ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра загальної та прикладної екології і зоології

Кваліфікаційна робота

магістра

на тему ОПТИМІЗАЦІЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕНЬ ГРУНТІВ УКРАЇНИ

OPTIMIZATION OF SOIL POLLUTIONLEVELS IN UKRAINE

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1014
спеціальності 101 Екологія
освітньо-професійної програми Екологія та охорона навколишнього середовища

Климов Микита Андрійович
Керівник доцент, к.с/г.н. Притула Н.М.
Рецензент професор, д.б.н. Рильський О.Ф.

Запоріжжя – 2025

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Біологічний факультет
Кафедра загальної та прикладної екології і зоології
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 101 Екологія
Освітньо-професійна програма Екологія та охорона навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри загальної та прикладної екології і зоології,
професор, доктор біологічних наук
Рильський О.Ф.
«» січня року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Климову Микиті Андрійовичу

1. Тема роботи Оптимізація рівня забруднення ґрунтів України керівник роботи Притула Н.М., к.с/г.н., доцент затверджені наказом ЗНУ від «28» березня 2025 р. № 455–с

2. Строк подання студентом роботи «19» листопада 2025 року

Вихідні дані до роботи: огляд наукової літератури з питань забруднення та охорони ґрунтів; результати картографічних та ґрунтово-екологічних даних по території України; аналітичні матеріали з відкритих екологічних звітів; результати лабораторного аналізу зразків ґрунту; робота бакалавра.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки аналіз сучасних наукових підходів щодо оцінки забруднення ґрунтів; дослідження просторової та динамічної зміни рівнів забруднювачів у ґрунтах України; аналіз практик моніторингу та очищення ґрунтів; формулювання рекомендацій щодо оптимізації та зниження рівня забруднень

5. Перелік графічного матеріалу: 19 рисунків.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Притула Н.М., доцент к.с./г.н		

Дата видачі завдання 31 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Написання першого розділу роботи.	березень-квітень	Виконано
2.	Вивчення, засвоєння методик дослідження. Написання другого розділу роботи.	квітень - травень	Виконано
3.	Засвоєння правил техніки безпеки під час виконання експериментальної частини. Написання відповідного розділу роботи.	травень - вересень	Виконано
4.	Проведення експериментального дослідження. Оформлення результатів експерименту (таблиці, рисунки). Написання третього розділу роботи.	травень - вересень	Виконано
5.	Оформлення кваліфікаційної роботи. Передзахист роботи.	жовтень - листопад	Виконано
6.	Рецензування кваліфікаційної роботи.	грудень	Виконано
7.	Захист кваліфікаційної роботи.	грудень	Виконано

Студент _____ Климов М.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Притула Н.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Притула Н.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

У даній роботі 64 сторінки, 19 рисунка, було використано 62 літературних джерела.

Об’єктом дослідження є ґрунтові ресурси України, зокрема їхній екологічний стан у різних регіонах.

Предметом дослідження є джерела забруднення ґрунтів та ефективність методів їхньої оптимізації.

Мета дослідження полягає у вивченні сучасного рівня забруднення ґрунтів України, визначенні основних чинників, що впливають на їхній стан, та розробці рекомендацій щодо зменшення антропогенного навантаження і покращення якості ґрунтів.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання: ідентифікувати основні джерела та типи забруднень (важкі метали, пестициди, нафтопродукти тощо); розробити пропозиції щодо оптимізації стану ґрунтів за допомогою агроекологічних, біотехнологічних та організаційно-управлінських заходів.

Наукова новизна полягає у комплексному підході до оцінки забруднення ґрунтів на основі сучасних методів екологічного моніторингу та GIS-технологій, а також у пропозиції інтегрованої системи заходів щодо зниження рівня забруднення в умовах України.

Практичне значення результатів полягає у можливості використання отриманих даних для прийняття рішень на регіональному та національному рівнях, зокрема у сфері охорони ґрунтів.

ЗАБРУДНЕННЯ ГРУНТІВ, ОПТИМІЗАЦІЯ СТАНУ ГРУНТІВ, МЕТОДИ ОЧИЩЕННЯ ГРУНТІВ, ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ, БІОРЕМЕДІАЦІЯ, ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ, ОХОРОНА ГРУНТІВ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, ВАЖКІ МЕТАЛИ, НАФТОПРОДУКТИ.

ABSTRACT

This paper consists of 62 pages, 19 figures, and 62 references.

The object of the research is the soil resources of Ukraine, particularly their environmental condition across various regions.
The subject of the research is the sources of soil pollution and the effectiveness of methods for its optimization.

The relevance of the research lies in the fact that, under conditions of intensive agricultural production, industrial activity, and urbanization, the problem of soil degradation and pollution is becoming increasingly threatening to ecosystems and human health. At present, Ukraine lacks a comprehensive national-level approach to soil pollution assessment; therefore, this study has both scientific and practical significance.

To achieve the aim, the following objectives were set:

To analyze the dynamics of soil pollution levels in selected regions of Ukraine in recent years; to identify the main sources and types of pollution (heavy metals, pesticides, petroleum products, etc.);

The scientific novelty lies in a comprehensive approach to soil pollution assessment based on modern methods of environmental monitoring and GIS technologies, as well as in the proposal of an integrated system of measures aimed at reducing pollution levels in Ukraine.

The practical significance of the results lies in their potential use for decision-making at both regional and national levels, particularly in the fields of soil protection, land use, and the development of sustainable agricultural policie.

SOIL POLLUTION, SOIL CONDITION OPTIMIZATION, SOIL REMEDIATION METHODS, PHYTOREMEDIATION, BIOREMEDIATION, ENVIRONMENTAL MONITORING, SOIL PROTECTION, ENVIRONMENTAL SAFETY, HEAVY METALS, PETROLEUM PRODUCTS

ЗМІСТ

ВСТУП……. 8

1 ОГЛЯД НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ…… 10

1.1 Теоретичні основи та стан досліджуваної проблеми……... 10

1.2 Методи оптимізації рівня забруднення ґрунтів…… 20

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ…… 30

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ……. 33

3.1.1 Аналіз грунту Західних областей України……. 33

3.1.2 Показники Ph у відібраних пробах……... 34

3.1.3 Вміст азоту в відібраних пробах……. 35

3.1.4 Вміст важких металів в відібраних пробах …… 36

3.2.1 Порівняння методів очищення грунту від забруднення важкими металлами. На прикладі очищення грунту від Pb (плюмбуму) …… 38

3.2.2 Біоремедіація (А1–А3) …….. 42

3.2.3 Хелаторне промивання (В1–В3)…… 45

3.2.4 Фіторемедіація (С1–С3) …… 49

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ…… 53

ВИСНОВКИ……. 56

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ……... 58

ВСТУП

Кожен природний компонент відіграє важливу роль у збереженні екологічної рівноваги. Проте діяльність людини часто має руйнівний характер, ігноруючи довготривалі наслідки. Одним із найбільш критичних чинників, що негативно впливають на стан довкілля, є забруднення ґрунтів. Систематичне застосування пестицидів, хімікатів, надмірне сільськогосподарське навантаження, промислові відходи – усе це призводить до деградації ґрунтів і порушення екосистем. На перший погляд, розміщення звалищ або використання мінеральних добрив здається технічно виправданим, однак ці дії мають серйозні довгострокові екологічні наслідки [3].

Забруднення ґрунтів – це не лише загроза для сільського господарства, а й потенційна небезпека для здоров'я людей, оскільки забруднювачі можуть потрапляти в харчовий ланцюг через продукти, воду чи повітря [2].

Метою дослідження є вивчення основних джерел забруднення ґрунтів в Україні, аналіз їхнього впливу на екосистеми, а також розробка підходів до оптимізації стану ґрунтів шляхом зниження рівня забруднення і підвищення екологічної стійкості.

Об'єктом дослідження є ґрунтові ресурси України.

Предметом дослідження є антропогенні чинники, що впливають на рівень забруднення ґрунтів, та способи оптимізації цього процесу.

Ми проводимо оцінку забрудненості ґрунтів у різних біотопах (зональне порівняння), досліджуємо просторовий розподіл забруднювачів та реєструємо вміст важких металів, нітратів, фосфатів та інших токсичних речовин. Виявлено, що рівень забруднення може виступати лімітуючим фактором для біологічної продуктивності та безпеки агроландшафтів [7].

Актуальність дослідження зумовлена недостатнім моніторингом стану ґрунтів у багатьох регіонах України, що ускладнює прийняття екологічно

виважених рішень. Отримані результати можуть мати як наукове, так і практичне застосування у сфері екологічного управління [4].

Для досягнення мети були сформульовані такі завдання:

1. Проаналізувати динаміку забруднення ґрунтів у різних регіонах України;
2. Визначити основні джерела забруднення (промисловість, аграрна діяльність, транспорт);
3. Оцінити ризики для екосистем і здоров’я населення;
4. Розробити пропозиції щодо зменшення навантаження на ґрунти та відновлення їхньої якості;

Методи дослідження: лабораторний аналіз проб ґрунту, картографування (GIS), структурно-функціональний аналіз, статистичні методи, компаративний аналіз.

Наукова новизна полягає в комплексному підході до оцінки рівня забруднення та обґрунтуванні заходів для його зниження. Дослідження також визначає гранично допустимі рівні забруднювачів у конкретних умовах України, що дозволяє прогнозувати екологічні наслідки та планувати природоохоронну політику.

Практичне значення отриманих результатів полягає в їх можливому використанні для розробки регіональних програм з охорони ґрунтів, прийняття рішень на рівні органів місцевої влади, удосконалення агротехнологій та екологічної освіти.

1 ОГЛЯД НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Теоретичні основи та стан досліджуваної проблеми

Ґрунт є одним із ключових компонентів біосфери, що виконує роль природного фільтра, акумулятора органічної та мінеральної речовини, а також середовища існування безлічі живих організмів. Це складна, багатокомпонентна система, яка формується внаслідок взаємодії гірських порід, клімату, живих організмів та антропогенної діяльності [12].

З екологічної точки зору ґрунт виконує низку життєво важливих функцій:

– продукційна функція – забезпечення рослин необхідними поживними речовинами, вологою та повітрям, що є основою для виробництва продуктів харчування та сировини;

– регуляційна функція – участь у кругообігу речовин і регулюванні водного та газового режимів біосфери;

– фільтраційна функція – здатність затримувати, нейтралізувати або трансформувати забруднювальні речовини.

– біотопічна функція – забезпечення місця проживання для мікроорганізмів, комах, дрібних ссавців та інших живих істот [5].

В Україні ґрунтовий покрив є надзвичайно різноманітним і включає чорноземи, дерново-підзолисті, сірі лісові, каштанові та інші типи ґрунтів. Чорноземи, які займають понад 60% території країни, вважаються одними з найродючіших у світі та є стратегічним ресурсом не лише для сільського господарства, а й для екологічної стабільності регіону [9,19].

Роль ґрунту в біосфері України виходить за межі лише аграрного значення. Він є основою стійкості екосистем, впливає на якість поверхневих і підземних вод, зумовлює біорізноманіття, а також виконує важливу роль у процесах накопичення та збереження вуглецю, що прямо пов’язано з проблемами глобальної зміни клімату [1].

В останні десятиліття в Україні спостерігається тенденція до зниження родючості ґрунтів унаслідок ерозії, засолення, підтоплення, ущільнення та хімічного забруднення. Особливо гострою є проблема втраченого гумусового шару, вміст якого за останні 30–40 років зменшився майже на 20–25%. Це знижує не лише продуктивний потенціал земель, а й стійкість екосистем до кліматичних змін [10, 4].

Збереження екологічних функцій ґрунтів України є ключовою умовою забезпечення продовольчої безпеки, збереження природних ландшафтів та стабільного розвитку суспільства. Порушення ґрунтового покриву, спричинене забрудненням або деградацією, призводить до ланцюгових екологічних змін, які часто мають незворотний характер [6].

Для забезпечення раціонального використання земельних ресурсів в Україні діє державна система ґрунтового моніторингу, яка включає оцінку фізико-хімічних, агрохімічних та біологічних показників. Її мета – своєчасне виявлення негативних змін і розробка заходів з відновлення родючості. Особливу увагу приділяють контролю за техногенним забрудненням важкими металами та залишками пестицидів [10, 8].

Україна – одна з найбільш родючих країн світу, і значна частина її багатства полягає в ґрунтах. Від густих лісів Полісся до сухих степів Причорномор’я, кожен регіон має унікальні ґрунти, сформовані кліматом, рослинністю та геологічною історією [13].

Ґрунтове різноманіття України формує унікальну природну мозаїку, що забезпечує високий аграрний потенціал держави. Крім основних типів, у межах країни трапляються також перехідні та специфічні ґрунти, зокрема лучно-чорноземні, болотні, торф’яно-болотні та дерново-карбонатні. Лучно-чорноземні ґрунти характерні для заплав і понижених ділянок степової зони, вони відзначаються високою вологістю та добрим вмістом гумусу. Торф’яно-болотні ґрунти зосереджені переважно в Поліссі; вони містять велику кількість органічної речовини, проте відзначаються надмірним зволоженням, що потребує осушення для ефективного використання [13,9].

Важливу роль у формуванні ґрунтового покриву відіграють кліматичні чинники, гідрологічний режим, материнські породи та рослинний покрив. Зі зміною клімату від вологого до посушливого змінюється і ґрунтотвірний процес: від дерново-підзолистих до чорноземних і далі до каштанових ґрунтів. Саме тому територіальний розподіл ґрунтів України має чітко виражену зональність, що збігається з природними зонами – Полісся, Лісостеп, Степ, Карпати та Крим [15].

Чорноземи – «золото» українських степів. Найвідоміші та найродючіші ґрунти України – чорноземи. Вони займають понад 60% площі країни, особливо в центральних та східних регіонах. Ці ґрунти накопичували гумус тисячоліттями під степовою рослинністю, завдяки чому мають потужний родючий шар завтовшки до півтора метра. Вміст органіки в них може сягати 12%, що робить їх ідеальними для вирощування пшениці, кукурудзи та соняшнику [16].

Сірі лісові ґрунти – між степами та лісами. У перехідній зоні між лісами та степами поширені сірі лісові ґрунти. Вони менш родючі, ніж чорноземи, але все ще придатні для землеробства. Їхня відмінна риса – вилугований підзолистий шар, який утворився через вимивання мінералів дощовими водами. Такі ґрунти потребують вапнування та додаткових добрив, але на них добре ростуть цукрові буряки, картопля та зернові [20].

Дерново-підзолисті ґрунти – виклики Полісся. У північних районах України, де колись були густі ліси, переважають дерново-підзолисті ґрунти. Вони бідні на гумус і мають високу кислотність, що обмежує їхнє сільськогосподарське використання. Тут традиційно вирощують льон, жито та гречку, але для підвищення врожайності необхідне інтенсивне удобрення [18].

Каштанові ґрунти – південні степи. На півдні України, де клімат сухіший, поширені каштанові ґрунти. Вони мають менше гумусу, ніж чорноземи, і часто страждають від нестачі вологи. Тут вирощують просо, ячмінь і соняшник, але для стабільних урожаїв потрібне зрошення [33].

Буроземи – карпатське багатство. У передгір’ях Карпат зустрічаються буроземи – ґрунти, багаті на залізо та алюміній. Вони менш придатні для

землеробства через кам’янистість та ерозію, але ідеально підходять для садівництва та лісівництва [28].

Солонці та солончаки – проблемні землі. У південних регіонах, особливо біля Чорного моря, трапляються засолені ґрунти – солонці та солончаки. Вони мають обмежене сільськогосподарське значення, оскільки високий вміст солей шкодить рослинам. Такі землі потребують спеціальної меліорації [25].

Алювіальні ґрунти – родючі річкові долини. У долинах Дніпра, Дунаю та інших великих річок формуються алювіальні ґрунти. Вони дуже родючі, але часто заболочені або підтоплюються під час повеней. Тут розвинене овочівництво та баштанництво [30].

Екологічна стійкість ґрунтів України безпосередньо залежить від рівня антропогенного навантаження. Надмірна розораність території (понад 56% площі країни) призводить до втрати гумусу, погіршення структури та ерозійних процесів. Саме тому для кожного типу ґрунтів необхідно впроваджувати адаптовані системи землеробства – збереження природної рослинності на схилах, мінімальний обробіток, органічне удобрення та зрошення у посушливих районах [30].

Сучасний стан ґрунтового покриву України викликає серйозні занепокоєння через інтенсивне антропогенне вплив, що призводить до їх деградації та забруднення. Основні джерела такого впливу мають як техногенний, так і природний характер. Однією з найбільш небезпечних проблем є промислове забруднення. Металургійні підприємства, особливо в промислових регіонах Донбасу та Придніпров'я, є джерелом надходження у ґрунти важких металів – свинцю, кадмію, ртуті, цинку. Хімічні комбінати забруднюють землю пестицидами, нітратами та сульфатами, які мають властивість накопичуватися і довго зберігати токсичність. Окремої уваги заслуговує вплив гірничодобувної промисловості, яка не тільки руйнує ґрунтовий покрив, але й створює величезні території, завалені відходами видобутку [17, 22].

