

Хмельницький національний університет
Гуманітарно-педагогічний факультет
Кафедра екології та біологічної освіти

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Оцінка забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок падіння безпілотних літальних апаратів (на прикладі села Красносілка Старокостянтинівської міської територіальної громади)

Галузь знань – 10 «Природничі науки»
Спеціальність – 101 «Екологія»

КРЕКОЛ. 021034.01.15.00

Виконав: здобувач 4 курсу
група ЕКОЛ-21-1


Керівник

Нормоконтролер

До захисту допускаю:
Зав. кафедри екології
та біологічної освіти

18 червня 2025 р.


Роман СТОПНЮК


Сергій ШЕВЧЕНКО

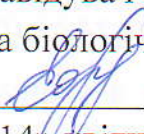

Сергій ШЕВЧЕНКО


Ольга ЄФРЕМОВА

Хмельницький 2025

Факультет – Гуманітарно-педагогічний
Кафедра – Екології та біологічної освіти
Освітній рівень – перший (бакалаврський)
Галузь знань – 10 «Природничі науки»
Спеціальність – 101 «Екологія»
Освітньо-професійна програма – «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри екології
та біологічної освіти

Ольга ЄФРЕМОВА
«14» квітня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Стопнюку Роману Романовичу

1. Тема роботи: Оцінка забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок падіння безпілотних літальних апаратів (на прикладі села Красносілка Старокостянтинівської міської територіальної громади)
керівник роботи Шевченко Сергій Миколайович, к.с.-г.н., доцент.
Затверджено наказом ректора університету від 07 лютого 2025 року № 23.
2. Строк подання студентом роботи на кафедру 12 червня 2025 року.
3. Вихідні дані до роботи: ґрунтовий покрив села Красносілка Старокостянтинівської міської громади.
4. Зміст кваліфікаційної роботи:
 - 4.1 Дослідження впливу воєнних дій на ґрунти та методи їх відновлення.
 - 4.2 Об'єкти та методи дослідження.
 - 4.3 Оцінка хімічного стану ґрунтів та заходи з їх відновлення в умовах поствоєнного забруднення.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Дослідження впливу воєнних дій на ґрунти та методи їх відновлення	12.05 – 18.05	виконано
2	Об'єкти та методи дослідження	19.05 – 26.05	виконано
3	Оцінка хімічного стану ґрунтів та заходи з їх відновлення в умовах поствоєнного забруднення	27.05 – 05.06	виконано
4	Оформлення роботи	06.06 – 11.06	виконано

Дата видачі завдання:

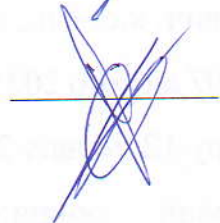
«12» травня 2025 р.

Здобувач



Роман СТОПНЮК

Керівник



Сергій ШЕВЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Тема – Оцінка забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок падіння безпілотних літальних апаратів (на прикладі села Красносілка Старокостянтинівської міської територіальної громади).

Автор – студ. ЕКОЛ-21-1 Р.Р. Стопнюк.

Керівник – доцент кафедри екології та біологічної освіти, кандидат сільськогосподарських наук С.М. Шевченко.

Кваліфікаційна робота викладена на 54 сторінках, містить 12 рисунків, 4 таблиці та перелік джерел посилань із 40 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВОЄННИЙ СТАН, БПЛА, ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ, ВАЖКІ МЕТАЛИ, КРАСНОСІЛКА, ВІДНОВЛЕННЯ ҐРУНТІВ.

У кваліфікаційній роботі здійснено огляд науково-технічних джерел щодо впливу воєнних дій на стан ґрунтів, а також проаналізовано міжнародний досвід їх відновлення після військових конфліктів. Розглянуто сучасні методи оцінки та прогнозування ґрунтового стану. Проведено хімічний аналіз ґрунтів села Красносілка Старокостянтинівської громади, забруднених унаслідок бойових дій та сформульовано практичні рекомендації щодо їх відновлення.

11.06.2025

 Роман СТОПНЮК

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	5
1 Дослідження впливу воєнних дій на ґрунти та методи їх відновлення....	7
1.1 Вплив збройних конфліктів на стан ґрунтового покриву.....	7
1.2 Міжнародний досвід рекультивації ґрунтового покриву після впливу військових дій.....	20
2 Програма, об'єкти та методи дослідження.....	31
3 Оцінка забруднення ґрунтів важкими металами та заходи з їх відновлення.....	35
3.1 Результати хімічного аналізу ґрунту села Красносілка, забруднених внаслідок військових дій.....	35
3.2 Розробка заходів щодо відновлення забруднених ґрунтів.....	42
Висновки.....	48
Перелік джерел посилання.....	50
Додаток А Визначення категорії придатності до використання земельної ділянки.....	55
Додаток Б Вартість технологій очищення ґрунту.....	56

ВСТУП

В умовах збройного конфлікту на території України суттєво зростає екологічне навантаження на довкілля, зокрема на ґрунтовий покрив. Одним із малодосліджених, але потенційно небезпечних джерел такого навантаження є падіння безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різного типу, які містять у своїй конструкції важкі метали та інші токсичні речовини. У результаті їх руйнування відбувається локальне забруднення ґрунтів, що може мати довготривалі негативні наслідки як для екосистем, так і для здоров'я місцевого населення.

З огляду на інтенсивне застосування БПЛА у зоні бойових дій, особливо в сільських регіонах, зростає потреба у системному вивченні екологічних наслідків їх падіння. Село Красносілка Старокостянтинівської міської територіальної громади є прикладом території, яка зазнала впливу таких подій. Дослідження ступеню забруднення ґрунтів важкими металами у цій місцевості є надзвичайно важливим для розробки ефективних заходів з охорони довкілля, реабілітації забруднених територій та запобігання вторинному забрудненню.

Актуальність обраної теми також зумовлена відсутністю достатньої кількості наукових даних щодо екологічного впливу уламків БПЛА на ґрунти в умовах України. Результати даного дослідження можуть бути використані як основа для подальших наукових робіт, екологічного моніторингу та розробки нормативно-правових актів у сфері безпеки довкілля.

Метою кваліфікаційної роботи є оцінка ступеня забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок падіння БПЛА на території села Красносілка Старокостянтинівської міської територіальної громади, з метою виявлення рівня екологічної небезпеки та визначення потенційного впливу на довкілля.

Завдання дослідження:

– аналіз літератури та нормативно-правової бази щодо методологічних

підходів до оцінювання якості ґрунтового покриву;

- дослідження зарубіжного досвіду щодо виявлення, оцінювання та ліквідації наслідків ґрунтового забруднення, спричиненого військовими діями;

- здійснення емпіричної оцінки рівня хімічного забруднення ґрунтів на території села Красносілка шляхом проведення польових спостережень і лабораторних досліджень, із фокусом на ідентифікацію вмісту важких металів;

- формування комплексу науково обґрунтованих практичних рекомендацій щодо реабілітації та підвищення екологічної якості ґрунтів у межах села Красносілка на основі отриманих аналітичних даних.

Об'єкт дослідження – ґрунтовий покрив села Красносілка, які піддаються хімічному забрудненню внаслідок воєнних дій.

Предмет дослідження – методи оцінки якості ґрунтів, процеси їх забруднення пов'язаних із наслідками військових дій.

Методи дослідження: аналіз літератури та нормативних документів – вивчення наукових джерел і нормативно-правових актів щодо оцінки якості ґрунтів та забруднювачів; польові дослідження – відбір проб ґрунтів для подальшого аналізу; лабораторні методи – визначення хімічного складу ґрунтів, зокрема важких металів; аналіз супутникових знімків – моніторинг змін стану ґрунтів за допомогою дистанційного зондування; математичне моделювання та статистичний аналіз – оцінка динаміки змін ґрунтів та обробка отриманих даних для виведення висновків.

Дослідження дозволяє розробити методи оцінки та відновлення ґрунтів, забруднених внаслідок військових дій. Результати можуть бути використані для: розробки стратегій відновлення ґрунтів після конфліктів; рекомендацій для органів влади щодо покращення стану земель; удосконалення моніторингу забруднення та захисту екосистем; вдосконалення нормативно-правових актів у галузі екології та земельного управління.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЄННИХ ДІЙ НА ҐРУНТИ ТА МЕТОДИ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

Воєнні дії завдають найбільш руйнівного впливу на ґрунтовий покрив серед усіх екосистем, оскільки його відновлення є надзвичайно тривалим процесом. Українські землі стали ареною масштабного застосування різних видів озброєння, що спричиняє суттєві зміни в ґрунтовому покриві. Вибухи ракет, артилерійських снарядів, фугасних бомб, мін, безпілотних літальних апаратів і реактивних систем залпового вогню руйнують структуру ґрунту, яка формувалася протягом століть. За останнє століття втрати гумусового горизонту на території України перевищили 30 %, а бойові дії лише пришвидшують цей деструктивний процес. Внаслідок фізичних, хімічних та фізико-хімічних змін ґрунти втрачають родючість, що ставить під загрозу їхню екологічну стійкість та сільськогосподарську продуктивність.

