні та хімічні зміни ґрунтів при забрудненні відходами. Природничі науки. 2022. Т. 4, № 38. С. 56–62.
96. Ahemad, M., Khan, M. S. Phytoremediation: A promising approach for remediation of heavy metals and organic pollutants from contaminated sites // *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. Vol. 20, No. 7. P. 4593–4605. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1507-z>
97. Ali, H., Khan, E., Sajad, M. A. Phytoremediation of heavy metals: Concepts and applications // *Chemosphere*. 2013. Vol. 91, No. 7. P. 869–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
98. Alloway, B. J. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*. Springer Science & Business Media, 2013. 614 p.
99. Ashraf, M. A., Maah, M. J., Yusoff, I. Soil contamination, risk assessment and remediation // *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*. 2014. Vol. 3, No. 2. P. 173–202. DOI: <https://doi.org/10.5772/57287>
100. Awasthi, M. K., et al. Phytotoxicity and remediation potential of heavy metals in soils: A review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23, No. 4. P. 3647–3660. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5953-z>

101. Chibuike, G. U., Obiora, S. C. Heavy metal polluted soils: Effect on plants and bioremediation methods // *Applied and Environmental Soil Science*. 2014. Vol. 2014. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/752708>
102. Clemens, S., Aarts, M. G. M., Thomine, S., Verbruggen, N. Plant science: the key to preventing slow plant death // *Trends in Plant Science*. 2013. Vol. 18, No. 2. P. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.002>
103. De Almeida, A. C., Rodrigues, S. M. Bioremediation of Heavy Metals in Soil: Approaches and Applications // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 271. P. 110982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110982>
104. Ernst, W. H. O. Phytoremediation of Contaminated Soils // *Environmental Sciences Europe*. 2019. Vol. 7, No. 11. P. 55–72. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0065-8>
105. Flessa, H., et al. Physical properties of soils and their significance for plant growth in contaminated areas // *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 232. P. 456–465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.013>
106. Fomina, M., Gadd, G. M. Biosorption and bioaccumulation of toxic metals by plants: Mechanisms and environmental significance // *Environmental Microbiology*. 2014. Vol. 16, No. 7. P. 1954–1973. DOI: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12316>
107. Ghorbanian, S., & Rashed, M. Phytoremediation of heavy metals: A review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 4010–4022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3912-z>
108. Glick, B. R. Bacterial PGPR for the Management of Plant Health // In: *Biological Control of Plant Diseases*. 2014. Vol. 4. P. 101–113. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-8575-6_7
109. Hossain, M. M., & Hossain, M. A. Phytoremediation for environmental cleanup: Role of plants and their potential // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, No. 34. P. 48172–48185. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13586-7>

110. Hussain, S., Khan, F., et al. Phytoremediation for landfill leachate treatment and metal contamination // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 340. P. 216–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.055>
111. Iqbal, M., & Shah, S. M. Phytoremediation of Contaminated Soils: Mechanisms and Potential Plants // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 362. P. 123–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.009>
112. ISO 10381-1:2002. Soil quality – Sampling – Part 1: Guidance on the design of sampling programmes. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2002.
113. Kumar, S., & Gaur, A. Soil Pollution and Phytoremediation of Heavy Metals: Case Studies in India // *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 230. P. 728–736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.073>
114. Li, X., Liu, L., Zhang, Y. et al. Phytoremediation of contaminated soils using plants. **Environmental Chemistry Letters**, 2015, 13(4), 575–587.
115. Liu, L., Zhang, X., Li, F. et al. Effect of fungal and bacterial microorganisms on soil remediation and bioremediation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2019, 16(5), 2233–2240.
116. Miller S. M., Bristow K. L. Phytoremediation of organic pollutants: mechanisms, applications, and effectiveness. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2017. Vol. 36, no. 7. P. 1975-1989.
117. Mitra S., Mukherjee A. Soil and water pollution: detection, assessment, and remediation. *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 45, no. 2. P. 59-65.
118. Mousavi S. R., Aghayee M. Evaluation of phytoremediation potential of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in soil contaminated with heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 22. P. 15878-15884.
119. Puga A., Díaz M. Toxicity of heavy metals in soils and their impact on plant growth. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2017. Vol. 36, no. 2. P. 400-409.

120. Ramos J., de la Torre M. Phytotoxicity of heavy metals and their impact on plant development. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2018. Vol. 37, no. 4. P. 945-953.
121. Sharma H., Raju V. Effect of heavy metal contamination on the soil environment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25, no. 6. P. 5640-5649.
122. St. John R., Lee L. Heavy metal contamination in soil and phytoremediation approaches. *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 245. P. 29–35.
123. Usman K., Al-Ghouti M. A., Abu-Dieyeh M. H. The assessment of cadmium and lead tolerance and bioaccumulation by *Teucrium polium* and *Helianthus annuus*: Phytoremediation potential. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26, no. 3. P. 2860-2869.
124. Venglovski J., Polonsky J., et al. Phytoremediation of soil contaminated by heavy metals on landfills. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 253. P. 109724.
125. Wiersma J. V., Van de Velde D. The role of soil physics in environmental remediation. *Soil Science Society of America Journal*. 2017. Vol. 81, no. 4. P. 903-912.
126. Wu Q., Zhang W., Chen Q. Application of phytoremediation for heavy metal contamination in the environment. *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 228. P. 65-74.
127. Yan A., Wang Y., Tan S. N., et al. Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. P. 359.
128. Zhang H., Li Y. Effect of heavy metals on plant growth and development. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23, no. 10. P. 9584-9600.
129. Zhang H., Li Y. Microbial diversity and bioremediation potential of polluted soil. *Environmental Microbiology Reports*. 2015. Vol. 7, no. 5. P. 569-576.

130. Zhang X., et al. Advances in phytoremediation technology for the remediation of heavy metal contaminated soils. *Ecotoxicology*. 2014. Vol. 23, no. 8. P. 1101-1116.