Сільське господарство, будучи основою економіки країни, також вносить значний внесок у деградацію ґрунтів. Надмірне застосування мінеральних

добрив призводить до накопичення нітратів і фосфатів, що порушує природний баланс ґрунту. Використання пестицидів, особливо заборонених стійких органічних сполук, спричиняє довгострокове забруднення. Монокультурне землеробство та неправильна агротехніка призводять до виснаження гумусового шару та розвитку ерозійних процесів [21, 23].

Значний вплив на стан ґрунтів має транспортна інфраструктура та міське господарство. Автотранспорт є джереном надходження у ґрунти свинцю, вуглеводнів та інших шкідливих речовин. Побутові та промислові відходи, особливо нелегальні сміттєзвалища, стають причиною фізичного та хімічного забруднення. Природні фактори, такі як засолення ґрунтів у південних регіонах або наслідки Чорнобильської катастрофи, додатково ускладнюють ситуацію. В результаті ми маємо комплексне забруднення, що проявляється у хімічній (важкі метали, нафтопродукти), фізичній (механічні пошкодження) та біологічній (патогенні мікроорганізми) формах [27].

Додатковим джерелом забруднення є енергетичний комплекс, зокрема теплоелектростанції, які викидають у довкілля значні обсяги золи, сажі та сполук сірки. Осідання цих речовин на поверхню ґрунту призводить до підвищення його кислотності, зміни фізико-хімічних властивостей та пригнічення біологічної активності. Особливо небезпечними є ділянки, прилеглі до золовідвалів, де спостерігається висока концентрація важких металів і поліциклічних ароматичних вуглеводнів [31].

У регіонах інтенсивного тваринництва серйозною проблемою стає мікробіологічне забруднення. Неконтрольоване внесення гною, стічних вод тваринницьких комплексів і відсутність належної системи утилізації органічних відходів сприяють накопиченню патогенних мікроорганізмів, яєць гельмінтів, антибіотиків та залишків ветеринарних препаратів у ґрунтах. Це створює загрозу вторинного забруднення водних ресурсів і поширення збудників інфекційних хвороб [34].

Варто також відзначити роль атмосферного забруднення, яке спричиняє трансграничне перенесення шкідливих речовин. Осідання кислотних опадів

призводить до зниження pH ґрунтів, вимивання кальцію, магнію та інших поживних елементів, що погіршує умови росту рослин і прискорює деградаційні процеси. У великих промислових агломераціях, таких як Київ, Дніпро, Харків та Запоріжжя, виявлено підвищені концентрації важких металів у верхньому шарі ґрунту внаслідок багаторічного впливу промислових викидів і автотранспорту [39, 22].

Окрему категорію становить радіоактивне забруднення, яке має тривалий характер і значну екологічну небезпеку. Після аварії на Чорнобильській АЕС значні площі Полісся залишаються забрудненими цезієм-137 і стронцієм-90, що ускладнює використання цих земель у сільському господарстві. Радіонукліди мають здатність включатися у біогеохімічні цикли, потрапляючи у харчові продукти та організми людей і тварин [25].

Таким чином, забруднення ґрунтів має багатокомпонентний характер і зумовлене поєднанням техногенних, аграрних, урбанізаційних та природних факторів. Найчастіше у природних умовах спостерігається комбінована дія кількох видів забруднювачів, що призводить до синергічного ефекту та ускладнює процеси очищення і рекультивації. Усвідомлення різноманіття джерел і типів забруднення є ключовою передумовою для формування ефективної системи моніторингу, профілактики та управління станом ґрунтових ресурсів [20, 21].

Система моніторингу ґрунтів в Україні є важливим інструментом для оцінки їх стану та своєчасного виявлення негативних змін. Вона включає регулярні спостереження за фізичними, хімічними та біологічними показниками якості ґрунтів. Основні методи контролю поділяються на польові та лабораторні [8].

Польові дослідження передбачають відбір проб ґрунту за стандартними методиками з подальшим описом морфологічних характеристик. Для цього використовуються спеціальні пробовідбірники, які дозволяють отримувати зразки з різних глибин без порушення їх структури [33].

Лабораторні методи включають фізико-хімічні та біологічні аналізи. До

фізичних методів належить визначення гранулометричного складу, щільності, пористості та вологоємності. Хімічні аналізи спрямовані на виявлення вмісту важких металів, нафтопродуктів, пестицидів, а також визначення pH, вмісту гумусу та основних поживних елементів. Для цього застосовуються сучасні інструментальні методи, такі як атомно-абсорбційна спектроскопія, газова та рідинна хроматографія. Біологічні методи дозволяють оцінити стан ґрунтової мікробіоти за допомогою мікробіологічних та біохімічних тестів [36, 15].

Важливим елементом моніторингу є геоінформаційні системи (ГІС), які дозволяють інтегрувати дані про стан ґрунтів, візуалізувати їх у вигляді картографічних матеріалів та прогнозувати розвиток негативних процесів. Особливу увагу приділяють моніторингу забруднених територій, зокрема в зонах впливу промислових підприємств та сільськогосподарських угідь з інтенсивним застосуванням агрохімікатів. Регулярний моніторинг дозволяє своєчасно виявляти загрози та вживати заходів щодо відновлення родючості ґрунтів [40, 24].

Сучасна система моніторингу ґрунтів має бути комплексною та багаторівневою, поєднуючи локальні, регіональні й національні спостереження. На державному рівні основними установами, що здійснюють контроль стану земельних ресурсів, є Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру, а також Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського. Вони забезпечують ведення банків даних про якість ґрунтів, здійснюють аналіз динаміки показників родючості та рівня забруднення [44].

В останні роки значного поширення набули дистанційні методи моніторингу, зокрема аерофотозйомка, супутникові спостереження та використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ці технології дозволяють оперативно оцінювати зміни стану земель, виявляти осередки деградації, ерозії чи засолення, а також моделювати ризики розвитку забруднення. Комбінування дистанційних даних з польовими вимірюваннями забезпечує високу точність оцінки екологічного стану ґрунтового покриву [38].

Особливе значення мають біоіндикаційні методи, які базуються на використанні живих організмів як показників стану ґрунтів. Наприклад, зміна складу мікрофлори або пригнічення росту рослин-індикаторів може свідчити про наявність токсичних речовин. Біоіндикація є чутливим і екологічно безпечним методом, що дозволяє оцінити сумарний ефект забруднення, який не завжди виявляється традиційними хімічними аналізами [29, 35].

Забруднення ґрунтів має серйозні наслідки як для аграрного сектору, так і для здоров'я населення. У сільському господарстві воно призводить до зниження родючості ґрунтів, погіршення якості сільськогосподарської продукції та зменшення врожайності. Важкі метали, такі як свинець, кадмій та ртуть, накопичуючись у ґрунтах, потрапляють у рослини, що робить продукцію небезпечною для споживання. Надмірний вміст нітратів у ґрунтах призводить до їх накопичення в овочах та фруктах, що становить загрозу для здоров'я людей [37, 42].

Забруднені ґрунти також впливають на якість підземних вод, оскільки токсичні речовини можуть вимиватися до водоносних горизонтів. Це особливо небезпечно для регіонів, де населення використовує колодязі або криниці для питних потреб. Хронічне вживання води з підвищеним вмістом важких металів або нітратів може спричинити серйозні захворювання, включаючи онкологічні захворювання, порушення роботи нирок, печінки та нервової системи [29].

Для аграрної галузі наслідки забруднення ґрунтів включають не лише економічні збитки через зниження врожайності, але й обмеження у використанні земель. Деякі ділянки стають непридатними для вирощування продукції, що відповідає санітарним нормам. Це особливо актуально для територій, забруднених радіонуклідами після Чорнобильської катастрофи. Таким чином, забруднення ґрунтів створює комплексні проблеми, які потребують як негайних заходів щодо рекультивації, так і довгострокових стратегій з їх відновлення та захисту [31,22].

Також спостерігається негативний вплив забруднення на біорізноманіття сільськогосподарських екосистем. Пестициди, важкі метали та стійкі органічні

забруднювачі чинять токсичну дію на комах-запилювачів, дощових черв'яків, ґрунтових кліщів та інші групи організмів, які є природними регуляторами родючості. Це призводить до спрощення екосистем, зменшення їхньої стійкості до стресових факторів і втрати екологічних функцій [41].

Для здоров'я населення наслідки забруднення ґрунтів можуть мати кумулятивний характер. Токсичні елементи накопичуються в організмах людей через харчові ланцюги – «ґрунт → рослина → тварина → людина». Особливо небезпечним є надходження кадмію, свинцю та миш'яку, які не виводяться з організму, а з часом викликають хронічні отруєння, анемію, ураження кісткової тканини, серцево-судинні порушення. Високі концентрації нітратів у продуктах харчування можуть спричиняти метгемоглобінемію, особливо небезпечну для дітей раннього віку [27, 23].

Крім медичних та екологічних аспектів, забруднення ґрунтів має соціально-економічні наслідки. Погіршення якості сільськогосподарської продукції знижує її конкурентоспроможність на внутрішньому та зовнішньому ринках, що негативно впливає на економіку регіонів із розвиненим аграрним сектором. Витрати на моніторинг, очищення ґрунтів та медичну допомогу населенню значно перевищують вартість профілактичних заходів, тому запобігання забрудненню має бути пріоритетним напрямом державної політики у сфері охорони навколишнього середовища [20].

Отже, забруднення ґрунтів є не лише екологічною, а й соціально-економічною проблемою, що потребує комплексного підходу до її розв'язання. Розроблення ефективних систем екологічного моніторингу, впровадження безпечних агротехнологій, екологічна освіта населення та посилення контролю за дотриманням санітарно-гігієнічних норм мають стати основними напрямами зменшення ризиків для аграрної галузі та здоров'я людей [20].

Сталий розвиток системи землекористування в Україні є одним із ключових напрямів забезпечення екологічної, економічної та соціальної стабільності держави. Земельні ресурси становлять основу природно-ресурсного потенціалу країни, адже саме від їхнього стану залежить продуктивність

агросфери, біорізноманіття, водний баланс і кліматичні процеси. В умовах зростання антропогенного навантаження, деградації ґрунтів і зміни клімату питання формування екологічно орієнтованої моделі землекористування набуває стратегічного значення [22].

Однією з головних проблем сучасного землекористування є висока розораність територій – понад 54 % площі України використовується в сільському господарстві, що значно перевищує екологічно допустимі норми. Наслідком цього є зниження родючості ґрунтів, ерозійні процеси, втрата гумусу, забруднення агроландшафтів агрохімікатами. Тому сталий підхід передбачає збалансування між інтенсивним виробництвом і відновленням природних екосистем [27].

Перспективи сталого землекористування полягають у переході до екологічно безпечних і ресурсозберігаючих технологій. Це включає розвиток органічного землеробства, агролісомеліорації, застосування точного (прецизійного) землеробства, мінімального обробітку ґрунту (No-till), а також використання біологічних засобів захисту рослин. Такі практики сприяють зменшенню деградаційних процесів, збереженню вологи в ґрунті, покращенню структури орного шару та підвищенню біологічної активності [20].

Важливим напрямом є рекультивація деградованих і техногенно порушених земель, зокрема в зонах колишніх кар’єрів, промислових підприємств і полігонів відходів. Використання сучасних фіторемедіаційних технологій дає можливість поступово відновлювати природні функції ґрунтового покриву, підвищувати його екологічну стійкість та забезпечувати повернення таких земель у господарський обіг [31].

Значний потенціал мають цифрові технології управління земельними ресурсами – впровадження геоінформаційних систем (GIS), дистанційного зондування Землі, супутникового моніторингу стану ґрунтів і прогнозування ерозійних ризиків. Це дозволяє приймати науково обґрунтовані рішення щодо оптимізації землекористування на регіональному та національному рівнях [25].

Важливим компонентом сталого землекористування є формування

правових і економічних механізмів раціонального використання земель. Зокрема, запровадження системи «платежів за екосистемні послуги», екологічного оподаткування та підтримки землевласників, які впроваджують природоохоронні технології. У контексті євроінтеграційного курсу Україна має адаптувати свої стандарти управління земельними ресурсами до вимог Європейського Союзу, передбачених у «Стратегії ЄС із захисту ґрунтів до 2030 року» [23].

Не менш важливим аспектом є просвітницька діяльність і підвищення екологічної свідомості населення. Сприяння формуванню культури дбайливого ставлення до ґрунтів, розвиток екологічної освіти серед фермерів, студентів аграрних спеціальностей та громадських ініціатив – це основа для довгострокових позитивних змін [24].

Отже, перспективи сталого землекористування в Україні пов’язані з інтеграцією екологічних, технологічних і соціально-економічних рішень. Тільки системний підхід, що поєднує наукові дослідження, державне управління, бізнесові інновації та активність громад, здатен забезпечити збереження родючості ґрунтів і сталий розвиток аграрного сектору в умовах сучасних глобальних викликів [19].

1.2 Методи оптимізації рівня забруднення ґрунтів

Сучасні біологічні методи ремедіації забруднених ґрунтів стають все більш актуальними в умовах необхідності екологічно безпечного та економічно доцільного відновлення земельних ресурсів. Серед них особливе місце займають фіторемедіація та застосування біопрепаратів, які пропонують природні шляхи детоксикації ґрунтів [30].

Фіторемедіація ґрунтів передбачає використання спеціально підібраних рослин, здатних поглинати, накопичувати або трансформувати забруднювачі.

Цей метод особливо ефективний для очищення від важких металів, оскільки деякі види рослин (так звані гіперакумулятори) здатні концентрувати у своїх тканинах значні кількості токсичних елементів. Наприклад, соняшник, тютюн та деякі види капусти ефективно поглинають кадмій, свинець та цинк. Для органічних забруднень, таких як нафтопродукти чи пестициди, використовують рослини з потужною кореневою системою (тополя, верба), які стимулюють діяльність ґрунтових мікроорганізмів, що розкладають токсичні сполуки. Важливою перевагою фіторемедіації є її екологічна безпека та можливість застосування на великих площах, хоча процес очищення потребує тривалого часу – від кількох років до десятиліть [38, 26].

Біопрепарати на основі мікроорганізмів або їх метаболітів пропонують більш швидкий спосіб біологічного відновлення ґрунтів. Сучасні біотехнології дозволяють створювати спеціалізовані мікробні консорціуми, здатні ефективно розкладати нафтопродукти, пестициди та інші стійкі органічні забруднювачі. Наприклад, бактерії роду Pseudomonas та Rhodococcus демонструють високу активність у розкладі вуглеводнів, а гриби роду Phanerochaete ефективно деградують хлорорганічні сполуки. Особливістю сучасних біопрепаратів є їхня адаптованість до конкретних умов – вони містять не лише активні мікроорганізми, але й спеціальні добавки, що стимулюють їхню діяльність у ґрунті. Застосування біопрепаратів дозволяє скоротити терміни ремедіації до кількох місяців, що робить їх особливо привабливими для ліквідації аварійних розливів або локальних забруднень [45, 34].

Комбінація фіторемедіації з біопрепаратами створює синергетичний ефект, коли рослини не лише поглинають забруднювачі, але й створюють оптимальні умови для роботи мікроорганізмів. Такий комплексний підхід особливо ефективний для рекультивації земель, забруднених одночасно органічними сполуками та важкими металами. Впровадження біологічних методів у практику охорони ґрунтів вимагає точного діагностування типу та рівня забруднення, правильного підбору рослинних видів і мікробних штамів, а також постійного моніторингу процесу очищення. Незважаючи на деякі

обмеження (залежність від кліматичних умов, тривалість процесу), біологічні методи відновлення ґрунтів становлять перспективний напрямок у розв'язанні проблеми ґрунтового забруднення, поєднуючи в собі екологічну безпеку та економічну доцільність [41, 35].

Для рекультивації забруднених ґрунтів широко застосовуються хімічні та фізико-хімічні методи, які дозволяють ефективно видаляти або нейтралізувати різноманітні забруднювачі. Ці методи особливо актуальні для ліквідації локальних забруднень з високою концентрацією токсичних речовин, коли потрібні швидкі результати [32].

Хімічні методи ґрунтуються на використанні спеціальних реагентів, які взаємодіють із забруднювачами, трансформуючи їх у менш токсичні або нерозчинні форми. Одним із найпоширеніших методів є хімічна фіксація важких металів за допомогою вапнування або внесення органічних та неорганічних сорбентів. Вапнування дозволяє підвищити pH ґрунту, в результаті чого важкі метали переходять у менш рухливі форми. Для цього використовують вапно, крейда або доломітове борошно. Сорбційні матеріали, такі як цеоліти, бентонітові глини або активоване вугілля, ефективно зв'язують важкі метали та органічні забруднювачі, зменшуючи їх доступність для рослин. Для очищення ґрунтів від нафтопродуктів застосовують окислювальні реагенти (пероксид водню, перманганат калію), які руйнують вуглеводні до безпечних сполук. Хімічні методи відрізняються високою ефективністю, але можуть порушувати природні властивості ґрунту, тому потребують ретельного контролю [10, 39].