1.1 Вплив збройних конфліктів на стан ґрунтового покриву

Вплив збройних конфліктів на ґрунтове середовище часто залишається недооціненим порівняно з людськими втратами та руйнуванням інфраструктури. Проте погіршення якісних характеристик ґрунтів має довготривалі наслідки, які значно знижують їхню продуктивність і екологічну стійкість. Водночас ґрунтовий покрив має здатність до відновлення, що залежить від його типологічних особливостей, характеру військово-техногенного впливу та ландшафтних умов конкретної території.

Оцінка військово-техногенного навантаження на ґрунти повоєнних ландшафтів здійснюється з урахуванням інтенсивності бойових дій та різновидів бойових забруднень. З початку повномасштабного вторгнення 24 лютого 2022 року територія України зазнала значних руйнувань ґрунтового покриву. За даними Державної екологічної інспекції України,

станом на 2023 рік зафіксовано забруднення 342,9 тисяч квадратних метрів земель унаслідок військових дій, а загальна площа уражених ґрунтів становить 15 995,8 тис. квадратних метрів.

Порушення ґрунтового покриву, спричинене військовими діями, класифікується на дві основні групи:

- первинні – безпосередні механічні пошкодження ґрунту, теплове забруднення, а також засмічення поверхні вибухонебезпечними залишками та фрагментами боєприпасів;

- вторинні – виникають внаслідок відсутності заходів з повоєнного відновлення та включають підтоплення, засолення, розвиток ерозійних процесів, пірогенну деградацію, дегуміфікацію тощо.

Збройні конфлікти спричиняють комплексний механічний, фізичний та хімічний вплив на ґрунтовий покрив (рисунок 1.1), що призводить до руйнування його структури, порушення функціонування ґрунтової екосистеми та деградації її фізико-геохімічних властивостей.



Рисунок 1.1 – Наслідки падіння КАБа
(Житомирська область, 2022 рік)

Руйнування рослинного покриву, порушення ґрунтової цілісності, дефіцит природного зволоження та активізація процесів опустелювання є характерними наслідками військово-техногенного впливу. Ці зміни призводять до різкого зниження рівня біорізноманіття, що негативно позначається на чисельності та стійкості біологічних популяцій і окремих видів. Втрата біорізноманіття, у свою чергу, провокує подальші трансформації ландшафтної структури та функціонування екосистем.

Серед ключових аспектів військово-техногенного навантаження особливе значення має механічний вплив і його наслідки для ґрунтового покриву. Він виявляється у деформації ґрунтів, спричиненій пересуванням колісної та гусеничної військової техніки, розгортанням військових підрозділів, будівництвом наземних і підземних об'єктів, а також унаслідок бомбардувань, розмінування територій та створення оборонної інфраструктури.

Основний механічний вплив на ґрунтовий покрив проявляється в його ущільненні, що супроводжується руйнуванням гумусового шару. Це призводить до низки негативних наслідків, зокрема до порушення водного балансу ґрунту, що значно підвищує ризик розвитку водної та вітрової ерозії. Деструкція ґрунтової структури відбувається через зміщення частинок різних горизонтів під впливом військово-техногенних навантажень, що ускладнює процеси ґрунтоутворення та відновлення родючості [1].

Ущільнення ґрунту також негативно впливає на адаптаційний потенціал рослинності, знижуючи її стійкість до змін клімату, посухи та дефіциту вологи. Водночас, за умов постійного браку продуктивної вологи, ущільнений ґрунт може виявляти підвищену стійкість до подальшої деградації, що частково уповільнює його руйнування в екстремальних умовах.

Руйнування ґрунтового покриву спричинене зведенням як поверхневих, так і підземних фортифікаційних споруд, зокрема тунелів, сховищ для паливно-мастильних матеріалів і боєприпасів, бліндажів, окопів,

траншей тощо. Формування таких структур провокує активізацію небезпечних геологічних і геоморфологічних процесів, зокрема зсувів, заболочування та просідання ґрунту. З огляду на ці фактори, під час проектування фортифікаційних об'єктів необхідно враховувати особливості залягання ґрунтових вод і рівень зволоження ґрунту для мінімізації негативних екологічних наслідків.

Утворення кратерів унаслідок військових дій є результатом бомбардувань та артилерійських обстрілів. Вибухова дія супроводжується миттєвим вивільненням значної кількості енергії, що генерує кругову ударну хвилю. Ця хвиля поширюється від епіцентру вибуху, спричиняючи деформацію поверхні та формування воронки різної глибини та діаметра (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Вирва у передмісті Києва після вибуху ракети у березні 2024 року

Після вибуху частина ґрунту розкидається в радіусі ударної хвилі, а на місці детонації формується котлован, що класифікується як бомбтурбація [2]. Даний процес супроводжується руйнуванням ґрунтових горизонтів під дією вибухової хвилі, що призводить до суттєвих порушень повітряного та

водного режиму ґрунту. Найбільші фрагменти розкиданого ґрунту, як правило, осідають на дні кратера або щільно прилягають до його стінок, формуючи нерівномірну структуру.

Зони, де відбувається бомбтурбація, стають місцями накопичення вологи та органічних речовин, що сприяє зміні рослинного покриву. Зокрема, на дні кратерів і воронок поступово формуються угруповання гідрофільних рослин, видове різноманіття яких відрізняється від характерної флори регіону, що свідчить про підвищений рівень вологості ґрунту. У районах із високим рівнем ґрунтових вод кратери можуть перетворюватися на стійкі замкнені водойми, що значно уповільнює процеси ґрунтоутворення та природної відновлюваності рослинного покриву.

Під час вибухів хімічні речовини, що утворюються, зазнають окислення, а продукти цих реакцій, такі як вуглекислий газ і водяна пара, вивільняються в атмосферу. Хоча ці сполуки не є токсичними, вони належать до парникових газів, що сприяють зміні клімату [3].

Внаслідок бойових дій та пожеж на території виникають процеси водної та вітрової ерозії ґрунтів. На вигорілих ділянках зазвичай спостерігається втрата гумусових речовин і утворення гідрофобного шару, що зменшує проникність ґрунту для води, сприяючи подальшому погіршенню водоутримувальних властивостей ґрунту.

Під фізичним впливом на ґрунт розуміють зміну його фізичних властивостей внаслідок застосування різних видів озброєнь та військової техніки. Основні прояви фізичного забруднення ґрунтів включають:

– вібраційний вплив, що виникає внаслідок коливань низьких частот, які передаються через тверді матеріали, що контактують з механізмами. Цей тип впливу пов'язаний із генерацією енергетичних імпульсів під час бойових дій. Одиначні імпульси з'являються внаслідок вибухів боєприпасів на полігонах або стрільби з різних видів зброї, тоді як періодично повторювані імпульси виникають через роботу військової техніки. Вібрації, що

передаються через ґрунт, можуть призводити до ущільнення, витиснення води, просідання поверхні, утворення порожнин і зміни мікрорельєфу;

– радіоактивний вплив спричинений підвищенням концентрації радіоактивних речовин, які можуть виникати при використанні боєприпасів із збідненим ураном або техніки, що містить джерела іонізуючого випромінювання. Однак, станом на сьогодні, на території України не зафіксовано використання цього типу зброї;

– тепловий вплив спричинений локальним підвищенням температури внаслідок викидів нагрітого повітря, порохових газів і вихлопних продуктів від військової техніки. Цей вплив негативно позначається на ґрунтовому покриві, порушуючи термічний та водний режим ґрунту, а також змінюючи його гранулометричний та агрегатний склад. Зміни термічного режиму ґрунту можуть вплинути на ґрунтових організмів, зменшуючи їх кисневу насиченість та знижуючи біорізноманіття.

Хімічний вплив воєнних дій призводить до значних змін усіх параметрів ґрунтового покриву внаслідок дії забруднюючих речовин, що утворюються при застосуванні різних систем озброєння та військової техніки. Тривала військова діяльність може спричинити формування точкових воєнно-техногенних геохімічних аномалій, що містять вибухові та інші токсичні речовини, зокрема важкі метали, отруйні хімічні сполуки та продукти вибухів. Ці забруднення можуть значно погіршити якість ґрунтів, що, у свою чергу, веде до накладення заборони на використання земель на невизначений термін, оскільки ці території стають небезпечними для сільськогосподарського використання та проживання.

Вибух кожного виду озброєння є хімічною реакцією, внаслідок якої вся хімічна складова снаряда потрапляє в навколишнє середовище: частина викидається в атмосферу, а інша – безпосередньо в ґрунт. У результаті цього ґрунти, а також ґрунтові та підземні води забруднюються значними кількостями токсичних металів і хімічних сполук. У ґрунті можуть накопичуватися такі важкі метали, як алюміній, мідь, а також інші шкідливі

елементи. Окиснення вибухових речовин сприяє вивільненню сірки та азоту, які потрапляють у повітря та ґрунт.

Сірка є однією з найбільш небезпечних для ґрунтів речовин, оскільки, вступаючи в реакцію з атмосферними опадами, вона перетворюється на сірчану кислоту. Ця кислота, потрапляючи в ґрунт, завдає шкоди мільйонам мікроорганізмів, що формують родючий покрив ґрунту, значно погіршуючи його біологічну активність і здатність до підтримання здорових екосистем.

Нерозірвані боєприпаси та наземні міни становлять серйозну загрозу для ґрунтового середовища на протязі десятиліть. Основна небезпека полягає у викидах токсичних речовин внаслідок корозії боєприпасів, а також у ризиках, пов'язаних з можливістю випадкової детонації. Такі процеси можуть призвести до забруднення ґрунтів важкими металами та іншими шкідливими хімічними сполуками, що негативно позначається на їхній родючості та біологічному різноманітті. Окрім того, ці фактори створюють серйозні екологічні загрози, погіршуючи якість навколишнього середовища та ставлячи під загрозу здоров'я людей, які можуть перебувати в зонах забруднення (рисунок 1.3) [5, 7].



Рисунок 1.3 – Нерозірвана російська ракета поблизу міста Соледару на Донеччині (6 червня 2022 року)

Важкі метали – це хімічні елементи з питомою вагою, що перевищує 5 г/см³, або атомним номером понад 20. До таких металів належать, зокрема, свинець, ртуть, кадмій, хром та миш'як, які є токсичними і можуть завдати значної шкоди здоров'ю людини та екосистемам. Вони мають властивість накопичуватися в ґрунті, воді та живих організмах, що може призвести до серйозних екологічних і соціальних проблем.

Згідно з попередніми науковими дослідженнями, проведеними в зонах АТО/ООС з 2016 року по 2020 рік, в ґрунтах було виявлено підвищену концентрацію таких металів, як мідь, свинець, цинк, хром, миш'як, кадмій, молібден, барій, калій, магній, вольфрам та інших [8].

Важкі метали є основними індикаторами воєнно-техногенного забруднення і важливими для прогнозування змін екологічного стану забруднених ґрунтів, а також прилеглих до них територій.

У місцях витоків паливно-мастильних матеріалів (ПММ) спостерігається найвища концентрація нафтопродуктів, що створює серйозну екологічну загрозу для ґрунтового покриву. Значні проливи ПММ змінюють хімічний склад ґрунтів, знижують їхню здатність до самовідновлення, руйнують структуру та різко зменшують біологічну активність. Внаслідок цього порушується мікробіологічний баланс, зменшується кількість корисних мікроорганізмів і знижується загальна родючість ґрунтів. Такі зміни погіршують екологічний стан територій і можуть спричинити хронічні захворювання серед місцевого населення, а також зменшення біорізноманіття.

Ґрунти, забруднені різними вуглеводнями, стають джерелом токсичних газів і пилу, які легко переносяться вітром. До таких небезпечних речовин належать бензол, ксилол, толуол і етилбензол – високотоксичні ароматичні сполуки. Потрапивши у ґрунт, вони заповнюють його поровий простір, блокуючи проникнення повітря та води. Це, своєю чергою, ускладнює дихання коренів рослин, порушує водообмін і згубно впливає на ґрунтові мікроорганізми. У довгостроковій перспективі це призводить до деградації

ґрунту та перетворення родючих земель на непридатні для сільськогосподарського використання [9, 10].

Забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок воєнних дій становить довготривалу екологічну проблему, оскільки такі елементи можуть зберігатися у ґрунті протягом десятиліть, а іноді – й століть. На територіях бойових дій зафіксовано концентрацію важких металів, що у 30 разів перевищує природний фон. Основними джерелами забруднення є залишки військової техніки, боєприпасів та сліди від їх використання. До найбільш поширених забруднювачів належать хром (Cr), миш'як (As), ртуть (Hg), нікель (Ni), цинк (Zn) і кадмій (Cd). Потрапивши в ґрунт, ці елементи мають здатність проникати в ґрунтові води, що спричиняє їх подальше поширення через харчові ланцюги – від рослин до тварин і людей – з потенційно небезпечними наслідками для здоров'я.

Ключову роль у поширенні та міграції важких металів у ґрунтовому середовищі відіграють не стільки час чи кількість забруднюючих речовин, скільки властивості самого ґрунту та місцеві кліматичні умови. Зокрема, кислі піщані ґрунти з низькою катіонною ємністю та бідні на органічну речовину сприяють високій мобільності токсичних елементів, що робить їх більш доступними для рослин і небезпечними для живих організмів. У той час як лужні ґрунти, глинисті або суглинкові за текстурою, з високою катіонною ємністю та вмістом органіки, можуть затримувати важкі метали, обмежуючи їх рухливість та зменшуючи ризики забруднення вод і поглинання біотою [12].

Таким чином, при плануванні заходів з рекультивації та моніторингу територій, уражених воєнно-техногенним впливом, надзвичайно важливо враховувати локальні ґрунтово-кліматичні умови.

Військова діяльність справляє не лише екологічний, а й глибокий біомедичний вплив на населення, особливо – на найбільш уразливу його частину: дітей.

Результати окремих досліджень свідчать про серйозні загрози для здоров'я дітей, які проживають у зонах бойових дій. Зокрема, було встановлено зв'язок між затримкою росту та неврологічного розвитку дітей і внутрішньоутробним впливом важких металів, таких як миш'як, барій та молібден [13]. Ці токсичні елементи можуть проникати в організм матері під час вагітності через забруднені воду, повітря або ґрунт і негативно впливати на формування плоду.

У районі Гази (Палестина) фіксується збільшення кількості передчасних пологів і вроджених вад у новонароджених. Науковці пов'язують ці явища з підвищеним рівнем впливу на жіноче населення ряду токсичних елементів: барію, миш'яку, кобальту, кадмію, хрому, ванадію та урану [14]. Подібні наслідки спостерігались і в Іраку: у дітей, які проживають у військових зонах, виявлено порушення неврологічного розвитку, що пов'язується з тривалим впливом забруднювальних речовин, зокрема важких металів [15, 16].

Потрапляння забруднювальних речовин у людський організм є серйозним фактором ризику для розвитку широкого спектру патологій. Особливо небезпечними є ті речовини, які навіть у мінімальних кількостях можуть впливати на клітинні та молекулярні процеси в організмі. До таких речовин належать і мікроелементи, які в нормальних умовах необхідні для життєдіяльності організму, але в надмірних концентраціях набувають токсичних властивостей [17]. Їх накопичення в тканинах може порушувати обмін речовин, викликати окислювальний стрес, а також призводити до хронічних захворювань.

Дослідження підтверджують, що навіть незначні дози забруднювальних речовин можуть змінювати активність ферментів, впливати на функціонування кровоносної системи, зокрема на ядерний кровообіг, а також на процеси синтезу білків. Крім того, вони здатні викликати мутації на рівні ДНК, що становить значну загрозу для здоров'я людини в довгостроковій перспективі [18].

Після потрапляння в ґрунт поведінка вибухових сполук і важких металів залежить від багатьох фізико-хімічних та біологічних чинників. Їхня міграція, трансформація та накопичення визначаються такими процесами, як випаровування, адсорбція, розчинення, гідроліз, фотоліз і біодеградація. Важливу роль відіграють властивості самого ґрунту: його гранулометричний і мінералогічний склад, вміст органічної речовини (гумусу), окисно-відновні умови, рН середовища, а також наявність геохімічних бар'єрів, які можуть затримувати або, навпаки, прискорювати переміщення токсичних елементів [19].

Ці процеси ускладнюють прогнозування та ліквідацію наслідків воєнного забруднення і вимагають ретельного моніторингу стану ґрунтів.

Найважливішим фактором, що визначає інтенсивність переміщення забруднювальних речовин у ґрунтовому профілі, є водний режим території [20]. Саме рух води по вертикалі та горизонталі обумовлює перенесення розчинених речовин, зокрема важких металів і залишків вибухових сполук, у глибші горизонти ґрунту або навіть у підземні води.

Здатність ґрунтів та водоносних горизонтів затримувати важкі метали через процеси вибіркової адсорбції значною мірою залежить від площі активної поверхні мінералів і часток органічної речовини, які взаємодіють з металами. У цьому контексті важливими є такі характеристики, як вміст глинистих мінералів, органічного вуглецю, рівень вологості, швидкість газообміну з атмосферою, а також мікробіологічна активність ґрунту [21]. Всі ці чинники формують складну систему, що впливає на здатність ґрунту до утримання забруднювачів або, навпаки, сприяє їх мобілізації.

Особливу роль у зменшенні міграції токсичних речовин відіграє рослинний покрив. Рослини не лише перешкоджають ерозії, а й здатні фіксувати важкі метали у своїх тканинах, зменшуючи їхню рухливість у ґрунтовому профілі. Крім того, коренева система створює бар'єр, який уповільнює фільтрацію води, зменшуючи швидкість транспорту забруднюючих речовин до підґрунтових і ґрунтових вод. У результаті

рослинність слугує природним фільтром, що зменшує ризики вторинного забруднення навколишнього середовища.

Надходження важких металів у рослини з ґрунтового середовища – складний процес, який контролюється низкою фізико-хімічних і біологічних чинників. Одним із головних чинників є видові особливості самих рослин: одні культури здатні акумулювати більші концентрації токсичних елементів, тоді як інші демонструють стійкість до їхнього поглинання. Зокрема, згідно з дослідженнями, найвищий рівень накопичення важких металів спостерігається в листових овочах (наприклад, шпинат, салат), а також у силосних культурах, що мають значну вегетативну масу. Натомість бобові, злакові та технічні культури (соняшник, ріпак тощо) демонструють меншу здатність до поглинання таких елементів [22].

До ключових параметрів, що впливають на інтенсивність надходження металів у рослини, належать:

- рН ґрунту: у кислих ґрунтах важкі метали зазвичай перебувають у більш доступній формі для засвоєння;
- гранулометричний склад: легкі піщані ґрунти сприяють швидшій міграції металів до кореневої системи;
- вміст органічної речовини: органіка здатна зв'язувати важкі метали, зменшуючи їх біодоступність;
- катіонно-обмінна ємність ґрунту: від цього показника залежить здатність ґрунту утримувати позитивно заряджені іони важких металів.