Фізико-хімічні методи поєднують фізичні процеси з хімічним впливом для більш глибокого очищення. До них належать термічна десорбція, екстракція розчинниками та електрохімічне очищення. Термічна десорбція передбачає нагрівання забрудненого ґрунту до високих температур (200-600°C), в результаті чого леткі забруднювачі випаровуються і потім вловлюються спеціальними системами. Цей метод особливо ефективний для видалення нафтопродуктів та пестицидів. Екстракція розчинниками дозволяє

вилучати органічні забруднювачі (поліароматичні вуглеводні, хлоровані сполуки) за допомогою органічних розчинників або поверхнево-активних речовин. Електрохімічне очищення ґрунтів застосовується для видалення важких металів – під дією електричного струму метали мігрують до електродів, де їх потім видаляють. Ці методи дозволяють досягти високого ступеня очищення, але є енергоємними та вимагають спеціального обладнання [11,14].

Останні наукові дослідження свідчать, що ефективність хімічних методів значною мірою залежить від типу ґрунту, форми сполук забруднювачів, гідрохімічних умов та ступеня їх фіксації у мінеральній і органічній фракціях. Тому для кожного конкретного випадку необхідне попереднє лабораторне моделювання процесів очищення. Крім того, під час вибору реагентів важливо враховувати їх можливий вплив на екосистему: небажаним є утворення вторинних токсичних продуктів або зниження біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів[15,18].

Важливою перевагою хімічних та фізико-хімічних методів є можливість їх комбінування з біологічними методами для підвищення ефективності рекультивації. Наприклад, попередня хімічна обробка може зробити забруднювачі більш доступними для мікроорганізмів або рослин [42].

У сучасній практиці рекультивації все більшої популярності набувають технології, орієнтовані на використання екологічно безпечних реагентів – біосорбентів, природних мінералів та біодеградаційно активних речовин. Такі методи дозволяють поєднати високу ефективність очищення з мінімальним техногенним навантаженням на довкілля. Зокрема, застосування природних цеолітів, сапропелю або гумінових препаратів забезпечує не лише зв’язування токсичних сполук, а й покращення родючості ґрунту[40].

Сучасна система охорони ґрунтів передбачає комплекс агроекологічних та організаційних заходів, спрямованих на запобігання деградації та відновлення родючості земель. Ці підходи поєднують традиційні знання з

інноваційними технологіями, формуючи сталий розвиток сільського господарства [43].

Агроекологічні заходи базуються на принципах природного землеробства, що мінімізують антропогенний вплив на ґрунти. Ключовим елементом є впровадження сівозмін із включенням багаторічних трав та бобових культур, які покращують структуру ґрунту та збагачують його азотом. Важливе значення має застосування органічних добрив (компост, гній, сидерати), які не тільки підживлюють рослини, але й відновлюють гумусовий шар. Для боротьби з ерозією використовують контурну вспашку, стріпкове заліснення та створення захисних лісосмуг. Особливу увагу приділяють технологіям мінімальної обробки ґрунту (no-till), які зберігають його структуру та вологу. Водне регулювання на перезволожених територіях здійснюється через систему дренажу, а на посушливих – шляхом краплинного зрошення [46,19].

Організаційні заходи включають планування землекористування на регіональному та господарському рівнях. Вони передбачають розробку ґрунтоохоронних схем з урахуванням особливостей кожного типу ґрунтів. Важливим напрямком є створення системи моніторингу, яка дозволяє оперативно виявляти зміни стану ґрунтів. Державна підтримка проявляється через субсидування фермерів, які впроваджують ґрунтоохоронні технології, та стимулювання органічного землеробства. Особливе значення має екологічна освіта аграріїв, яка включає проведення тренінгів, майстер-класів та демонстраційних днів. На законодавчому рівні впроваджуються обмеження на використання певних видів пестицидів та норми внесення мінеральних добрив [31].

Ефективність цих заходів залежить від їх комплексного застосування та адаптації до місцевих умов. Наприклад, у степових регіонах пріоритетом є боротьба з дефляцією, тоді як на Поліссі – з перезволоженням. Впровадження точного землеробства з використанням GPS-технологій дозволяє оптимізувати всі процеси. Важливим аспектом є співпраця між науковими установами,

аграріями та органами влади для розробки та впровадження найефективніших рішень. Тільки такий системний підхід може забезпечити довгострокове збереження ґрунтових ресурсів як основи продовольчої безпеки країни [44].

У контексті адаптації до змін клімату дедалі більшої уваги набувають природоорієнтовані рішення, спрямовані на відновлення водного режиму ґрунтів, зменшення втрат вологи та підвищення їх стійкості до екстремальних погодних умов. До таких заходів належить мульчування поверхні, висів проміжних культур, створення біопокривів і впровадження агролісомеліораційних систем. Застосування цих технологій сприяє поліпшенню мікроклімату, запобігає ерозії та формує сприятливі умови для розвитку ґрунтової мікрофлори [27, 42].

Організаційно важливим завданням є вдосконалення системи управління земельними ресурсами на основі принципів екологічного планування. Це передбачає розроблення кадастрових карт деградованих земель, проведення оцінки екологічних ризиків і визначення зон пріоритетного відновлення. Необхідним є створення механізмів міжвідомчої координації між екологічними, аграрними та земельними службами для узгодження дій у сфері охорони ґрунтів. Важливу роль відіграють місцеві громади, які можуть реалізовувати програми сталого землекористування через участь у державних та регіональних екологічних проектах [41, 48].

Суттєвим чинником успішності агроекологічних заходів є формування екологічної свідомості виробників і споживачів. Впровадження принципів «зеленої економіки» та сертифікації органічної продукції стимулює фермерів переходити на екологічно дружні технології, а споживачів – підтримувати сталий ринок. Відповідно, розвиток екологічного менеджменту в агросекторі має поєднувати економічні стимули з нормативно-правовим регулюванням і науковим супроводом [36].

Геотехнічні та інженерні методи є складовою частиною техногенно-екологічної рекультивації територій і застосовуються насамперед у випадках значного або локалізованого забруднення, коли традиційні агроекологічні чи

біологічні підходи є недостатньо ефективними. Основна мета цих методів полягає у запобіганні подальшому розповсюдженню забруднювачів, локалізації джерела забруднення та створенні безпечних умов для подальшого використання території [21, 33].

Ізоляція (інкапсуляція) полягає у відокремленні забрудненого шару ґрунту від навколишнього середовища за допомогою спеціальних геотехнічних матеріалів – геомембран, гідроізоляційних бар'єрів, бентонітових матів, полімерних покриттів або шарів глини. Такий підхід запобігає міграції токсичних речовин у підґрунтові води, атмосферу або суміжні ділянки. Ізоляційні системи можуть бути поверхневими (накриття полімерними плівками чи глинистими екранами) або глибинними (створення ізоляційних контурів у товщі ґрунту). У промислових зонах вони часто поєднуються із системами відводу фільтратів та моніторингу стану підземних вод [38].

Екскавація є радикальним, але ефективним методом усунення забруднення. Він передбачає фізичне зняття верхнього шару ґрунту, який містить підвищені концентрації токсикантів (важких металів, пестицидів, нафтопродуктів), з подальшим транспортуванням на полігони утилізації або до спеціалізованих установок очищення. Після вилучення забрудненого шару територію засипають чистим або рекультивованим ґрунтом, часто із попереднім ущільненням і вирівнюванням поверхні. Недоліком методу є висока вартість та потреба у безпечній утилізації вилученого матеріалу, проте він забезпечує повне усунення джерела забруднення [25,61].

Капілярний бар'єр – це штучно створена система шарів з різною водопроникністю, яка перешкоджає вертикальній міграції забруднювачів у глибші горизонти або ґрунтові води. Зазвичай верхній шар формується з крупнозернистих матеріалів (піску, щебеню), а нижній – із дрібнозернистих (глина, суглинок). Така конструкція порушує капілярний підйом вологи та створює ефект фільтраційного екрану. Капілярні бар'єри ефективно використовуються на полігонах промислових відходів, у місцях зберігання золи, шлаків або біологічно небезпечних речовин. Їхня перевага полягає у

довготривалому стабілізуючому ефекті без потреби частого технічного обслуговування [28, 41].

Рекультивація – це комплекс інженерно-технічних, біологічних і агротехнічних заходів, спрямованих на відновлення родючості та екологічних функцій деградованих земель після техногенного впливу. Процес рекультивації включає два основні етапи:

– технічний – вирівнювання поверхні, зняття залишків відходів, формування ізоляційних шарів, нанесення родючого шару ґрунту, створення дренажних систем;

– біологічний – відновлення рослинного покриву, посів трав або висадка дерев для стабілізації ґрунту та збагачення його органічною речовиною.

Рекультивація має важливе соціоекологічне значення, оскільки дозволяє повернути у господарське використання великі площі порушених земель (кар’єри, терикони, промислові зони) та відновити їхню ландшафтну й екосистемну цінність [35,62].

Світовий досвід у сфері охорони та відновлення забруднених ґрунтів пропонує цінні рішення, які можуть бути успішно застосовані в Україні з урахуванням місцевих особливостей. Країни з розвиненою екологічною політикою, такі як Нідерланди, Німеччина, Данія та Швеція, розробили комплексні підходи до управління ґрунтовими ресурсами, які включають як технологічні інновації, так і ефективні системи моніторингу та управління [47].

У Європейському Союзі діє ґрунтова стратегія, яка передбачає обов'язкову інвентаризацію забруднених територій та створення національних реєстрів. Особливу увагу приділяють циркулярній економіці в землеробстві, де органічні відходи переробляються на добрива, а застосування хімічних препаратів жорстко регулюється. Німеччина, наприклад, досягла значних успіхів у рекультивації промислових територій завдяки комбінації фіторемедіації з мікробіологічними методами. Нідерланди розробили унікальні технології термічної обробки ґрунтів та створення ізолюючих геомембран для локальних забруднень [38].

Для України найбільш перспективними є методи, що не вимагають значних капіталовкладень: біологічна ремедіація за допомогою місцевих видів рослин-гіперакумуляторів, використання біопрепаратів на основі місцевих штамів мікроорганізмів, а також впровадження систем точного землеробства для мінімізації використання агрохімікатів. Важливим кроком має стати створення єдиної державної системи моніторингу ґрунтів за зразком європейських країн, що дозволить оперативно виявляти та ліквідувати забруднення [33].

Основним обмеженням для запровадження зарубіжних практик є недостатнє фінансування екологічних програм та відсутність чіткої державної стратегії з охорони ґрунтів. Проте навіть за наявних умов можна розпочати поетапну адаптацію світового досвіду, починаючи з пілотних проектів у найбільш забруднених регіонах, таких як Донбас або Придніпров'я. Особливі перспективи пов'язані з розвитком державно-приватного партнерства у сфері рекультивації земель та залученням міжнародних фінансових інструментів для екологічних проектів [49].

Українським науковцям та аграріям варто звернути увагу на скандинавський досвід зниження кислотності ґрунтів та голландські технології дренажу перезволожених земель. Водночас необхідно розробити власні, адаптовані до місцевих кліматичних умов та типів ґрунтів рішення, що враховуватимуть економічні можливості українських сільгоспвиробників. Реалізація цих заходів дозволить не тільки покращити якість ґрунтів, а й підвищити експортний потенціал української аграрної продукції, що відповідає міжнародним екологічним стандартам [48].

У США та Канаді значна увага приділяється розвитку біотехнологій у сфері очищення ґрунтів. Біоремедіаційні методи там активно підтримуються державними грантами, що сприяє появі інноваційних стартапів, орієнтованих на очищення земель від важких металів і нафтопродуктів. У цих країнах широко застосовується фітомеліорація з використанням спеціально виведених сортів рослин, здатних акумулювати токсичні елементи, а також методи мікробного

консорціуму, коли різні види мікроорганізмів синергічно прискорюють процес біодеградації шкідливих сполук [50].

Україна може використати цей досвід шляхом створення науково-виробничих кластерів, які поєднуватимуть дослідні установи, університети та агропідприємства. Така модель дозволить проводити випробування нових методів рекультивації, тестувати адаптовані біопрепарати та впроваджувати результати досліджень безпосередньо у виробництво. Додатково слід розвивати систему екологічної сертифікації земель, що сприятиме прозорому обліку забруднених ділянок і залученню інвестицій у їхнє відновлення [52].

Важливим елементом адаптації зарубіжного досвіду є також формування інформаційно-аналітичної інфраструктури. У більшості розвинених країн діють відкриті бази даних щодо стану ґрунтів, доступні для фермерів, науковців і державних структур. Для України створення аналогічної інтерактивної системи на базі супутникових і геоінформаційних технологій дало б змогу не лише відстежувати динаміку забруднення, а й прогнозувати екологічні ризики. Застосування таких систем є ключовим елементом сучасного моніторингу в умовах змін клімату [45].

У перспективі впровадження європейських стандартів управління земельними ресурсами, зокрема положень Стратегії ЄС «Soil Deal for Europe» (2021-2030), може стати орієнтиром для національної політики України. Її цілі - досягнення нейтрального балансу деградації земель і забезпечення сталого використання ґрунтів – повністю узгоджуються з українськими завданнями екологічної та продовольчої безпеки [53].

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для комплексної оцінки рівня забруднення ґрунтів застосовується стандартизований підхід, що включає кілька взаємопов'язаних етапів. На підготовчій стадії проводиться ретельне вивчення технічної документації та історичних даних про досліджувану територію, що дозволяє визначити потенційні джерела забруднення та оптимальні точки відбору проб. Відбір ґрунтових проб здійснюється за допомогою спеціалізованого інструментарію - нержавіючих пробовідбірників діаметром 2-5 см, що забезпечує збереження природної структури зразків. Враховуючи вертикальну міграцію забруднювачів, проби відбираються з трьох глибинних горизонтів: поверхневого (0-20 см), проміжного (20-50 см) та глибокого (50-100 см).

Для отримання репрезентативних результатів застосовуються різні схеми відбору проб у залежності від конфігурації досліджуваної території. На рівномірних ділянках найчастіше використовують метод «конверта», при якому ділянку умовно ділять на п'ять секторів – чотири кути та центр. Такий підхід дозволяє отримати репрезентативні зразки при мінімальній кількості точок відбору, особливо ефективний для невеликих за площею ділянок з відносно однорідним розподілом забруднювачів.

Для витягнутих об'єктів, таких як смуги уздовж доріг, річок чи трубопроводів, оптимальним є діагональний метод. Він передбачає відбір проб через рівні інтервали вздовж умовної діагоналі, що дозволяє врахувати лінійний характер розподілу забруднення. Кількість точок відбору зазвичай становить від п'яти до десяти, залежно від довжини досліджуваної ділянки. Цей метод особливо корисний при моніторингу зон впливу лінійних інженерних споруд.

При дослідженні великих площ з неоднорідним розподілом забруднення застосовують метод випадкового відбору. Територію розбивають на умовні квадрати, а точки відбору визначають за допомогою генератора випадкових

чисел. Такий підхід вимагає більшої кількості проб (не менше десяти на гектар), але забезпечує об'єктивність результатів за рахунок врахування просторової мінливості показників. Особливо важливим є те, що кожен з цих методів передбачає стандартизований підхід до глибини відбору проб – зазвичай це три горизонти: поверхневий (0-20 см), проміжний (20-50 см) і глибокий (50-100 см), що дозволяє простежити вертикальну міграцію забруднювачів.

Для особливо складних випадків, таких як точкові джерела забруднення або дуже неоднорідні ґрунти, застосовують спеціалізовані методи. Радіальний метод, при якому проби відбирають по колах на різній відстані від джерела, дозволяє вивчити зону впливу конкретного об'єкта. Шаховий метод, що передбачає відбір проб у вузлах умовної сітки, забезпечує максимальний охоплення території при дослідженні дуже неоднорідних ґрунтів. Вибір конкретного методу залежить від багатьох факторів, включаючи форму та розмір території, характер розподілу забруднювачів, наявність точкових джерел забруднення, а також доступні ресурси та час на проведення дослідження. Незалежно від обраного підходу, дотримання стандартів кількості та глибини відбору проб є критично важливим для забезпечення статистичної значущості отриманих результатів.

Важливим етапом є правильна консервація та транспортування зразків – проби поміщаються в інертні пластикові контейнери, а для мікробіологічних досліджень використовуються спеціальні стерильні ємності з подальшим зберіганням при температурі +4°C.

Лабораторні дослідження включають комплекс фізичних, хімічних та біологічних методів аналізу. Фізичні методи спрямовані на визначення гранулометричного складу піпетним методом, щільності за методом режучого кільця та пористості шляхом насичення водою. Хімічний аналіз передбачає використання сучасних інструментальних методів: атомно-абсорбційної спектроскопії та мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою для визначення важких металів, інфрачервоної спектроскопії для аналізу нафтопродуктів, газової та рідинної хроматографії для виявлення пестицидів.

Біологічні дослідження включають оцінку мікробіологічної активності, визначення ферментативної активності (дегідрогеназ, фосфатаз) та фітотестування на чутливих тест-об'єктах.

Отримані результати піддаються комплексній статистичній обробці з визначенням середніх значень та похибок вимірювань, порівнюються з гранично допустимими концентраціями згідно з чинними нормативними документами. Для візуалізації результатів використовуються ГІС-технології, що дозволяють створити детальні карти забруднення території. Особливу увагу приділяють розрахунку інтегральних показників забруднення, таких як сумарний показник забруднення (Zc) або індекс геоакумуляції (Igeo), які враховують комбінований вплив різних забруднювачів. Контроль якості результатів забезпечується через використання стандартних зразків, проведення паралельних визначень та міжлабораторних звірок, що гарантує високу достовірність отриманих даних. У рамках дослідження на тему «Оптимізація рівня забруднення грунтів України» нами було проведено експеримент, спрямований на аналіз стану ґрунтів у вибраних ділянках. Метою практичної частини є виявлення основних ознак деградації ґрунтів, визначення їх хімічного та фізичного складу, а також оцінка рівня родючості.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1.1 Аналіз грунту Західних областей України

Нами було проведено 6 відборів грунту, на території декількох західних областей . В ході проведення експериментального дослідження, було вилучино 6 проб грунту, в західних областях України, для подальшого дослідження на предмет забруднення, деградації та вивітрювання ґрунту (рис.1.1).

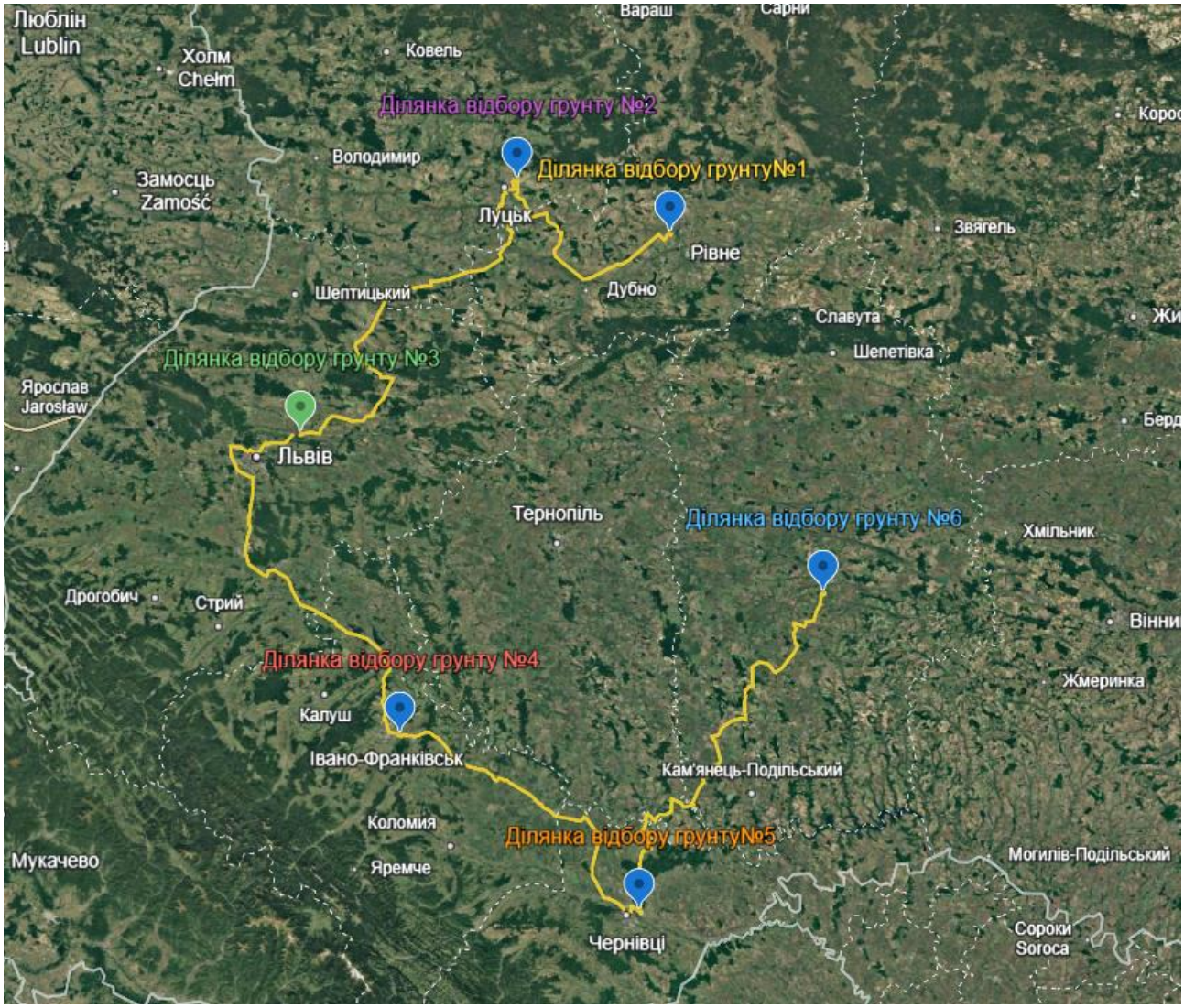


Рисунок 1.1 – Карта західних областей України, з позначками місць відбору грунту

Проба №1 складалася повністю з ясно сірого опідзоленого-ґрунту.

Проба №2 мала в собі дерново-середньо- і слабопідзолисті супіщані і суглинкові ґрунти, характеризувалася високим рівнем переущільнення.

У пробі №3 переважали дерново-середньо-і сильнопідзолисті поверхнево-оглеєні переважно суглинкові ґрунти, спостерігалося значне переущільнення.

Проба №4 представляла собою сірі опідзолені ґрунти, характеризувалася великою ступінню заболоченності, попередньо через те що підземні води пролягали надто близько до поверхні.

Ділянка №5 була явним представником дерново-буроземних ґрунтів, та не мала характерних показників деградації

Ділянка№6 складалася с опідзолених чорноземів, та мала признаки виснаження грунту, через безконтрольне вирощування однієї культури декілька років. У пробах №4 та №5 було виявлено алюмінізацію грунту. Проба №1 мала ознаки карбоксилювання.

3.1.2 Показники Ph у відібраних пробах

Після вимірювання Ph грунту взятого з вказаних ділянок, отримали наступні показники (рис.3.2).

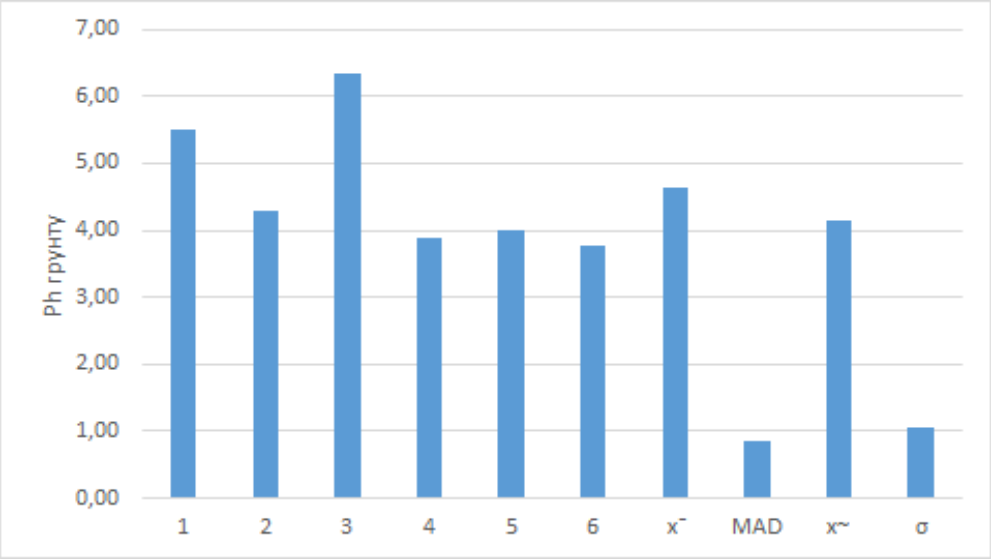


Рисунок 1.2 – Показники Ph у відібраних зразках грунту

$\bar{x}$ – Середнє арифметичне

MAD – Середнє відхилення

x~ – Медіана

σ – Стандартне відхилення

Ph грунту має кисле середовище, це характерно для регіону західної України.

3.1.3 Вміст азоту в відібраних пробах

Внаслідок дослідження вмісту азоту у відібраних пробах, ми отримали наступні показники (рис.1.3).

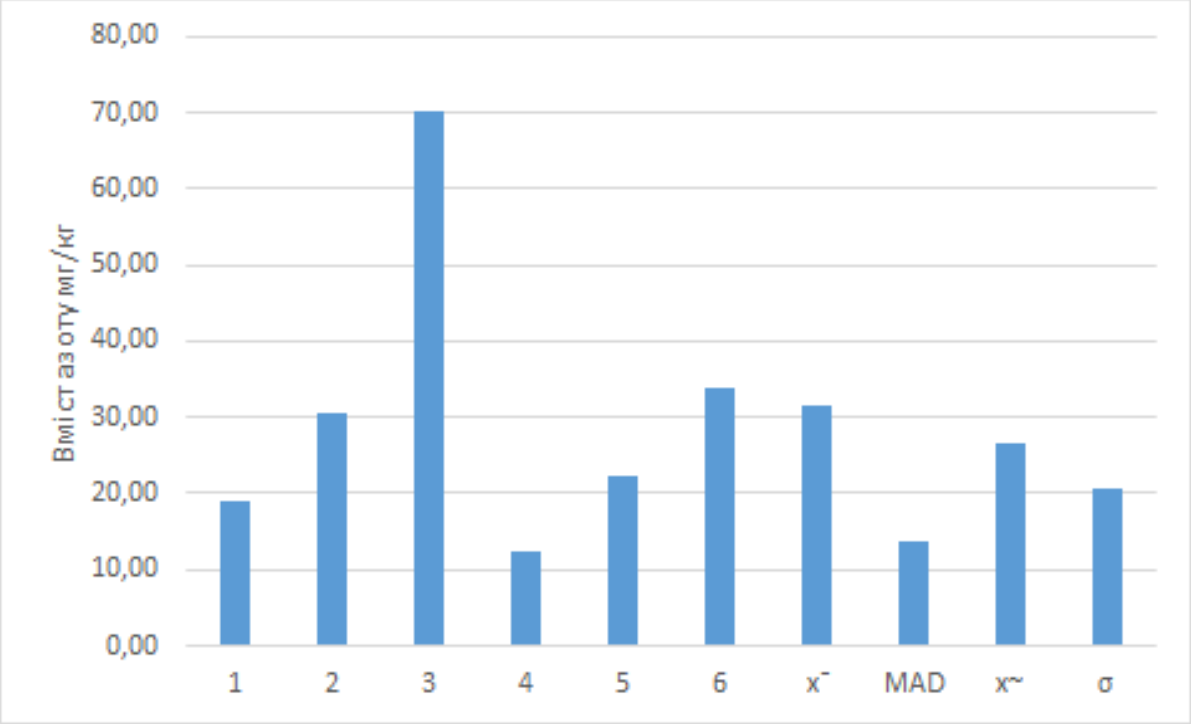


Рисунок 1.3 – Концентрації азоту у відібраних пробах ґрунту

$\bar{x}$ – Середнє арифметичне

MAD – Середнє відхилення

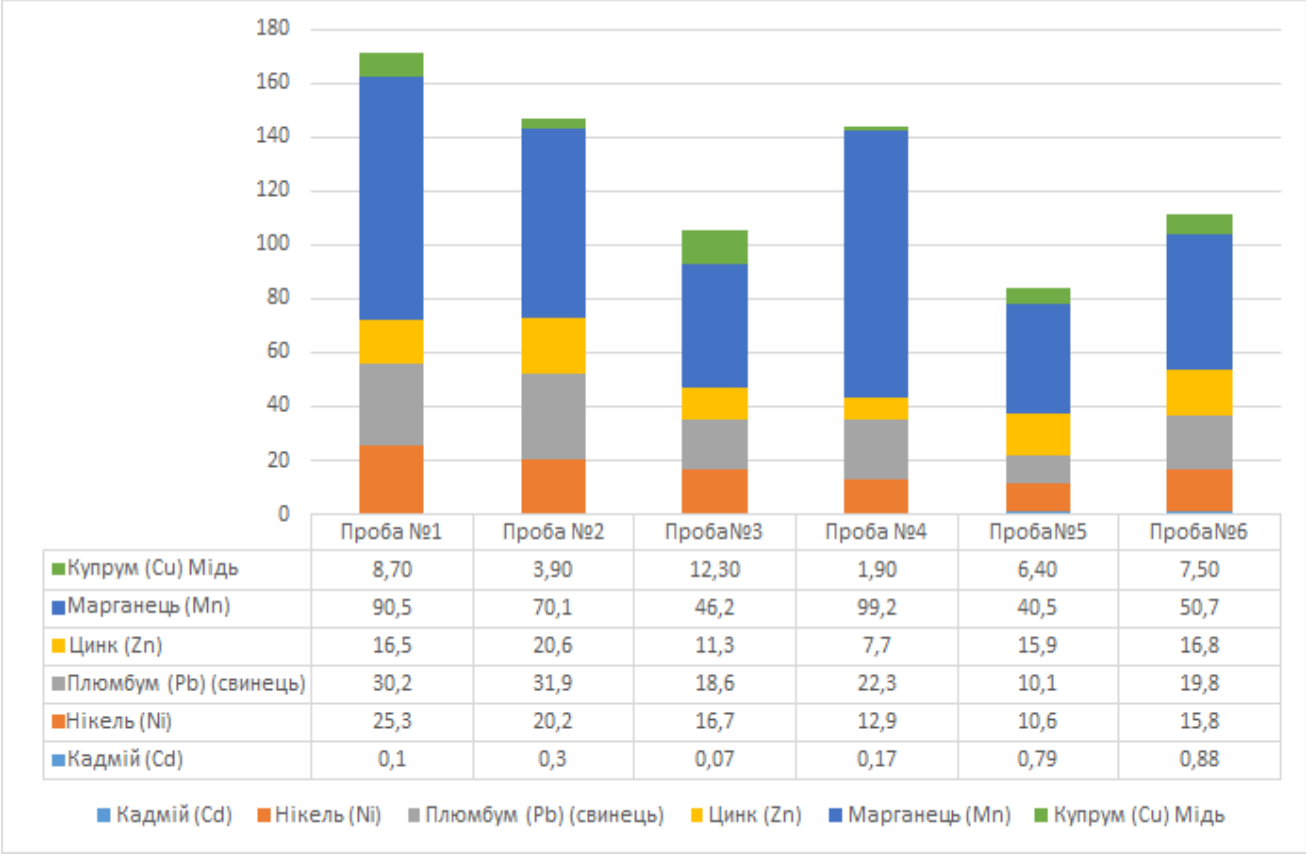
x~ – Медіана

σ – Стандартне відхилення

На даному графіку ми бачимо аномально високий рівень азоту у третій пробі, це пояснюється тим що на ділянці грунту№3, декілька років вирощували бобові рослини, які викликали надлишок азотфіксуючих бактерій у грунті. Інші проби мають вміст азоту у межах норми (до 60 мг/кг).

3.1.4 Вміст важких металів в відібраних пробах

По результатам досліджень, забруднення грунту у відібраних пробах є значним, у пробі №1 та №2 перевищено гранично допустимі концентрації плюмбуму (рис.3.4).