Хоча коренева система рослин має певні захисні механізми (наприклад, утворення апопластичних бар'єрів або активний транспорт іонів), ці механізми часто є недостатніми при перевищенні фонових концентрацій забруднювачів у ґрунті. У результаті токсичні іони проникають у провідні тканини й накопичуються в надземних частинах рослини – листках, стеблах, плодах, що створює загрозу для всього трофічного ланцюга.

Тривалість процесу сорбції важких металів залежить від їхньої хімічної форми (наприклад, легкорозчинні солі швидше засвоюються), а також від

температури, вологості ґрунту й активності ґрунтової мікробіоти [24, 25]. Таким чином, оцінка ризику забруднення сільськогосподарської продукції вимагає комплексного підходу з урахуванням агроекологічних характеристик місцевості.

Навіть за умов обмеженої кількості досліджень у сфері воєнно-екологічної медицини вже накопичено достатньо наукових даних, які вказують на серйозні ризики для здоров'я людей, що перебувають у зонах воєнно-техногенного впливу. Високі концентрації важких металів, таких як свинець, ртуть, кадмій, миш'як і хром, справді можуть мати потужний нейротоксичний ефект. Їх накопичення в організмі призводить до порушень функціонування центральної та периферичної нервової системи, гематологічних змін (наприклад, анемії, пригнічення кровотворення), а також ендокринних розладів – зокрема, порушень роботи щитоподібної та надниркових залоз [26].

Додатково, деякі з цих елементів мають канцерогенні та мутагенні властивості. Наприклад:

- кадмій і нікель асоціюються з розвитком раку легень;
- миш'як – із ураженням шкіри, печінки, сечового міхура;
- ртуть і свинець – здатні порушувати процеси передачі спадкової інформації на молекулярному рівні, викликаючи генетичні аномалії.

Усе це свідчить про необхідність постійного епідеміологічного моніторингу у зонах колишніх або активних бойових дій. Такий моніторинг має включати:

- вивчення частоти та структури захворювань серед населення;
- аналіз біомаркерів забруднення в організмах місцевих мешканців;
- регулярне тестування ґрунтів, води, харчових продуктів.

Комплексна оцінка ризиків повинна проводитися міждисциплінарно – із залученням фахівців у галузі екології, медицини, хімії та агрономії. Такий підхід не лише дозволить вчасно виявляти загрози, але й розробити стратегії

реабілітації постраждалих територій та мінімізації ризиків для здоров'я населення.

1.2 Міжнародний досвід рекультивації ґрунтового покриву після впливу військових дій

Процес реабілітації ґрунтового покриву, що зазнав деградації внаслідок бойових дій, характеризується високою складністю та тривалістю, що обумовлює необхідність залучення значних матеріально-технічних, фінансових і трудових ресурсів. Ефективне вирішення цього завдання передбачає впровадження міждисциплінарних, інтегрованих підходів. Держави, які постраждали в результаті збройних конфліктів, розробляли та реалізовували низку стратегічних програм, спрямованих на відновлення деградованих ґрунтів, стабілізацію екосистем і реанімацію аграрного сектору.

Досвід окремих країн у цьому напрямі є цінним джерелом знань для формування сучасних практик відновлення земель після воєн.

Франція. У період Першої світової війни територія Франції зазнала суттєвих трансформацій у структурі ґрунтово-рослинного покриву. Значні площі сільськогосподарських угідь були забруднені важкими металами, зокрема сполуками міді та свинцю, а також небезпечними залишками вибухових речовин та боєприпасів [27].

Участь у процесі реабілітації територій брали як державні структури, так і міжнародні неурядові організації. Зокрема, вагомий внесок у відновлення сільських громад зробив Американський комітет з допомоги зруйнованим регіонам Франції (Comite Americain pour les Regions Devastees), який не лише забезпечував проведення соціально-економічної реконструкції на території комуни Єн, але й надавав місцевим фермерам матеріально-технічну допомогу у вигляді сільськогосподарського знаряддя, насіння та поголів'я худоби [28, 29].

За даними французької Служби цивільної безпеки (Securite Civile), яка координує діяльність, пов'язану з очищенням територій від вибухонебезпечних залишків, повне знешкодження боєприпасів, що залишилися після Першої світової війни, за поточних темпів може тривати до 700 років [30].

Велика Британія. У післявоєнний період Велика Британія зіткнулася з проблемою забруднення земель воєнно-техногенного походження, що було спричинене масованими авіаційними ударами та застосуванням різноманітних видів озброєння під час Другої світової війни.

Модель управління постконфліктними територіями, що склалася у Сполученому Королівстві, передбачає делегування основної відповідальності за стан таких земель приватним власникам. У межах цієї нормативної парадигми держава утримується від запровадження спеціалізованого законодавства, яке б регламентувало процеси відновлення забруднених ділянок, а також не встановлює чітких кількісних стандартів для екологічного чи геохімічного моніторингу.

Попри відсутність конкретних інструкцій щодо поводження із залишками воєнного забруднення, Міністерство оборони Великої Британії застосовує формалізовану систему оцінювання потенційних ризиків, пов'язаних із екологічною небезпекою забруднених земель [27].

Міністерство оборони Великої Британії запровадило багаторівневу систему оцінювання якості земель, що зазнали впливу воєнних дій, яка охоплює кілька послідовних етапів. До них належать: стратегічна первинна оцінка та визначення пріоритетних територій, проведення польових і камеральних досліджень, детальне обстеження окремих ділянок, аналіз можливих сценаріїв подальших дій, а також урахування позиції місцевих органів самоврядування у процесі прийняття рішень.

На сьогодні відсутня уніфікована та дієва методологія, яка б забезпечувала чітке визначення алгоритму дій щодо відновлення земель і

розподілу відповідальності між Міністерством оборони та приватними землевласниками [11].

Німеччина. Починаючи з 1991 року, значна частина виведених з експлуатації військових об'єктів перейшла у власність федерального уряду, який, відповідно до чинного законодавства, несе основну відповідальність за очищення забруднених територій. У разі відчуження таких земель державою на користь приватних суб'єктів, обов'язки щодо їхнього відновлення автоматично переходять до нових власників [12].

На відміну від більшості країн, Німеччина володіє чітко регламентованою національною нормативно-правовою базою, яка регулює процеси реабілітації територій, забруднених унаслідок військової діяльності [23]. Особливістю німецького підходу є наявність офіційно затвердженої поетапної процедури еколого-геохімічної оцінки, яка ґрунтується на ретроспективному принципі небезпеки. Цей метод спрямований на виявлення токсичних сполук, аналіз їхньої поведінки у середовищі та оцінювання потенційних екологічних ризиків. Крім того, в рамках даного підходу здійснюється систематичний аналіз фізико-хімічних характеристик забруднювальних речовин з метою уточнення запобіжних та мінімізаційних заходів.

В'єтнам. Під час тривалого збройного конфлікту у В'єтнамі (з 1960 років по 1970 роки) значні території країни зазнали масштабного хімічного забруднення внаслідок застосування дефоліанта «Агент Оранж», до складу якого входили високотоксичні сполуки діоксинового ряду. Ці речовини призвели до глибокої деградації ґрунтів, забруднення поверхневих і ґрунтових вод, а також спричинили суттєве порушення біорізноманіття, включаючи масову загибель представників флори та фауни.

Уряд В'єтнаму, у співпраці з міжнародними партнерами, запровадив технології біологічної рекультивації, зокрема методи фітореMediaції, що базуються на використанні рослин для абсорбції та трансформації токсичних сполук у ґрунтового середовищі. Практична реалізація цих заходів включала

висадження специфічних місцевих видів флори, здатних знижувати вміст діоксинів у забруднених ділянках.

Окрім заходів із детоксикації, значна увага приділялася екосистемній реабілітації територій шляхом відновлення лісового покриву. Реалізація програм заліснення сприяла не лише стабілізації екологічної ситуації, але й відновленню функціонального потенціалу природних ландшафтів.

Косово. Збройний конфлікт у Косово 1999 року спричинив суттєве забруднення довкілля, зокрема земельних і водних ресурсів, що було обумовлено застосуванням боєприпасів із вмістом збідненого урану.

Початковим етапом реабілітаційних робіт стало вилучення залишків вибухонебезпечних предметів і військових відходів. У подальшому було впроваджено технології очищення забруднених ґрунтів від важких металів і токсикантів, серед яких пріоритетне місце займала фіторемедіація – біотехнологічний метод детоксикації із залученням рослинних організмів, здатних до акумуляції шкідливих елементів.

Крім безпосередніх природоохоронних заходів, реалізовано комплекс програм довготривалого епідеміологічного моніторингу, зосередженого на регіонах із підвищеним рівнем радіотоксичного забруднення. Основною метою цих програм стало оцінювання впливу збідненого урану на стан громадського здоров'я та розробка профілактичних заходів.

Ірак (наслідки війни 2003 року). Збройний конфлікт в Іраку, що розпочався у 2003 році, спричинив масштабне техногенне забруднення значних територій, зокрема унаслідок накопичення важких металів, вибухових речовин і залишків уранових боєприпасів. Ці чинники спричинили порушення фізико-хімічної структури ґрунтів і становили серйозну загрозу для екосистем і здоров'я населення.

У відповідь на сформовану екологічну ситуацію було впроваджено низку заходів із рекультивації забруднених земель. Основною стратегією стала механічна санація, яка передбачала вилучення уражених шарів ґрунту з подальшою їх безпечною утилізацією. Паралельно застосовувалися

технології біоремедіації та фіторемедіації – методи, що базуються на здатності певних рослин абсорбувати, трансформувати або акумулювати важкі метали та інші токсичні сполуки.

Боснія і Герцеговина (наслідки збройного конфлікту з 1992 року по 1995 рік). Після розпаду Югославії Боснія і Герцеговина опинилася серед країн із найбільшою щільністю мінного забруднення у світі. Залишки вибухонебезпечних предметів, зокрема протипіхотних мін і невибухлих боєприпасів, істотно ускладнили доступ до значних площ сільськогосподарських угідь і лісових екосистем.

Ключовим елементом післяконфліктного відновлення стала масштабна кампанія з гуманітарного розмінування, що охопила великі території. Ці роботи реалізовувалися протягом десятиліть за підтримки національного уряду та міжнародних донорських структур. Основною метою програм було забезпечення безпеки місцевого населення та створення умов для повернення земель до продуктивного використання.

Після завершення очищення від мінних загроз, на розмінованих ділянках розпочато процеси відновлення ґрунтів і сільськогосподарської інфраструктури. Уряд підтримував аграрну реінтеграцію, стимулюючи повернення фермерів на очищені території з метою відновлення продовольчого виробництва та соціально-економічної стабілізації постраждалих громад.

Сполучені Штати Америки. У США управління землями, що зазнали забруднення внаслідок воєнно-техногенної діяльності, покладається на Міністерство оборони, яке є відповідальним за їхню рекультивацию та безпечно подальше використання. Відповідно до чинної нормативно-правової бази, такі території не можуть бути передані в користування або оренду без проведення попередньої комплексної оцінки стану довкілля, яка підтверджує відповідність земель екологічним вимогам та безпеку їхнього цільового призначення[18].

Паралельно з федеральними структурами, місцеві органи самоврядування, яким належать ділянки з історичним воєнно-техногенним навантаженням, мають повноваження ініціювати процес їхнього очищення та реабілітації самостійно. Однак така діяльність також має узгоджуватися з федеральними стандартами щодо охорони довкілля та управління ризиками [27].

Перед введенням забруднених територій в експлуатацію Міністерство оборони зобов'язане розробити план землекористування, який включає визначення форми власності, функціонального призначення земельної ділянки, а також обґрунтування відповідності категорії «чистої території». У разі передбачуваного відчуження ділянки – через продаж або надання в оренду – обов'язковою є процедура оцінки екологічних ризиків із подальшим визначенням комплексу відновлювальних заходів, адаптованих до характеру і рівня забруднення.

Країни колишньої Югославії. Унаслідок серії збройних конфліктів, що тривали на території колишньої Соціалістичної Федеративної Республіки Югославія в період з 1991 року по 2001 рік, країни Південно-Східної Європи зазнали масштабного екологічного лиха. Військові дії спричинили забруднення довкілля понад сотнею токсичних сполук, які потрапили у поверхневі й підземні води, атмосферне повітря та ґрунтовий покрив регіону.

Після завершення активної фази конфліктів більшість постюгославських країн, зокрема Албанія, Північна Македонія та Румунія, не мали у своєму розпорядженні ані належних технічних засобів, ані достатнього фінансування для здійснення повноцінного екологічного моніторингу. Це суттєво ускладнило визначення масштабу завданих довкіллю збитків, що, в свою чергу, перешкоджало розробленню ефективних стратегій з їхньої нейтралізації та подальшого відновлення територій.

На міжнародному рівні координація ключових програм підтримки Європейського Союзу, спрямованих на подолання наслідків збройних конфліктів у Республіці Сербія (включно з територією Косово), Республіці

Чорногорія та Північній Македонії, здійснювалася Європейським агентством з реконструкції. Це агентство виконувало функції провідної інституції ЄС у сфері постконфліктного відновлення інфраструктури та довкілля, аж до завершення свого мандату у 2008 році [30].

Реабілітація земель, які зазнали впливу військових дій, вимагає інтеграції мультидисциплінарних підходів. До таких підходів належать: системне розмінування територій; очищення ґрунтів від токсичних речовин; впровадження біотехнологічних методів, зокрема фіто- та біоремедіації; а також впорядкований довготривалий моніторинг стану екосистем і здоров'я населення, яке проживає на постраждалих територіях. Успішна реалізація таких заходів, як правило, ґрунтується на міжнародній співпраці та забезпечується фінансово-технічною підтримкою з боку іноземних урядів і міжурядових організацій.

Згідно з офіційною інформацією Міністерства аграрної політики та продовольства України, станом на кінець січня 2023 року приблизно 25 % сільськогосподарських угідь країни залишаються непридатними для використання у зв'язку з активними бойовими діями. Усі типи боєприпасів – від артилерійських снарядів до мін і авіаційних бомб – становлять потенційне джерело забруднення ґрунтів важкими металами та токсичними сполуками.

У контексті деокупації та повернення територій під контроль України, однією з першочергових задач постає екологічна реабілітація сільськогосподарських земель. Високий рівень забруднення металами, що мають кумулятивну дію, вимагає впровадження комплексних заходів із детоксикації ґрунтового середовища, включаючи застосування сучасних технологій очищення та біологічних методів відновлення агровиробничого потенціалу територій.

У сучасній практиці рекультивации ґрунтів, забруднених внаслідок техногенного або військового впливу, виокремлюють дві провідні стратегії знезараження: фізичну та біологічну.

Фізичне знезараження. Цей підхід є універсальним і придатний для усунення як органічних, так і неорганічних поллютантів. До переваг належить широке коло застосування та відносна оперативність процесу. Водночас основними обмеженнями є висока вартість реалізації та низька ефективність щодо залишків нафтопродуктів.

Біоремедіація ґрунту передбачає використання живих організмів – мікроорганізмів, вищих рослин або органо-мінеральних сполук (зокрема гумінових речовин). Цей метод є екологічно безпечним та забезпечує поступове відновлення ґрунтового середовища без порушення його екологічної рівноваги. Проте головним недоліком є тривалість процесу очищення, що потребує значного періоду для досягнення ефективних результатів.

Особливу увагу в межах біологічної стратегії заслуговують гумінові речовини, зокрема препарати на основі гуматів, які суттєво посилюють процеси природної детоксикації. Завдяки здатності активувати мікробіологічну активність і зв'язувати важкі метали, гумати сприяють прискоренню деградації токсикантів, одночасно підвищуючи рівень родючості ґрунтів і стабілізуючи їхню екосистемну функціональність.

Гумінові речовини відіграють надзвичайно важливу роль у регулюванні фізико-хімічних властивостей ґрунту та є ефективними агентами для його оздоровлення, особливо після забруднення важкими металами. Основні функції гумінових сполук у цьому контексті включають:

- оптимізація температурного режиму ґрунту. Гумінові речовини змінюють колір ґрунту на більш темний, що підвищує його здатність до поглинання сонячної енергії та підвищення температури. Це створює сприятливі умови для активного функціонування ґрунтових мікроорганізмів, а також стимулює проростання та розвиток рослин, зокрема на ранніх етапах їхнього росту;

- збереження та доступність поживних речовин. Гумати здатні утримувати поживні елементи в ґрунті, що забезпечує їх тривалий доступ до

рослин. Цей механізм є особливо важливим при відновленні земель, що постраждали від забруднень, адже дозволяє забезпечити рослини необхідними речовинами на тривалий період;

– нейтралізація важких металів і радіонуклідів. Завдяки наявності карбоксильних і гідроксильних груп, гумінові речовини можуть утворювати нерозчинні комплекси з такими забруднювачами, як свинець, кадмій, миш'як і радіонукліди. Цей процес допомагає зменшити доступність токсичних елементів для біосфери, тим самим мінімізуючи їхній вплив на рослинний та тваринний світи.

Таким чином, гумінові речовини відіграють не лише роль природних стимуляторів родючості ґрунтів, але й функціонують як ефективні екологічні детоксиканти, сприяючи нейтралізації токсичної дії важких металів і поліпшенню загального екологічного стану ґрунтових екосистем, зокрема в умовах поствоєнного відновлення.

Результати досліджень, проведених у 2019 році Коледжем ресурсів, навколишнього середовища та матеріалів Гуансі (Китайська Народна Республіка), підтвердили значний вплив гумінової кислоти (гумату) на фізико-хімічні характеристики ґрунтів. Зокрема, було встановлено, що внесення різних концентрацій гумінової кислоти істотно впливає на здатність ґрунту до фітореMediaції, а також на його ефективність у зв'язуванні і поглинанні іонів важких металів (рисунок 1.4).

Наукове значення подібних досліджень полягає у визначенні оптимальних доз гумінових сполук для ефективної ремедіації ґрунтів, забруднених токсичними елементами, а також для відновлення їх агрономічної цінності в умовах постконфліктного антропогенного навантаження.