	Проба №1	Проба №2	Проба№3	Проба №4	Проба№5	Проба№6
Купрум (Cu) Мідь	8,70	3,90	12,30	1,90	6,40	7,50
Марганець (Mn)	90,5	70,1	46,2	99,2	40,5	50,7
Цинк (Zn)	16,5	20,6	11,3	7,7	15,9	16,8
Плюмбум (Pb) (свинець)	30,2	31,9	18,6	22,3	10,1	19,8
Нікель (Ni)	25,3	20,2	16,7	12,9	10,6	15,8
Кадмій (Cd)	0,1	0,3	0,07	0,17	0,79	0,88

Рисунок 1.4 – Вміст важких металів у відібраних пробах ґрунту

Гранично допустимі концентрації (ГДК) важких металів у ґрунтах України встановлені на рівні:

Кадмій (Cd): 1,0 мг/кг

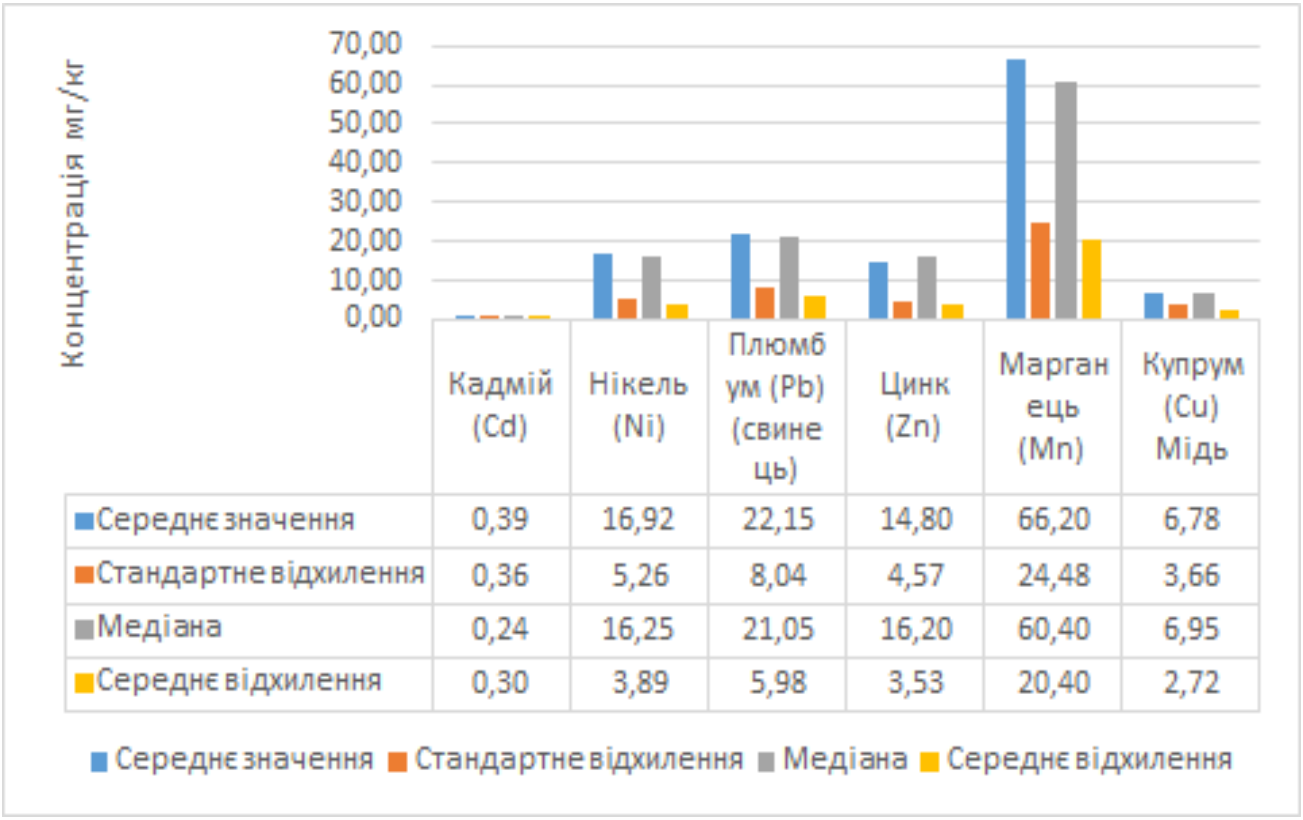
Мідь (Cu): 55,0 мг/кг

Марганець (Mn): 1500,0 мг/кг

Нікель (Ni): 85,0 мг/кг

Свинець (Pb): 30,0 мг/кг

Цинк (Zn): 115,0 мг/кг



	Кадмій (Cd)	Нікель (Ni)	Плюмбум (Pb) (свинець)	Цинк (Zn)	Марганець (Mn)	Купрум (Cu) Мідь
Середнє значення	0,39	16,92	22,15	14,80	66,20	6,78
Стандартне відхилення	0,36	5,26	8,04	4,57	24,48	3,66
Медіана	0,24	16,25	21,05	16,20	60,40	6,95
Середнє відхилення	0,30	3,89	5,98	3,53	20,40	2,72

Рисунок 1.5 – Статистичні показники вмісту важких металів у 6 відібраних пробах ґрунту

Такі показники пояснюються тим, що всі ділянки де ми відбирали грунт, були розташовані поруч з автомобільними дорогами. Перевищення норми плюмбуму у першій та третій пробі, вказує нам на актуальність проблеми забруднення грунтів, та методів очищення грунту від важких металів.

3.2.1 Порівняння методів очищення грунту від забруднення важкими металлами. На прикладі очищення грунту від Pb (плюмбуму).

Порівняння методів зниження вмісту свинцю (Pb) у ґрунті проводилося за наступним алгоритмом:

Метою було оцінка ефективності трьох методів ремедіації (біоремедіація, хелаторне промивання, фіторемедіація) щодо зменшення тотального і мобільного вмісту свинцю в контамінованому ґрунті (~500 мг Pb/kg).

Для проведення експерименту було використано один однорідний масив ґрунту, який штучно забруднено сполуками свинцю до концентрації приблизно 500 мг Pb/кг. Такий підхід забезпечує єдині вихідні умови для всіх проб, що дозволяє коректно порівнювати ефективність різних методів очищення.

У дослідженні передбачено чотири експериментальні варіанти: три дослідні групи та одну контрольну. Перша група (Проба A) передбачає застосування методу біоремедіації – очищення ґрунту за допомогою мікроорганізмів. Для підвищення достовірності результатів проведено три паралельні повтори (A1, A2, A3). Друга група (Проба B) реалізує метод хелаторного промивання, при якому використовуються хімічні реагенти, здатні утворювати комплекси з іонами свинцю, полегшуючи їх вилучення з ґрунту; також виконано три реплікати (B1, B2, B3). Третя група (Проба C) досліджує ефективність фіторемедіації – очищення за допомогою рослин, здатних накопичувати важкі метали; аналогічно виконано три повтори (C1, C2, C3).

Контрольна проба (Проба D) представлена зразком ґрунту, який не піддавався жодному очищенню, що дає змогу оцінити базовий рівень забруднення та порівняти його зі зразками після застосування різних методів ремедіації. Маса кожного зразка становить 2 кг сухої речовини, що забезпечує достатню кількість матеріалу для проведення аналізів та статистичної обробки отриманих результатів.

У ході експерименту застосовувався широкий комплекс матеріалів та реактивів, необхідних для моделювання забруднення, реалізації різних методів очищення ґрунту та проведення подальших аналітичних вимірювань. Основним об’єктом дослідження виступав ґрунт, отриманий із одного джерела, що забезпечує однорідність вихідного матеріалу. Для створення модельного забруднення використовувався стандартизований розчин нітрату свинцю $Pb(NO_3)_2$, який дає змогу точно дозувати концентрацію важкого металу. Усі операції проводилися з використанням дистильованої або деіонізованої води, щоб уникнути сторонніх домішок.

У варіанті біоремедіації застосовувалася жива культура бактерій *Pseudomonas sp.* із концентрацією близько 10^9 КУО/мл для приготування активного інокулюму. Як допоміжні матеріали використовували компост або органічний субстрат, а також мінеральні добрива (N:P:K) для підтримання поживного балансу. Контроль кислотності середовища здійснювався за допомогою буферних розчинів, що стабілізували pH у межах, оптимальних для діяльності мікроорганізмів.

У разі хелаторного промивання використовували реагент EDDS (етилендіамін-N,N'-диянбуршувальна кислота) – екологічно безпечний хелатор, здатний утворювати комплекси зі свинцем і сприяти його вилученню з ґрунту. Для подальшої обробки елюату застосовувався розчин $FeCl_3$, який сприяв осадженню металів і зменшенню токсичності розчинів.

Фіторемедіаційний варіант включав використання рослин-гіперакумуляторів – насіння соняшнику, висіяного у підготовлений ґрунт у горщиках або контейнерах із можливістю дренажу та фільтрації. Для підтримання росту рослин використовувався стандартний ґрунтовий субстрат, збагачений поживними речовинами.

Аналітичні роботи виконували із застосуванням реактивів для визначення вмісту свинцю, стандартів для атомно-абсорбційної спектрометрії (ААС), а також екстрагентів DTPA або 0.01 M $CaCl_2$ для оцінки рухомих форм Pb у ґрунті. Фізико-хімічні параметри визначали за допомогою pH-електрода, вимірювача

електропровідності (ЕС), лабораторних ваг, сушильної шафи та стандартних пробовідбірних інструментів.

Для забезпечення безпеки роботи персоналу використовували засоби індивідуального захисту (PPE): хімічно стійкі рукавички, респіратори класу P2/P3, захисні окуляри, лабораторні халати, а також спеціальні засоби для миття й нейтралізації можливих хімічних проливів.На етапі підготовки проб та створення модельного забруднення однорідно перемішаний ґрунт був попередньо висушений до сталої маси, що забезпечило стабільність показників вологості та точність подальших розрахунків. Після цього готувався розчин нітрату свинцю $Pb(NO_3)_2$, кількість якого розраховували таким чином, щоб у сухій масі ґрунту досягти концентрації приблизно 500 мг Pb/кг. Отриманий розчин рівномірно вносили до ґрунту з одночасним ретельним перемішуванням, що гарантувало однорідний розподіл свинцю по всьому об’єму зразка.

Після внесення розчину зразки залишали на стабілізацію протягом 7 днів, підтримуючи вологість на рівні близько 60% від повної польової вологоємності (ППВ). Цей період був необхідний для встановлення рівноваги між твердою та рідкою фазами ґрунту, а також для природного фіксування іонів свинцю у ґрунтовій структурі.

Після завершення стабілізації проводили відбір проб для початкового аналізу, що позначався як етап t_0. На цьому етапі визначали основні параметри ґрунту: загальний вміст свинцю (тотальний Pb), вміст рухомих форм металу (мобільний Pb), показник кислотності (pH), вміст органічної речовини та електропровідність (ЕС). Отримані результати t_0 використовували як базові для подальшого порівняння змін після застосування різних методів ремедіації. Незначне коливання показників пояснюється похибкою обладнання. У рамках подальших експериментів після етапу t_0 до заражених зразків вносили обрані ремедіаційні агенти залежно від напрямку дослідження: хелатуючі сполуки (ЕДТА), органічні сорбенти (торф, біовугілля), мінеральні матеріали (цеоліт, бентоніт), а також біологічні препарати, що містять активні штами мікроорганізмів.

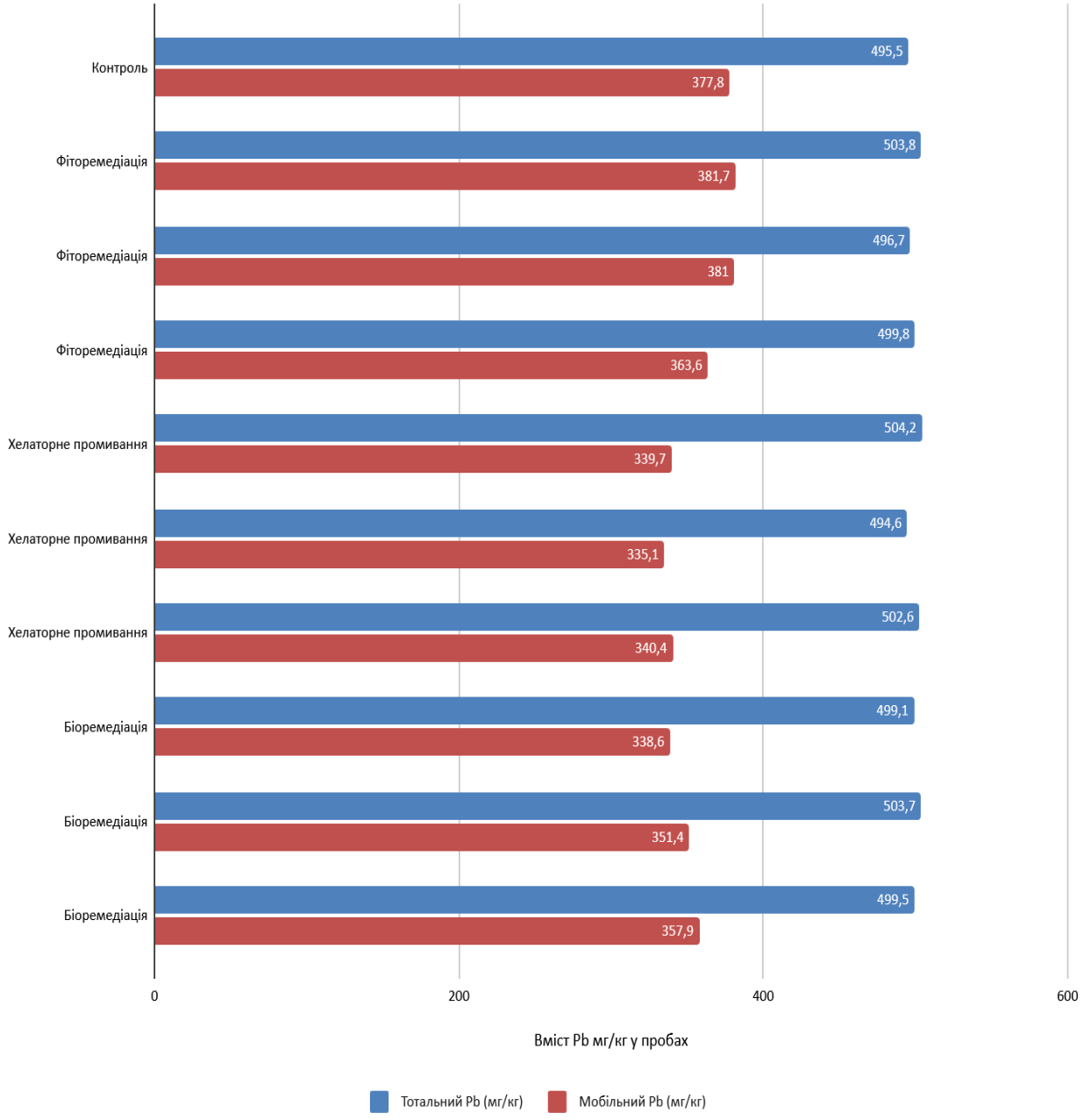


Рисунок 2.1 – Вміст Свинцю у зразках грунту до експерименту.

Протягом усього періоду експозиції (28–60 діб залежно від дослідної серії) регулярно контролювали вологість, температуру та умови освітлення, щоб уникнути стресових факторів і забезпечити стабільність середовища. Один раз на 7–10 днів здійснювали проміжний відбір проб для визначення динаміки зниження концентрації Pb у ґрунтовій масі.

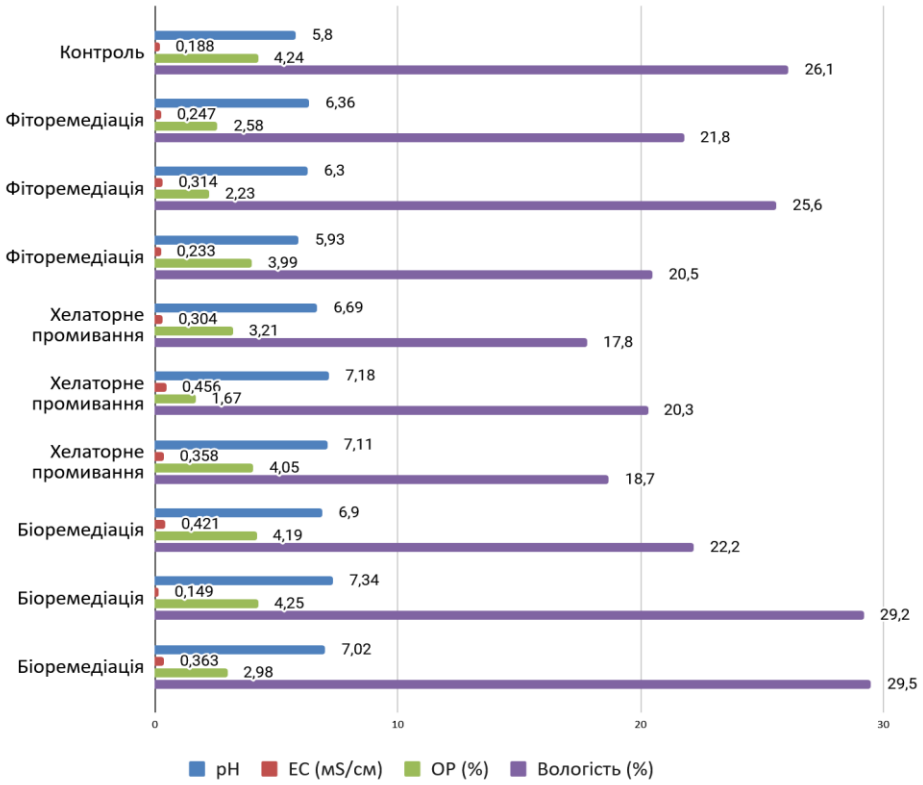


Рисунок 2.2 – Додаткові показники грунту у пробах перед проведенням експерименту

Ми бачимо рівномірне забруднення, коливання показників мінімальне, та пов’язане з похибкою вимірювального обладнання.

3.2.2 Біоремедіація (A1–A3)

У варіанті біоремедіації для кожного зразка (A1, A2, A3) проводилося підготовлення робочої суспензії мікроорганізмів *Pseudomonas sp.*. Культуру розводили до концентрації, яка забезпечувала наявність приблизно 10^6–10^7 клітин на грам ґрунту після внесення. Отриманий інокулюм рівномірно додавали до попередньо підготовленого забрудненого ґрунту.

Разом із мікробною культурою вносили органічну добавку - компост у кількості 2–5% від маси зразка, а також невелику дозу мінерального азоту

(близько 100 мг N/кг ґрунту) у складі мінеральних добрив. Таке поєднання сприяло активізації мікробної біомаси й забезпечувало оптимальні умови для біохімічних процесів розкладу та зв’язування свинцю.

Після внесення всіх компонентів зразки ретельно перемішували до однорідного стану, поміщали у герметичні контейнери з кришками, обладнаними вентиляційними отворами для підтримання газообміну. Інкубацію здійснювали при температурі 25–30 °C, контролюючи вологість ґрунту на рівні, достатньому для мікробіологічної активності.