Експериментальні дослідження, проведені з використанням тютюну як модельної культури, засвідчили, що застосування гумінової кислоти суттєво знижує накопичення важких металів у рослинній біомасі, зокрема кадмію (Cd) та свинцю (Pb). Найвищу ефективність продемонструвало триразове

внесення гумінової кислоти у дозі 14,8 кг/га, що дозволило зменшити біодоступність кадмію на 37 %, а свинцю – на 39 %.

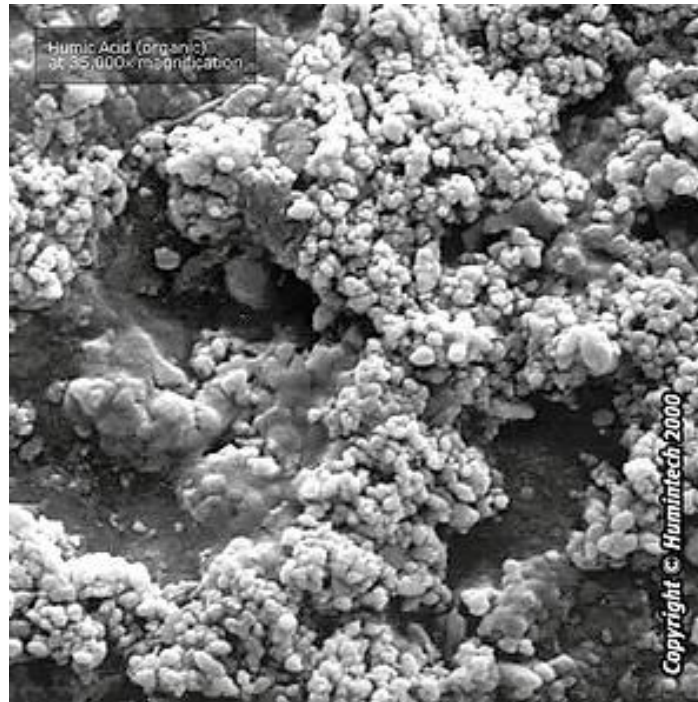


Рисунок 1.4 – Гумінова кислота (гумат) при 35 тисячному збільшенні
(Copyright © Humintech 2020)

Технологічні рішення, розроблені німецькою компанією Humintech ще в 1970 роках для рекультивації земель, деградованих внаслідок вугільного видобутку, демонструють високу ефективність і мають значний потенціал для адаптації до сучасних умов відновлення родючості українських ґрунтів, які зазнали деструктивного впливу внаслідок збройного конфлікту.

У співпраці з Інститутом рослинництва Університету Бонна компанія Humintech розробила інноваційний продукт на основі глибоко окисленого бурого вугілля. Цей засіб виконує функції ґрунтового кондиціонера та біоактивного збагачувача, що сприяє зменшенню вмісту токсичних елементів, зокрема свинцю (Pb) і кадмію (Cd), та покращенню агрохімічних і екологічних характеристик ґрунтового середовища.

До переліку ключових препаратів Humintech, орієнтованих на процеси рекультивації, належать:

– Humifield WSG (гумат калію у водорозчинній формі): рекомендована норма застосування становить від 2 кг/га до 8 кг/га, залежно від ступеня забруднення ґрунту важкими металами;

– Humifield VR-18 SC (рідкий гумат калію): рекомендоване дозування коливається в межах від 8 л/га до 32 л/га, з урахуванням специфіки ґрунтово-кліматичних умов і рівня техногенного навантаження.

У випадках багаторазового застосування гумінових препаратів рекомендовано розподіляти їх внесення на 3 етапи або 4 етапи. Такий підхід сприяє глибшому проникненню діючих речовин у ґрунтовий профіль, що, у свою чергу, підвищує ефективність процесу зв'язування іонів важких металів.

Ключовим елементом технології є інтеграція препарату з ґрунтом, що здійснюється механічним шляхом – через дискування або оранку. Це забезпечує рівномірний розподіл активних компонентів у верхньому шарі ґрунту та сприяє їхній більш тривалій дії.

Застосування подібних технологічних рішень є особливо актуальним для України в умовах післявоєнної відбудови. Вони не лише дозволяють ефективно дезактивувати контаміновані ґрунти, але й відновлюють їхню агрономічну цінність, створюючи передумови для подальшого сталого використання в аграрному виробництві.

Таким чином, зазначені препарати виступають як потужні засоби екологічної ремедіації, здатні суттєво покращити стан ґрунтів, які зазнали техногенного чи воєнного навантаження, та сприяти відновленню продовольчого потенціалу постраждалих територій.

2 ПРОГРАМА, ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було застосовано комплекс теоретичних і експериментальних методів дослідження.

Теоретичний етап передбачав всебічний аналіз науково-методичних джерел, який охоплював вивчення актуальних публікацій у фахових виданнях, результатів попередніх досліджень, нормативно-правових документів та аналітичних звітів, що стосуються оцінки якості ґрунтів, рівнів їх хімічного забруднення та прогнозування екологічного стану, особливо в контексті умов воєнного часу.

Польові дослідження включали відбір ґрунтових зразків на території села Красносілка, зокрема в зонах, які класифікуються як території підвищеного екологічного ризику – поблизу військового об'єкту. Маршрутні обстеження проводилися з метою визначення репрезентативних точок для відбору проб і просторової оцінки характеру та рівня забруднення.

Фізико-хімічні аналізи здійснювалися для визначення вмісту та концентрацій важких металів у ґрунті. Зокрема, використовувався спектральний метод. Лабораторні дослідження були проведені на базі приватного підприємства «Незалежний центр лабораторних досліджень «Еталон»» у місті Хмельницький.

Для визначення вмісту рухомих форм важких металів у ґрунтових зразках застосовувався метод атомно-абсорбційної спектрофотометрії згідно з чинними державними стандартами, що регламентують вимоги до оцінки якості ґрунту:

– вміст рухомих сполук свинцю (Pb) визначали відповідно до ДСТУ 4770.9:2007;

– вміст рухомих сполук кобальту (Co) – за методикою ДСТУ 4770.5:2007;

- вміст рухомих сполук кадмію (Cd) – відповідно до вимог ДСТУ 4770.3:2007;
- вміст рухомих сполук міді (Cu) – згідно з ДСТУ 4770.6:2007;
- вміст рухомих сполук цинку (Zn) – за методикою ДСТУ 4770.2:2007;
- вміст рухомих сполук нікелю (Ni) – відповідно до ДСТУ 4770.7:2007;
- вміст рухомих сполук заліза (Fe) – згідно з вимогами ДСТУ 4770.4:2007;
- вміст рухомих сполук марганцю (Mn) – за ДСТУ 4770.1:2007;
- вміст рухомих сполук хрому (Cr) – відповідно до методики ДСТУ 4770.8:2007.

Визначення вмісту ртуті (Hg) та миш'яку (As) у ґрунті здійснювали після відповідної пробопідготовки згідно з вимогами ДСТУ ISO 11466:2001. Кінцеве вимірювання концентрацій цих елементів проводили за методикою ДСТУ ISO 16772:2005.

Методи статистичного аналізу були використані для опрацювання результатів лабораторних вимірювань з метою виявлення статистично значущих відмінностей у рівнях забруднення між досліджуваними територіями. Обробка даних дала змогу встановити просторові закономірності розподілу важких металів та виявити критичні зони ризику.

У рамках роботи також проводилися опитування та напівструктуровані інтерв'ю з провідними фахівцями у сферах екології, ґрунтознавства та агрономії. Метою цих заходів було отримання експертних оцінок щодо сучасного стану ґрунтів у зоні дослідження та виявлення потенційних загроз для функціонування агроєкосистем у контексті післявоєнного відновлення.

Постановка експерименту та обробка отриманих даних здійснювалися відповідно до загальноприйнятих методів математичної статистики із застосуванням програмних засобів пакету Microsoft 365 на базі персонального комп'ютера, що забезпечувало систематизацію результатів, візуалізацію статистичних залежностей та достовірність висновків.

Село Красносілка розташоване в Хмельницькому районі Хмельницької області України та входить до складу Старокостянтинівської міської територіальної громади. Воно знаходиться неподалік від міста Старокостянтинів і засноване в 1561 році та має площу 2,031 км². Станом на 2021 рік, населення Красносілки становило 764 особи.

Назва села має кілька легендарних пояснень. За однією з них, вона походить від слова «красне», що означає гарне, підкреслюючи мальовничість місцевості. Інша версія стверджує, що першим жителем або засновником села був Красносільський.

Село Красносілка, розташоване неподалік Старокостянтинів в Хмельницькій області, у світлі повномасштабної війни в Україні, опинилося в зоні потенційної небезпеки через свою географічну близькість до військової інфраструктури. Саме місто Старокостянтинів неодноразово ставало ціллю російських ракетних і дронівих атак через розташовану там авіаційну базу Повітряних Сил ЗСУ.

Потенційна загроза для Красносілки:

- село опиняється в умовній «прифронтовій» тилівій зоні, оскільки поруч – важливий стратегічний об'єкт;
- падіння уламків безпілотників (ракет), а також можливі відхилення дронів від курсу, створюють пряму загрозу для цивільного населення (рисунок 2.1).

Красносілка – це приклад того, як навіть у відносно невеликих населених пунктах життя триває попри всі загрози, а громади проявляють неабияку стійкість.

Об'єктом дослідження, представленого в межах кваліфікаційної роботи, виступали компоненти ґрунтового покриву, розташованого в околицях села Красносілка, що входить до складу Старокостянтинівської міської громади. Зокрема, дослідження охоплювало:



Рисунок 2.1 – Вирва після падіння безпілотного літального апарату на території Старокостянтинівської міської громади

- основні типи ґрунтів, характерні для даного регіону, з урахуванням їх морфологічних і агрохімічних властивостей;
- контамінаційні чинники хімічного походження, серед яких акцент було зроблено на важких металах (Pb, Cd, Hg, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Cr, As) та на вмісті заліза (Fe) як потенційного індикатора техногенного навантаження;
- джерела забруднення, пов'язані з наслідками збройного конфлікту, зокрема залишками вибухових речовин та фрагментами безпілотних літальних апаратів;
- міграційні процеси токсикантів, що характеризують вертикальний і горизонтальний рух забруднювачів у ґрунтовому профілі;
- антропогенне навантаження та потенційні трансформації у структурі землекористування, спричинені воєнними діями та пов'язаними з ними деструктивними змінами в екосистемі регіону.

3 ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ТА ЗАХОДИ З ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

3.1 Результати хімічного аналізу ґрунту села Красносілка, забруднених внаслідок військових дій

Внаслідок падіння безпілотних літальних апаратів у межах села Красносілка основним типом забруднення стали кратерні вирви, утворені на місцях падіння БПЛА. Це призвело до хімічного забруднення та накопичення небезпечних об'єктів, таких як розірвані або нерозірвані боєприпаси, на зазначених територіях.

Ключовими джерелами забруднення, що виникли внаслідок військових дій, є використання вибухових речовин, витоки нафтопродуктів та хімічних сполук, що мають негативний вплив на екологічний стан ґрунтів.

Дослідження, спрямоване на оцінку рівня забруднення свинцем, кобальтом, кадмієм, міддю, цинком, нікелем, марганцем, хромом, миш'яком та ртуттю в умовах техногенного забруднення, проводилось на території Красносільського старостинського округу. Вибірка зразків була здійснена в трьох точках: перша (№ 1) – у східній частині села, друга (№ 2) – у південно-західній частині, а третя (№ 3) – на півночі села Красносілка (рисунок 3.1).

Проби ґрунту були відібрані безпосередньо з місць падіння безпілотних літальних апаратів різних типів. Контрольні (фонові) проби відбиралися з ділянок, розташованих на відстані 100 м від вирви, утвореної вибухом, на ділянках з аналогічним типом ґрунту.

Результати дослідження ґрунтів, взятих на місці падіння безпілотного літального апарату в точці № 1, що розташована на східній частині села, наведені в таблиці 3.1.

Згідно з даними таблиці 3.1, концентрація важких металів у ґрунтах на місці вибуху не перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК). Однак варто відзначити, що концентрації свинцю, кадмію, хрому та ртуті на місці

вибуху перевищують відповідні значення на контрольних точках. Перевищення варіюють від 1,4 разів для свинцю до 6,87 разів для ртуті. Крім того, концентрація хрому на місці вибуху дорівнює ГДК і перевищує рівень на контрольній ділянці в 1,67 рази.

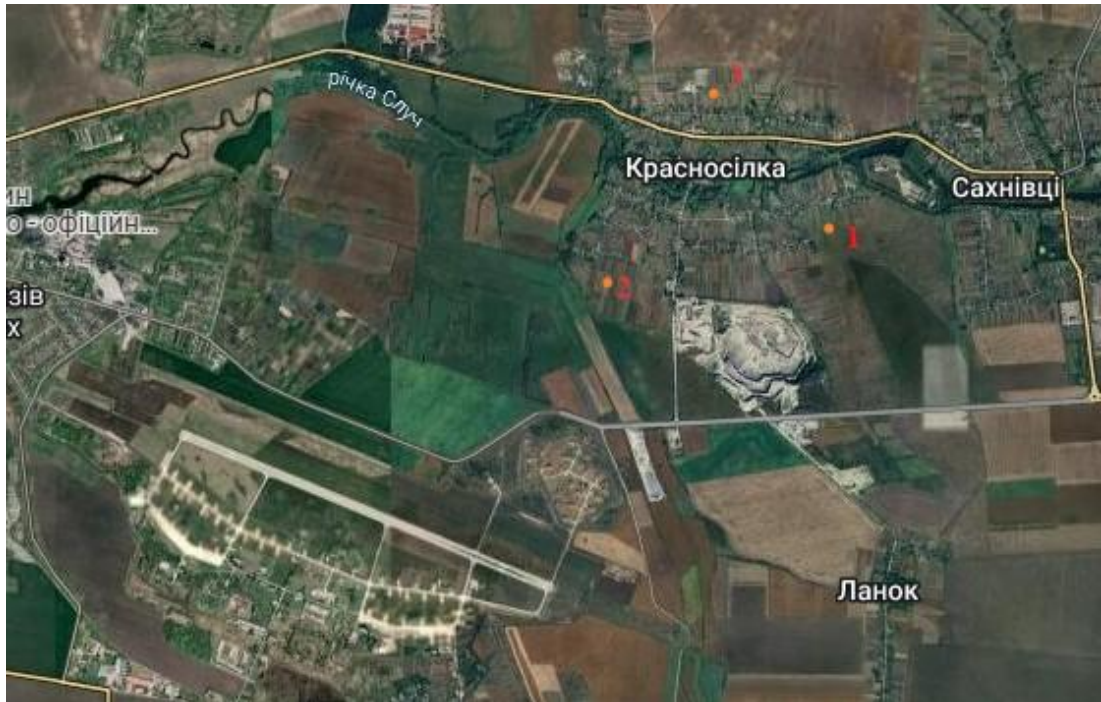


Рисунок 3.1 – Місця відбору ґрунтів для аналізу на території села Красносiлка

Таблиця 3.1 – Концентрація важких металів у ґрунті у першій точці падіння БПЛА

Важкі метали	ГДК, мг/кг	Концентрація у місці вибуху, мг/кг	Концентрація поза зоною впливу вибуху (фонова), мг/кг	Відсоток до фонової концентрації, %
Свинець	6,0	3,20	2,300	139,13
Кобальт	5,0	0,01	0,01	100
Кадмій	0,7	0,50	0,32	156,25
Мідь	3,0	0,062	0,06	103,33
Цинк	23,0	0,32	0,32	100
Нікель	4,0	0,29	0,18	161,11
Марганець	140,0	9,95	9,50	104,74
Хром	0,05	0,05	0,03	166,67
Миш'як	2,0	0,11	0,09	122,22
Ртуть	2,1	1,03	0,15	686,67

Результати дослідження ґрунтів з місць падіння безпілотних літальних апаратів у точці № 2, що розташована на південно-західній частині села Красносілка, наведені в таблиці 3.2 (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Точка № 2 відбору проб ґрунту на місці падіння БПЛА (листопад 2024 року)

Дані, наведені в таблиці 3.2, свідчать, що в місці утворення вирви внаслідок падіння БПЛА спостерігається перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) за такими важкими металами, як свинець, кадмій, хром і ртуть. Найбільше перевищення ГДК виявлено для ртуті, що становить більше ніж 1,63 рази, наступним йде кадмій – 1,21 рази, хром – 1,2 рази, а свинець перевищує ГДК на 1,08 рази.

Окрім того, хоча концентрація цинку і марганцю не перевищує встановлені нормативи ГДК, вона значно вища за рівні цих металів на контрольній точці. Зокрема, перевищення для цинку складає 3,5 рази, а для марганцю – 1,7 рази.

Таблиця 3.2 – Концентрація важких металів у ґрунті у другій точці падіння БПЛА

Важкі метали	ГДК, мг/кг	Концентрація у місці вибуху, мг/кг	Концентрація поза зоною впливу вибуху, (фонова), мг/кг	Відсоток до фонові концентрації, %
Свинець	6,0	6,50	3,70	175,68
Кобальт	5,0	0,50	0,35	142,86
Кадмій	0,7	0,85	0,45	188,89
Мідь	3,0	0,33	0,29	113,80
Цинк	23,0	12,56	3,58	183,53
Нікель	4,0	1,56	0,85	350,84
Марганець	140,0	114,69	68,25	168,04
Хром	0,05	0,06	0,01	600,00
Миш'як	2,0	1,32	0,85	154,93
Ртуть	2,1	3,43	1,12	306,25

Результати досліджень ґрунтів з місць падання безпілотних літальних апаратів у точці № 3 (рисунок 3.3) на півночі села Красносілка наведені в таблиці 3.3.



Рисунок 3.3 – Точка № 3 відбору проб ґрунту на місці падіння БПЛА (жовтень 2024 року)

Таблиця 3.3 – Концентрація важких металів у ґрунті у третій точці падіння БПЛА

Важкі метали	ГДК, мг/кг	Концентрація у місці вибуху, мг/кг	Концентрація поза зоною впливу вибуху, (фонова), мг/кг	Відсоток до фонові концентрації, %
Свинець	6,0	4,88	0,23	2121,74
Кобальт	5,0	0,15	0,14	107,14
Кадмій	0,7	0,04	0,041	97,57
Мідь	3,0	0,2	0,2	100
Цинк	23,0	3,6	2,9	124,14
Нікель	4,0	0,37	0,35	105,71
Марганець	140,0	51,90	51,00	101,76
Хром	0,05	0,01	0,01	100
Миш'як	2,0	0,88	0,12	733,3
Ртуть	2,1	1,11	0,09	1233,3

Дані, наведені в таблиці 3.3, показують, що концентрація важких металів у ґрунтах у точці № 3, розташованій на північній частині села Красносілка, не перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК).