Відбір проб здійснювали тричі - на 1-му, 6-му та 12-му тижні експерименту. Для кожного етапу проводився комплексний аналіз, який включав визначення рухомих форм свинцю (екстрагентами DTPA або 0.01 M $CaCl_2$), загального вмісту Pb методом атомно-абсорбційної спектрометрії (ААС), показника pH, вологості ґрунту, чисельності мікроорганізмів (методами підрахунку колоній або МА), а також вмісту органічної речовини. Отримані результати дозволяли відстежувати динаміку очищення ґрунту під дією мікробіологічного впливу.

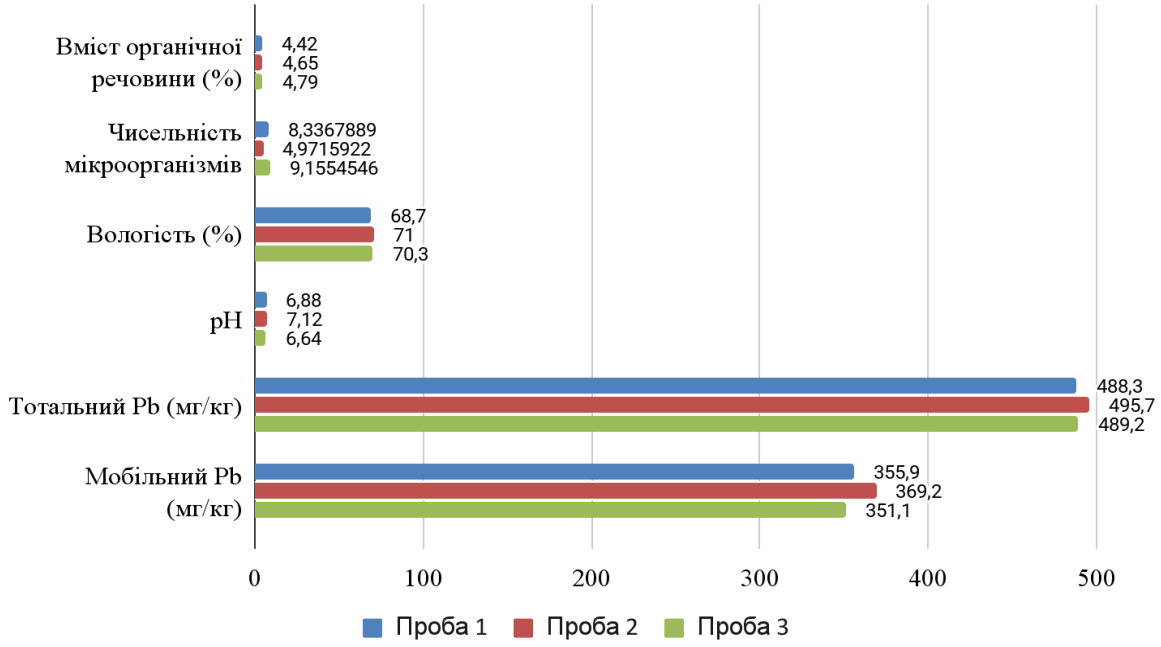


Рисунок 2.3 – Показники після 1 тижня експерименту (Біоремедіація)

Спостерігаємо незначне падіння рівня забруднення, чисельність організмів ще не досягла піку. Процесс очищення набирає оберти.

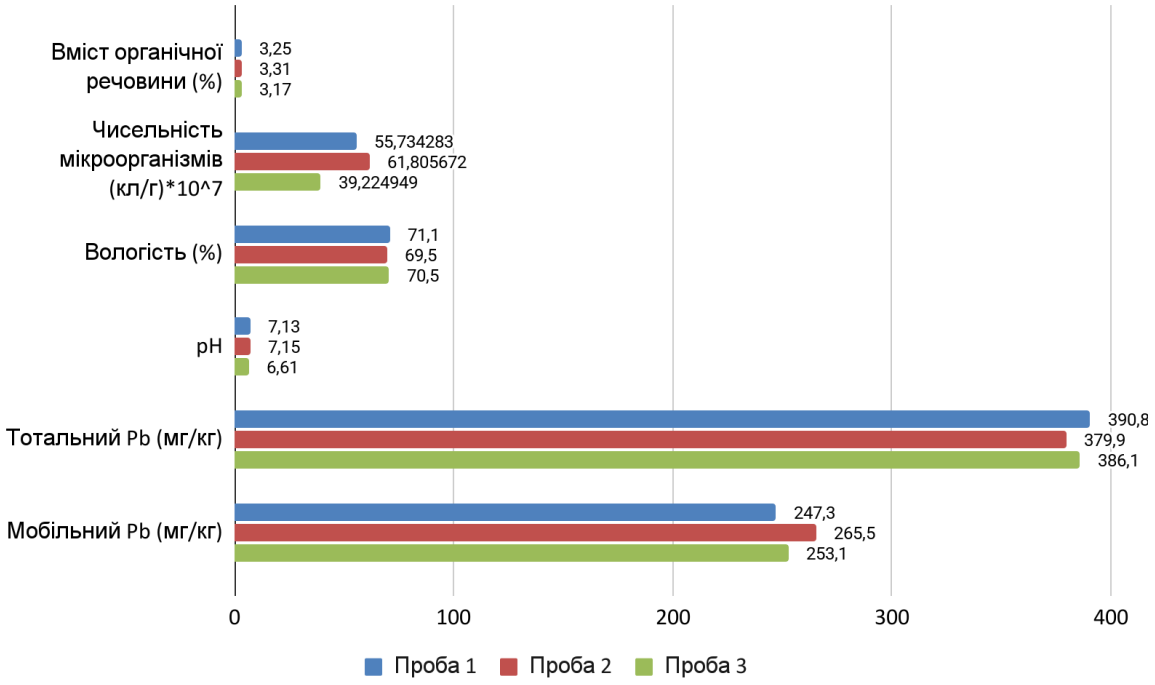


Рисунок 2.4 – Показники після 6 тижня експерименту (Біоремедіація)

Значне зменшення забруднення, пік кількості мікроорганізмів. Процесс очищення досягнув свого піку.

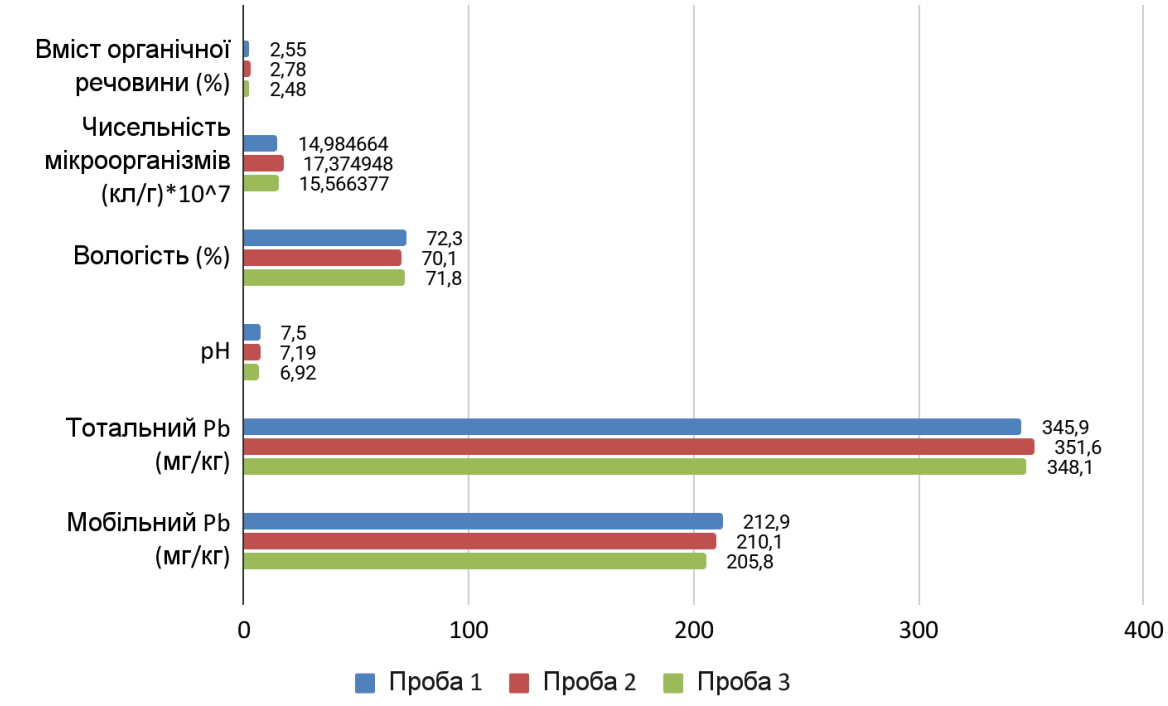


Рисунок 2.5 – Показники після 12 тижня експерименту (Біоремедіація)

Падіння чисельності мікроорганізмів, пов’язан з падінням рівня органічної речовини. Колонії бактерій у пікових чисельностях швидко витратили поживні речовини, та їх чисельність почала зменшуватись.

3.2.3 Хелаторне промивання (B1–B3)

У варіанті хелаторного промивання для кожного зразка (B1, B2, B3) проводився етап пілотного очищення з використанням розчину EDDS - екологічно безпечного хелатора, здатного ефективно утворювати комплекси зі свинцем. Концентрація робочого розчину становила 0.05–0.1 М, а співвідношення рідини до ґрунту підтримувалося на рівні 10:1 (v/w). У нашому випадку для 2 кг ґрунту використовували 20 літрів хелатуючого розчину.

Процес промивання здійснювали в контейнері шляхом ретельного перемішування ґрунту з розчином протягом визначеного часу для максимального контакту реагенту з частинками ґрунту. Після цього суміш фільтрували через фільтрувальний папір, а отриманий фільтрат (елюат) збирали для подальшої обробки.

З метою нейтралізації та осадження свинцю до елюату додавали розчин $FeCl_3$ у концентрації 1–2 г/л. Це сприяло підвищенню pH і випадінню у осад гідроксиду свинцю $Pb(OH)_2$. Осад відокремлювали шляхом повторної фільтрації, після чого проводили визначення вмісту свинцю в очищеному елюаті для оцінки ефективності вилучення металу.

Промитий ґрунт додатково обробляли дистильованою водою у 2–3 об’ємах для видалення залишків EDDS і продуктів реакції. Після промивання зразки висушували до повітряно-сухого стану, готуючи до аналітичних вимірювань.

Контроль параметрів проводився у кілька етапів: одразу після промивання, через 7 днів та через 4 тижні після процедури. На кожному етапі визначали загальний (тотальний) та рухомий вміст свинцю, показник pH і

електропровідність (EC), що дозволяло відстежити стабільність ґрунтового середовища після обробки.

Після завершення всіх необхідних аналізів елюати дезактивували та утилізували відповідно до встановлених правил і норм техніки безпеки. У разі потреби рідкі залишки тимчасово зберігали у спеціальних ємностях і передавали для подальшої утилізації або стабілізації осадів у спеціалізованих лабораторіях.

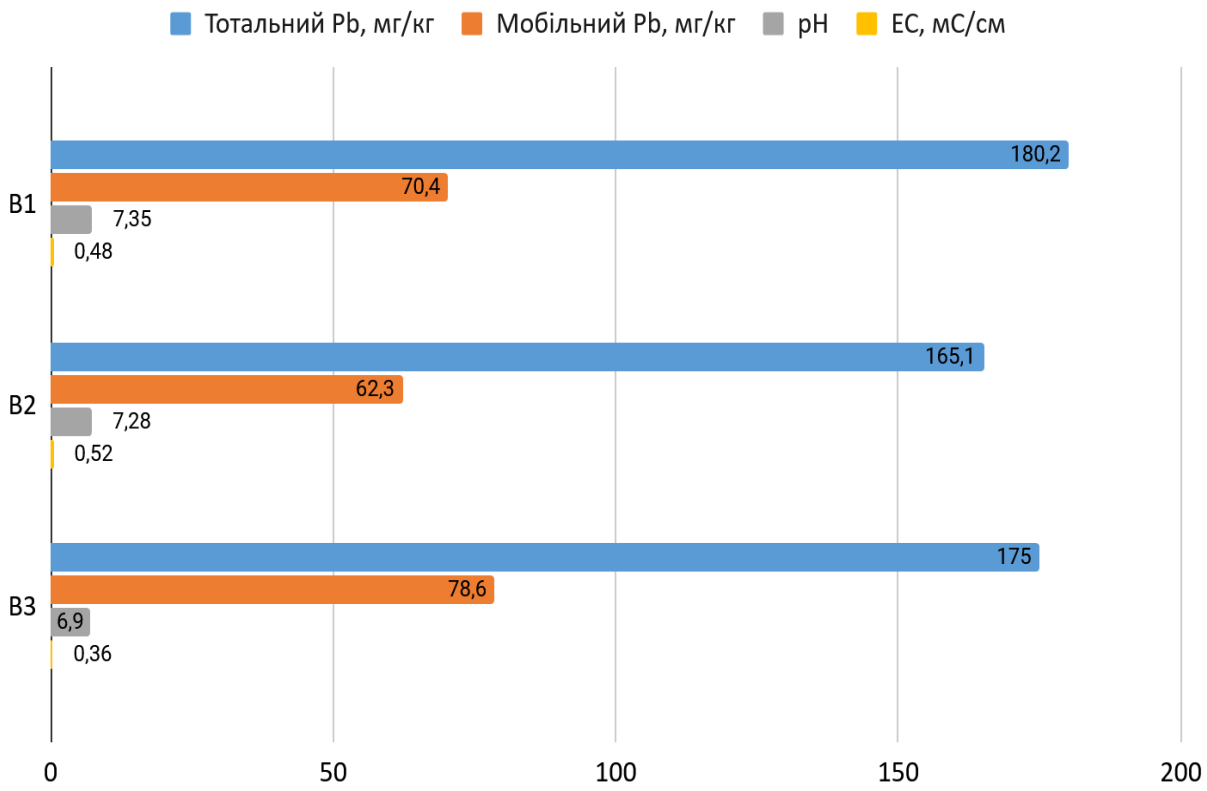


Рисунок 2.6 – Результати одразу після промивання

Промивання на відміну від інших методів, дає найкращі показники одразу після процедури. Тотальний вміст Pb зменшився до рівня 165,1–180,2 мг/кг, тоді як мобільний Pb коливається в межах 62,3–78,6 мг/кг, що свідчить про ефективне вилучення важкого металу з ґрунтового профілю. Зниження мобільної форми Pb є особливо важливим, оскільки саме вона визначає потенційну токсичність для рослин і мікроорганізмів.

Показники кислотності (pH) після промивання залишаються у нейтрально-слабколужному діапазоні (6,9–7,35), що є сприятливим для росту більшості культурних рослин і не призводить до значного вторинного мобілізування металів. Електропровідність (EC) ґрунту незначна (0,36–0,52 мС/см), що свідчить про низький рівень залишкових солей.

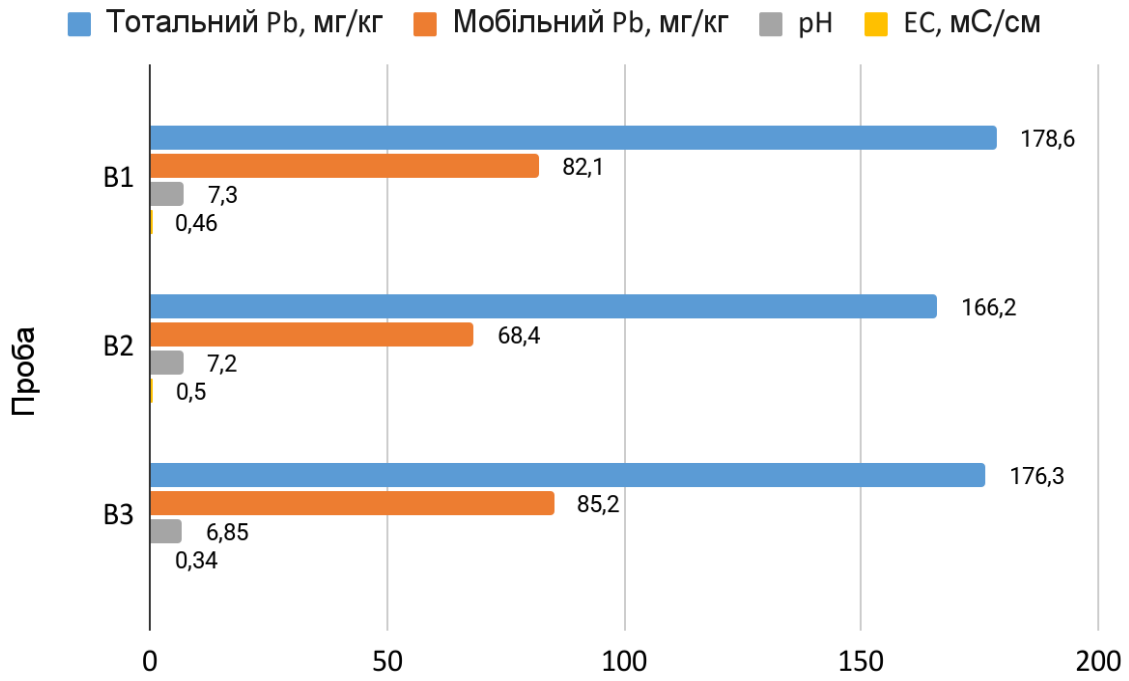


Рисунок 2.7 – Результати через 7 днів після промивання

Показники загального Pb коливаються в межах похибки приладів вимірювання, тоді як показник вільного плюмбуму має тенденцію до незначного підвищення, все через те що під дією різних чинників (зокрема вологості та зміни Ph) молекулы свинцю вивільняються з не активних сполук, та переходят у активні (зокрема оксиди). Додатково варто зазначити, що коливання кислотності ґрунту може істотно впливати на хімізм поведінки Pb. За умов підкислення порушується стабільність карбонатних та гідроксидних форм свинцю, що сприяє розчиненню мінеральних комплексів і зростанню концентрації мобільного металу в рідкій фазі.

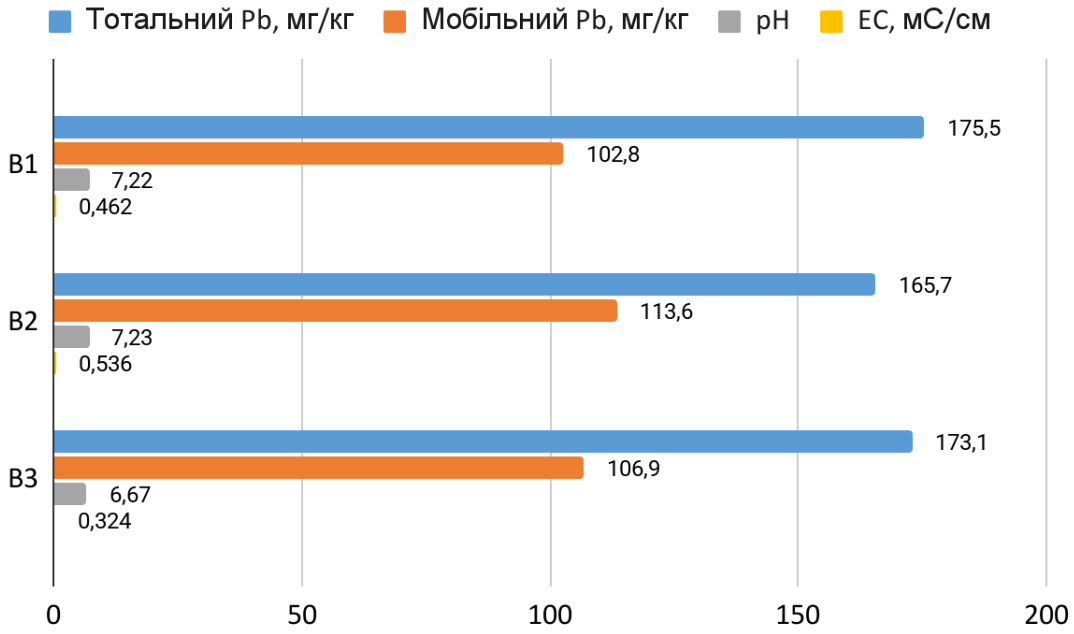


Рисунок 2.8 – Результати через 4 тижня після промивання

Спостерігаємо більш значне підвищення рівня мобільного плюмбуму. Це доводить нам що плюмбум у грунті сам по собі має тенденції до вивільнення у мобільні форми, що робить цей важкий метал особливо небезпечним у разі забруднення. На інтенсивність процесу вивільнення впливає рівень РН середовища, вологість, температура грунту та навколишнього середовища.

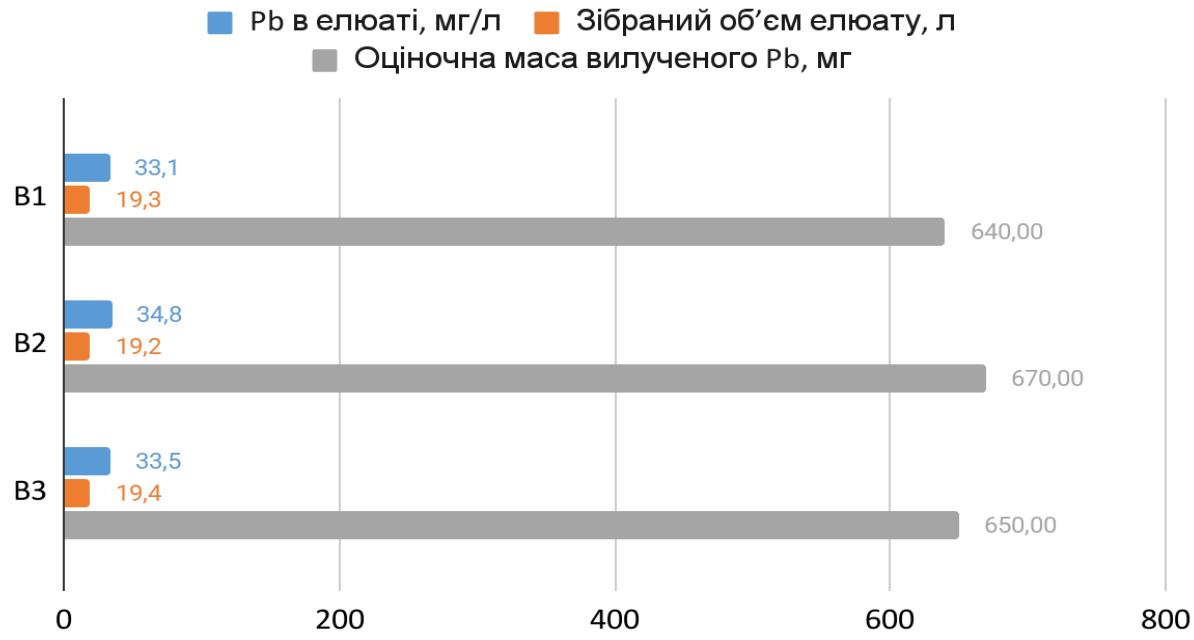


Рисунок 2.9 – Показники плюмбума в елюаті після промивання

Бачимо загальну кількість вилученого плюмбуму з двох кілограм грунту, об’єм зібраного елюату та концентрацію Pb в елюаті (мл)

3.2.4 Фіторемедіація (С1–С3)

У варіанті фіторемедіації для кожного зразка (С1, С2, С3) у підготовлений забруднений ґрунт висівали однакову кількість насіння соняшнику - рослини, що належить до групи гіперакумуляторів і здатна ефективно поглинати важкі метали з ґрунтового середовища. Посів здійснювали у контейнери з дренажними отворами, заповнені рівною кількістю ґрунту, що забезпечувало однорідність умов для росту рослин.

Для росту соняшників створювали оптимальні умови: освітлення з режимом близько 12 годин світла та 12 годин темряви, температуру в межах 20–25 °С, а також регулярний полив для підтримання вологості ґрунту на рівні, сприятливому для розвитку кореневої системи.

Відбір проб ґрунту проводили кілька разів: до висіву насіння (етап t_0), через 2 тижні, 4 тижні, а також після завершення вегетаційного періоду. У відібраних зразках визначали вміст рухомих і загальних форм свинцю, що дозволяло оцінити динаміку очищення ґрунту в процесі росту рослин.

Через 4–6 тижнів після посадки здійснювали збирання рослинної біомаси. Відібрані зразки розділяли на кореневу частину та надземну масу (стебла, листя), після чого визначали їхню свіжу й суху масу, а також вміст свинцю в кожній фракції за допомогою атомно-абсорбційного аналізу. Це давало змогу оцінити ступінь акумуляції металу окремими органами рослин.

Отримана біомаса розглядалася як небезпечний відхід через підвищений вміст важких металів. Тому після завершення досліду вона підлягала належній

утилізації або передачі на спеціалізовані підприємства для термічної обробки чи стабілізації відповідно до вимог екологічної безпеки.

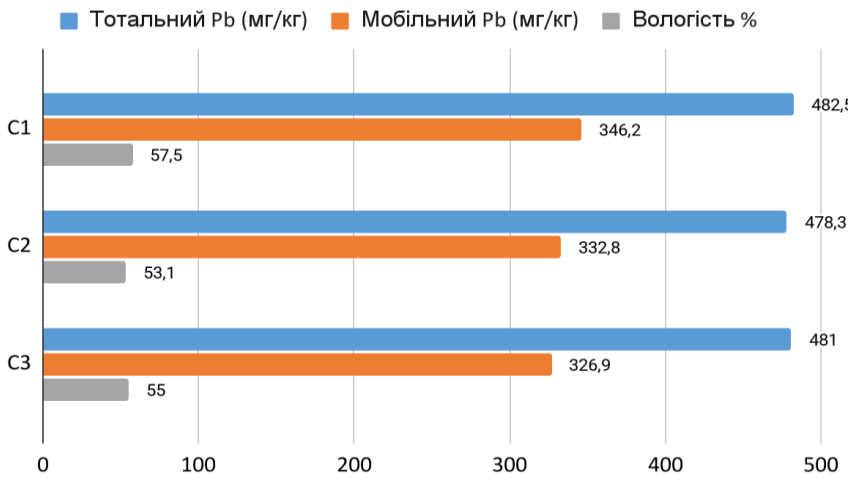
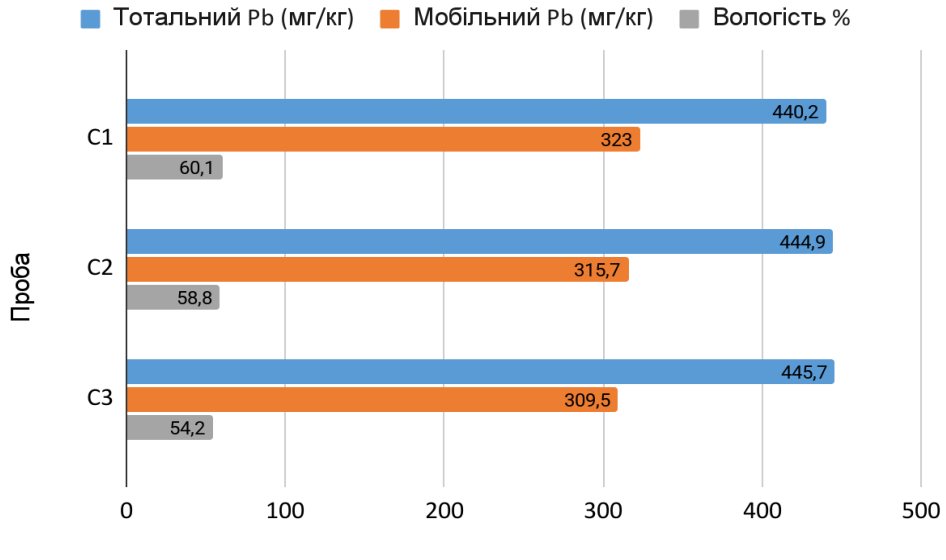


Рисунок 2.10 – Показники Плюмбуму на другий тиждень експерименту (Фіторемедіація)

Бачимо тенденцію до незначного зменшення рівня забруднення, на другому тижні коренева система соняшника ще не досягла необхідного рівня розвитку, щоб забезпечити більш швидкісне поглинання плюмбуму.



я

Рисунок 2.11 – Показники Плюмбуму на четвертий тиждень експерименту (Фіторемедіація)

Спостерігаємо більш значний рівень падіння свинцю, фіксуємо сталу тенденцію до падіння рівня забруднення. Рівень вологості зберігається на показниках 50-60%, це оптимальні показники для швидкого розвитку рослин. Частка мобільного Pb становить близько 70-73% від загального вмісту, що демонструє зменшення його біодоступності порівняно з початковими етапами експерименту.

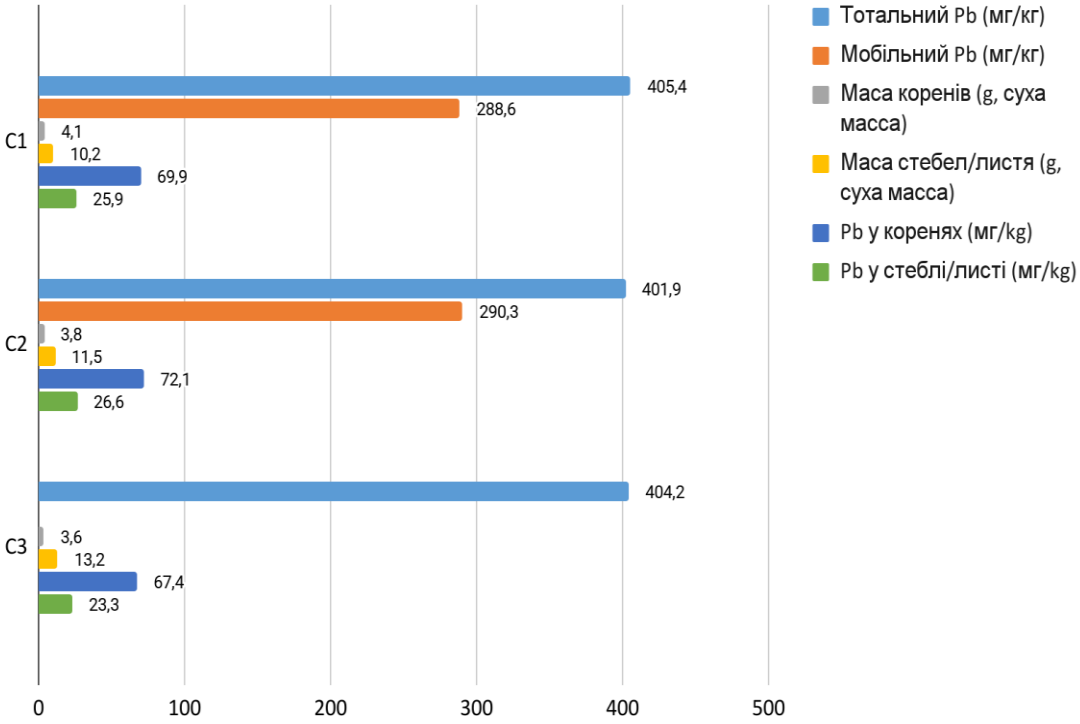


Рисунок 2.12 – Показники Плюмбуму на шостий тиждень експерименту (Фіторемедіація)

На шостому тижні експерименту, відзначаємо що рівень забруднення зменшився приблизно на 90-100 мг, що для цього методу є зразковим показником, за такий період часу. Збираємо рослини та вимірюємо рівень плюмбуму в їх біомассі. Приходимо к висновку що більшість молекул плюмбуму залишилось в корневій системі рослин.

Безпека та утилізація відходів

Всі маніпуляції із забрудненим ґрунтом і елюатами проводились у засобах індивідуального захисту.

Висновок: Отже, ми спостерігаємо різну ефективність цих трьох методів, але всі вони так чи інакше мають впевнений результат по очищенню грунту. На основі отриманих показників, ці методи як мінімум можна вважати життєздатними, та вважати їх дієвими інструментами по очищенню грунту від важких металів.

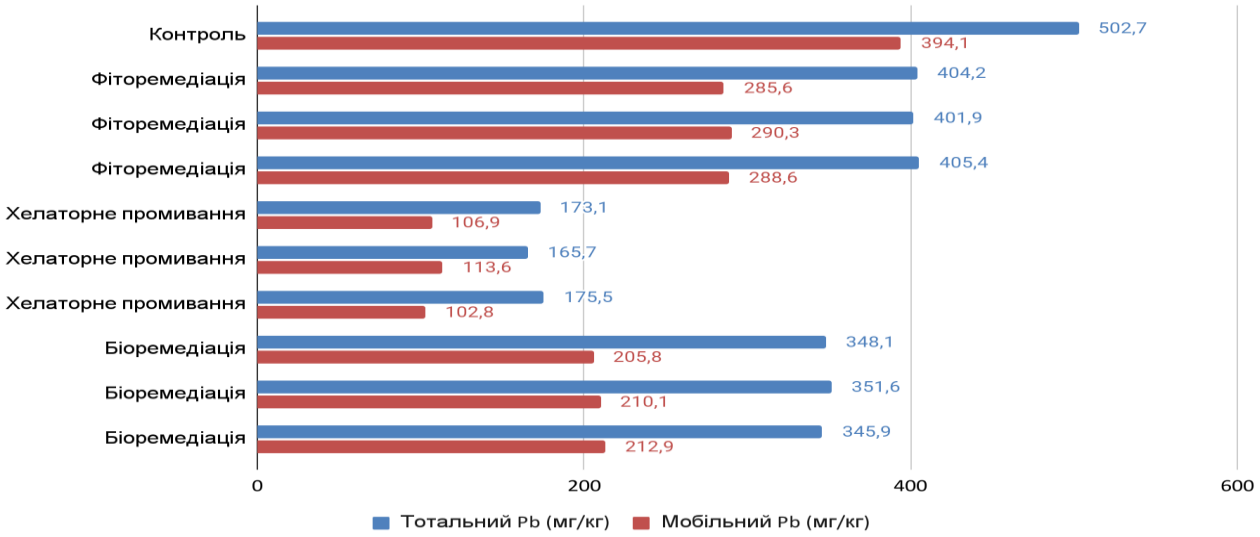


Рисунок 2.13 – Фінальні показники всіх методів очищення

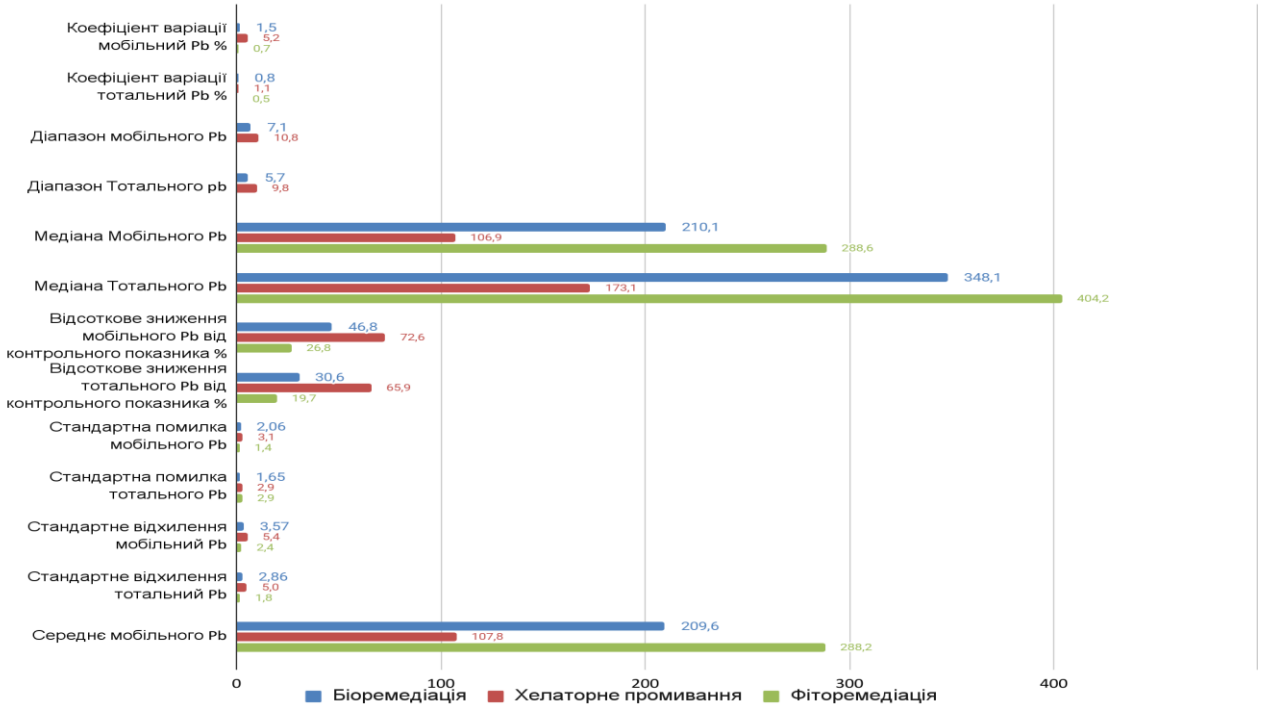


Рисунок 2.14 – Статистичні показники фінальних даних

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Під час виконання цієї роботи мені доводилося працювати як у лабораторних, так і в польових умовах, причому в різні пори року. Для того, щоб застерегти себе від негативного впливу факторів зовнішнього середовища, а також від можливих ризиків, пов'язаних із забрудненим ґрунтом, я мав дотримуватись правил техніки безпеки, поводження з небезпечними речовинами та роботи з потенційно токсичними об'єктами [50,51].

Під час збору та транспортування ґрунтових зразків необхідно використовувати засоби індивідуального захисту (PPE): захисні рукавички, лабораторний халат, щільне взуття, захисні окуляри та респіратор. У разі пошкодження шкіри чи слизових оболонок варто негайно промити уражену ділянку великою кількістю води, обробити антисептиком і звернутися за медичною допомогою [53].

Першою небезпекою при роботі є вплив температурних факторів у польових умовах. Під час тривалого перебування на сонці з незахищеною головою може виникнути тепловий удар, що проявляється почервонінням шкіри обличчя, сильним головним болем, збудженням, у тяжких випадках – судомами. У таких ситуаціях необхідно перемістити потерпілого до затіненого місця, прикласти до голови вологу прохолодну тканину та дати пити холодну воду. При тривалому впливі сонячного випромінювання можливі сонячні опіки, що проявляються почервонінням і набряками шкіри. Допомога полягає у змочуванні уражених ділянок антисептичними розчинами або охолодженій воді [55].

Під час зимових виїздів існує ризик загального переохолодження та обморожень. У таких випадках потерпілого необхідно зігріти, дати гарячий чай чи їжу. При легкому обмороженні кінцівку слід поступово відігрівати у воді від кімнатної температури до +37 °C. Категорично заборонено терти обморожені ділянки. У випадках тяжких ушкоджень (міхурі, відмирання тканин) потерпілого необхідно терміново доставити до медичного закладу [56].

У польових умовах можливі також механічні ушкодження (розтягнення, вивихи, порізи). При розтягненні чи ударах слід накласти холодний компрес та забезпечити спокій ушкодженій ділянці. При порізах – обробити рану антисептиком та накласти стерильну пов’язку. Особливу увагу слід приділяти уникненню прямого контакту відкритих ран із ґрунтом, що містить важкі метали [57,54].

Робота у степовій зоні може супроводжуватися небезпекою ураження кліщами або контактом з іншими біологічними агентами. Для захисту слід використовувати закритий одяг, після роботи проводити самоогляд. У разі виявлення кліща його необхідно видалити, а місце укусу обробити антисептиком [59].

Особлива увага приділялася хімічним небезпекам. При поводженні з елюатами та реагентами (EDDS, $FeCl_3$ тощо) необхідно працювати у рукавичках, захисних окулярах та респіраторі. Всі маніпуляції з ґрунтом, що містить важкі метали, та з промивними розчинами проводилися у PPE (засобах індивідуального захисту), з дотриманням інструкцій хімічної безпеки. У випадку проливу розчинів забруднену поверхню необхідно негайно нейтралізувати та утилізувати відходи відповідно до вимог безпеки [58].

Також важливим аспектом безпеки є поводження з відходами, що утворюються під час лабораторних досліджень. Відходи, які містять важкі метали, кислоти, органічні розчинники чи інші токсичні сполуки, не можна зливати в каналізацію. Вони мають збиратися в окремі ємності, промарковані відповідними етикетками, та передаватися на спеціалізовану утилізацію відповідно до вимог екологічного законодавства України [62]. При роботі з кислотами або лугами потрібно мати під рукою нейтралізуючі речовини (наприклад, содовий або оцтовий розчин), а при роботі з реагентами, що містять важкі метали, – сорбційні матеріали для аварійного поглинання розливів[59].

Не менш важливим є дотримання ергономічних вимог. Під час тривалої роботи за лабораторним столом необхідно забезпечувати достатнє освітлення, правильну позу тіла та регулярні перерви. Недотримання цих правил може

призвести до перевтоми, погіршення зору або травм опорно-рухового апарату. Особливу увагу слід приділяти вентиляції приміщень, адже навіть незначні концентрації токсичних парів у повітрі можуть мати накопичувальний ефект [58].

Окремим чинником під час виконання досліджень був військовий час. Роботи проводилися виключно у відносно безпечних місцях. Усі учасники дотримувались правил поведінки під час сигналів повітряної тривоги: при необхідності робота негайно припинялась, усі зразки та реагенти безпечно консервувались, а персонал переміщувався у захисні споруди.

Додатково, з огляду на умови воєнного часу, перед початком кожного польового виїзду здійснювалася перевірка безпекової ситуації в районі досліджень. Команда мала аптечку, заряджені засоби зв’язку, засоби індивідуального захисту та план евакуації у разі надзвичайних ситуацій. Такі заходи дозволяли мінімізувати ризики для учасників польових досліджень і забезпечити безпечне виконання експериментальної частини навіть у складних умовах [55]

Таким чином, під час виконання експериментальної частини роботи я дотримувався комплексу правил техніки безпеки, що включали як загальні вимоги роботи у польових умовах, так і спеціальні заходи при роботі з токсичними речовинами та забрудненим ґрунтом [60].

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи магістра була досягнута мета і виконані всі завдання: проведено огляд літератури з обраної тематики, визначенні необхідні методи досліджень, зібрано достатньо експериментальних даних які було проаналізовано та оброблено.

У проведеному дослідженні було визначено ефективність різних методів очищення ґрунту від свинцю за показниками вмісту тотального та мобільного Pb. Найнижчі значення отримано при застосуванні хелаторного промивання (≈171 мг/кг для тотального Pb та ≈108 мг/кг для мобільного Pb), що свідчить про найвищу ефективність цього методу у зниженні забруднення. Біоремедіація показала середній рівень ефективності (≈349 мг/кг та ≈210 мг/кг відповідно), тоді як фіторемедіація забезпечила найменший ефект (≈404 мг/кг та ≈289 мг/кг), але при цьому характеризувалася найменшою варіабельністю результатів. Контрольний зразок мав найвищі значення свинцю (502,7 та 394,1 мг/кг), що підтвердило суттєвий вплив застосованих методів.

Кожен із методів має свої переваги та недоліки.

– Хелаторне промивання забезпечує найшвидше та найефективніше видалення свинцю з грунту, проте його мінус полягає у високій варіабельності результатів і необхідності подальшої утилізації або деактивації розчинів, що змивають важкі метали, оскільки вони залишаються високотоксичними.

– Біоремедіація є більш природним і екологічним способом, який дозволяє суттєво знизити рівень свинцю без утворення додаткових токсичних відходів. Водночас її недоліком є потреба у суворому дотриманні умов вологості, аерації та температури для підтримання активності мікроорганізмів, що робить процес технологічно складним.

– Фіторемедіація є найдовшим за часом методом, оскільки вимагає кількох сезонів росту рослин для досягнення відчутного ефекту. Однак її перевага полягає у простоті застосування, меншій вибагливості до умов

середовища порівняно з біоремедіацією та відсутності необхідності в утилізації агресивних хімічних розчинів. Незважаючи на найменший рівень очищення, цей метод вважається найбільш екологічно безпечним і стабільним за результатами.

Таким чином, вибір оптимального методу залежить від поставлених завдань: для швидкого та максимального зниження забруднення доцільно застосовувати хелаторне промивання, для більш екологічно безпечного і довготривалого результату - фіторемедіацію, а біоремедіація може виступати компромісним варіантом, але потребує ретельного контролю умов середовища.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Руденко Л. Г., Маринич О. М. Екологічна безпека : підручник. Київ : Либідь, 2018. 352 с.

2. Ковальчук І. Пестициди та довкілля: проблеми та перспективи. *Екологічний вісник.* 2020. № 3. С. 22–29.

3. Soil Pollution: A Hidden Reality. Rome : FAO, 2018. 142 p.

4. World Health Organization. Preventing disease through healthy environments: exposure to soil pollution. Geneva : WHO, 2019. 64 p.

5. Зубенко В. М. Ґрунтознавство : навч. посіб. Харків : ХНАУ, 2021. 278 с.

6. Державна служба геології та надр України. Звіт про стан ґрунтових ресурсів. Київ : Б. в., 2022.

7. Вітвицький Я. Екологічні аспекти забруднення ґрунтів антропогенними чинниками. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія»*. 2021. Вип. 35. С. 55-62.

8. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Київ : Міндовкілля, 2022.

9. Кучеренко В. І. Екологічне управління: теорія та практика. Київ : КНЕУ, 2019. 412 с.

10. Вишневський В. І. Забруднення ґрунтів: регіональні аспекти. Дніпро : Вид-во ДНУ, 2020. 196 с.

11. United Nations Environment Programme (UNEP). Global Chemicals Outlook II. Geneva : UNEP, 2019.

12. Європейське агентство з навколишнього середовища (EEA). Soil pollution and health risks. Copenhagen : EEA, 2020.

13. Мельник С. В. Шляхи відновлення якості ґрунтів України. Агроекологія. 2021. № 4. С. 35-41.

14. Глущенко Л. Нові підходи до оцінки стану ґрунтів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.* Серія «Екологія». 2022. № 17. С. 75-83.

15. Сохацький М. В. Практичні аспекти впровадження програм охорони ґрунтів в Україні. *Екологія і природокористування*. 2022. № 2. С. 41-48.

16. Ковальчук І. Ґрунтознавство : підручник. Київ : Либідь, 2020. 368 с.

17. Руденко Л. Г. Екологічні функції ґрунтів. Київ : Академія, 2019. 254 с.

18. World Health Organization. Preventing disease through healthy environments: exposure to soil pollution. Geneva : WHO, 2019.

19. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Київ : Міндовкілля, 2022.

20. Кучеренко В. І. Екологічне управління: теорія та практика. Київ : КНЕУ, 2019. 412 с.

21. Зубенко В. М. Ґрунти України : навч. посіб. Харків : ХНАУ, 2021. 276 с.

22. FAO. Status of the World’s Soil Resources. Rome : FAO, 2015.

23. Мельник С. В. Сірі лісові ґрунти: агрономічні особливості. *Агроекологія*. 2020. № 4. С. 35-42.

24. Гриценко Т. В. Ґрунти Полісся: сучасний стан та проблеми. Житомир : Вид-во ЖДУ, 2018. 148 с.

25. Лаврик О. В. Каштанові ґрунти південного степу України. Одеса : Астропринт, 2019. 204 с.

26. Бойко П. Карпатські ґрунти: структура і функції. Львів : Видавництво ЛНУ, 2020. 212 с.

27. Єгоров П. Солонці та солончаки України. Дніпро : ДНУ, 2019. 168 с.

28. Вишневський В. І. Алювіальні ґрунти долини Дніпра. Київ : Наукова думка, 2021. 190 с.

29. UNEP. Global Chemicals Outlook II. Geneva : UNEP, 2019.

30. Вітвицький Я. Важкі метали у ґрунтах промислових регіонів

України. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія».* 2021. Вип. 35. С. 55-62.

31. Мельник С. В. Сільське господарство і деградація ґрунтів. *Агроекологія*. 2021. № 2. С. 41-48.

32. European Environment Agency. Soil pollution and health risks. Copenhagen : EEA, 2020.

33. Дьяков О. В. Наслідки Чорнобильської катастрофи для ґрунтів України. *Екологічний вісник*. 2020. № 5. С. 18-23.

34. Державна служба геології та надр України. Методика моніторингу ґрунтів. Київ : Б. в., 2021.

35. Sparks D. L. Environmental Soil Chemistry. London : Academic Press, 2019. 408 p.

36. Трофимчук А. Мікробіологічні методи оцінки стану ґрунтів. Львів : Видавництво ЛНУ, 2020. 156 с.

37. Analyzing the Soil Monitoring System Activities in Ukraine / Muzychenko-Kozlovska et al. 2022.

38. Geostatistical and geospatial assessment of soil pollution with heavy metals in Pavlograd city / Kharytonov et al. 2020.

39. Monitoring of elemental composition of soils in Ukraine / Bobunov, Midyk et al. 2023.

40. Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine / Yashchenko, Androshchuk et al. 2025.

41. Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations / Bulba, Drobitko, Zadorozhnii, Pismennyi. 2024.

42. Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine – a review / Sytar, Taran. 2022.

43. The role of restoring degraded soils in ensuring food security in the agro-industrial sector. Science Horizons. 2025.

44. Natural phytomelioration processes on rock dumps of abandoned coal mines (Ukraine). 2024.

45. Justification of the method for phytoremediation of degraded and contaminated lands by composite vermicompost briquettes / Kovrov et al. 2019.

46. European Commission. EU Soil Strategy for 2030. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2021.

47. European Environment Agency. Contamination from local sources - soil contamination in Europe. Copenhagen : EEA, 2020.

48. Council of the European Union. Soil monitoring law: EU on the pathway to healthy soils by 2050. Brussels : Council Press Service, 2020.

49. European Commission. The route to sustainable, cost-effective soil remediation: protecting soil quality at a contaminated site in Sweden. Brussels : Directorate-General for Environment, 2020.

50. Linnaeus University. Project Baltic Phytoremediation (BAPR). Växjö : Linnaeus University Press, 2020.

51. Закон України «Про охорону праці». Київ : Відомості Верховної Ради України, 2019.

52. Державні санітарні правила і норми при роботі з токсичними речовинами. Київ : МОЗ України, 2019.

53. International Labour Organization (ILO). Safety and Health at Work: A Vision for Sustainable Prevention. Geneva : ILO, 2019.

54. World Health Organization. Occupational health: protecting workers' health. Geneva : WHO, 2019.

55. European Agency for Safety and Health at Work. Protecting workers in the heat: guidance for occupational safety. Bilbao : EU-OSHA, 2019.

56. International Organization for Standardization. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use. Geneva : ISO, 2018.

57. European Commission. Guidance on risk assessment at work. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019.

58. Centers for Disease Control and Prevention. Laboratory Safety Manual. Atlanta : CDC, 2019.

59. United Nations Environment Programme. Chemicals and Waste Management: Global Chemicals Outlook II. Nairobi : UNEP, 2019.

60. Державні будівельні норми України. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Київ : Мінрегіон України, 2019.

61. Державна служба України з питань праці. Правила безпеки під час роботи у лабораторіях. Київ : Держпраці, 2019. 68 с.

62. International Labour Organization (ILO). Safety and Health at the Heart of the Future of Work: Building on 100 years of experience. Geneva : ILO, 2019. 92 p.