Однак, у ґрунті спостерігаються підвищені концентрації свинцю, марганцю, миш'яку та ртуті. Важливо відзначити, що в місці вибуху концентрації свинцю, миш'яку та ртуті значно перевищують їх рівні на контрольній точці: перевищення для свинцю становить 21 раз, для миш'яку – 7,33 рази, а для ртуті – 12,3 рази.

На рисунку 3.4 представлені узагальнені дані, що характеризують концентрацію важких металів у районах вибухів на території Хмельницької області. З аналізу цього рисунка випливає, що внаслідок бойових дій найбільші рівні концентрації важких металів, зокрема свинцю, цинку та ртуті, зафіксовані в районі вибухів на ділянці № 2, що розташована у південно-західній частині села.

Рисунок 3.5 містить інформацію про рівень забруднення марганцем на території села Красносілка, зокрема в зонах вибухів та на контрольній ділянці, що порівнюється з гранично допустимими концентраціями (ГДК). За даними цього рисунка, хоча концентрація марганцю на місці вибухів не перевищує встановлені норми ГДК, спостерігається суттєве перевищення

фонової концентрації на точці № 2, майже в 1,7 рази, що може бути наслідком впливу військових дій.

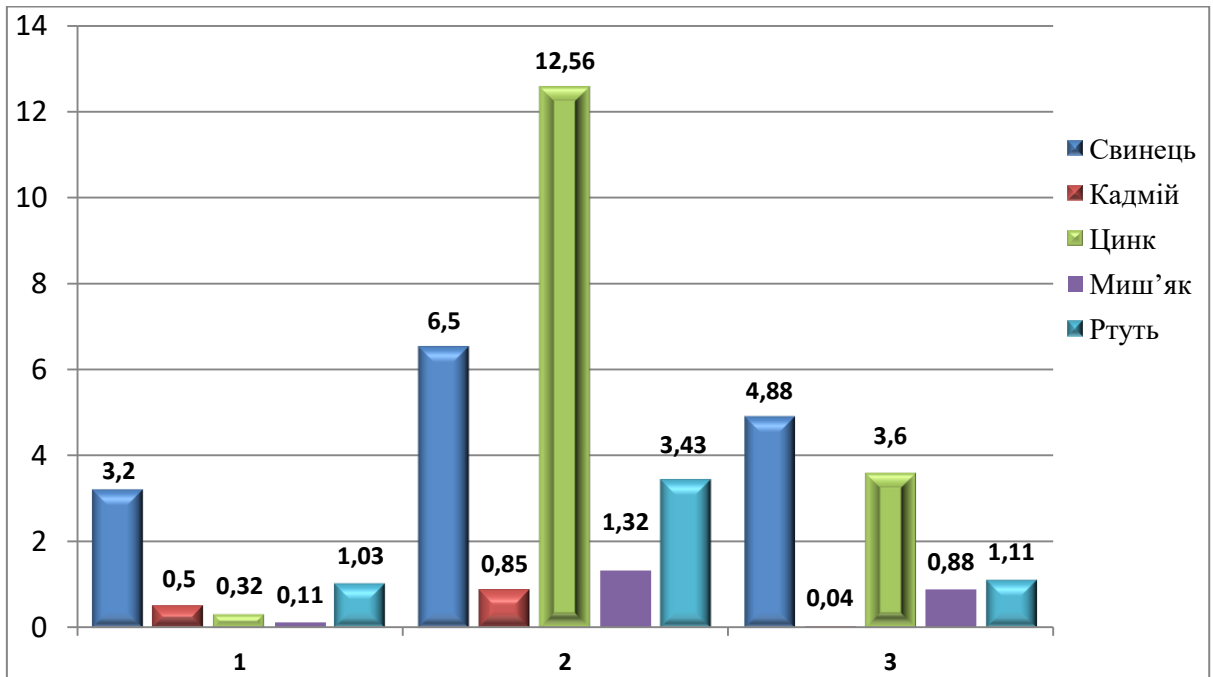


Рисунок 3.4 – Зведені дані стосовно важких металів, що мають найвищу концентрацію у межах села Красносілка, мг/кг

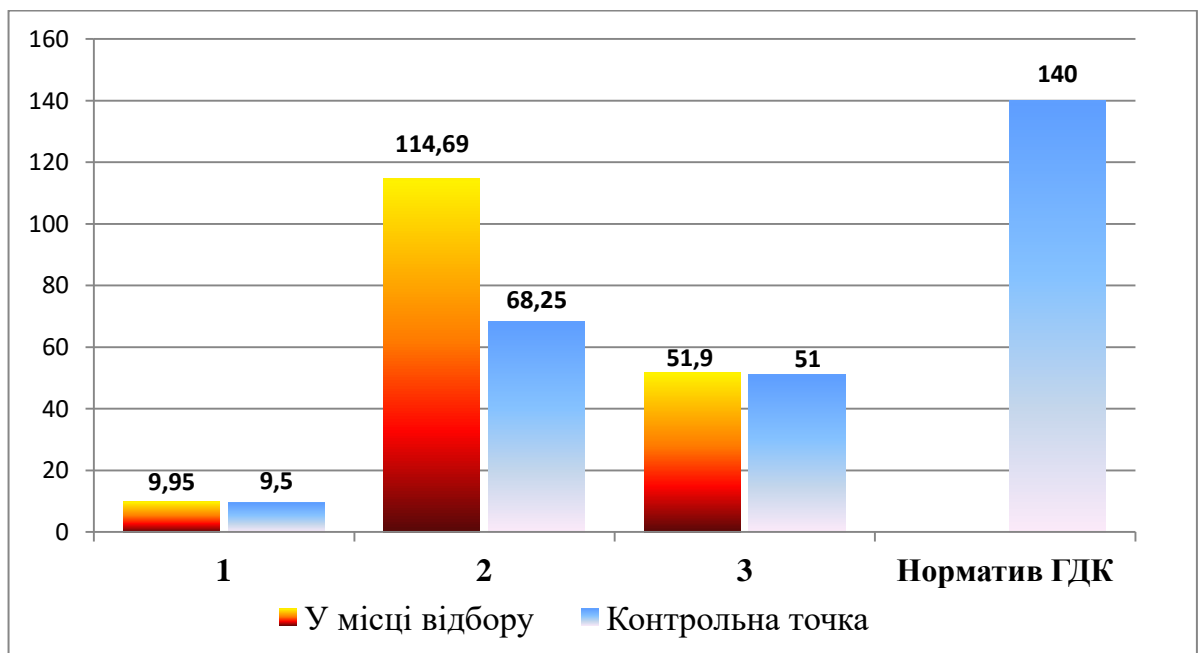


Рисунок 3.5 – Дані забруднення марганцем на території села Красносілка у місці вибухів та контрольній ділянці у порівнянні з нормативом ГДК, мг/кг

Залізо є одним із найбільш поширених елементів у природному середовищі та належить до елементів III класу небезпеки. В природі воно існує в трьох формах, з яких найагресивнішою для навколишнього середовища є форма іржі. Результати хімічних аналізів вмісту заліза в ґрунті, що виникли внаслідок військових дій на території Хмельницької області, представлені в таблиці 3.4 (рисунок 3.6).

Таблиця 3.4 – Вміст заліза у ґрунті в результаті військових дій на території Хмельницької області, мг/кг

Точка відбору	У місці вибуху	Поза зоною впливу вибуху, (фонова концентрація)	Відсоток до фонові концентрації, %
1	11,13	7,53	147,8
2	28,62	8,15	351,2
3	15,15	12,24	123,8



Рисунок 3.6 – Місце падіння БПЛА типу «Shahed-136»

Вміст валових форм заліза в точках відбору ґрунтів у зоні падіння безпілотників і ракет коливався від 11,11 мг/кг до 28,62 мг/кг ґрунту, в той час як за межами зони бойових дій цей показник варіював від 7,53 мг/кг до 12,24 мг/кг ґрунту. Перевищення фонового рівня було зафіксовано у всіх трьох відібраних пробах ґрунту.

Середнє значення вмісту заліза в забруднених територіях села Красносілка, де були проведені аналізи, в 1,97 рази перевищувало фонові показники.

Найбільший ступінь забруднення ґрунтового покриву був виявлений у пробі, відібраній на точці № 2, де вміст заліза в порівнянні з фоновим рівнем був вищим у 3,51 рази.

З урахуванням серйозності ситуації, що виникла внаслідок бойових дій на території села Красносілка, існує нагальна потреба у пошуку ефективних шляхів вирішення проблеми забруднення ґрунтів.

3.2 Розробка заходів щодо відновлення забруднених ґрунтів

Відновлення територій, які зазнали негативного впливу військових дій, є надзвичайно важливим для забезпечення їхнього безпечного та сталого розвитку. Відповідно до Протоколу V до «Конвенції про конкретні види звичайної зброї», існує юридичне зобов'язання щодо очищення, вилучення або знищення вибухонебезпечних залишків війни. Однак наразі відсутні чітко визначені нормативно закріплені вимоги щодо відновлення забруднених земель.

У післявоєнний період однією з важливих задач стане тривала рекультивация ґрунтів на сільськогосподарських угіддях, що впливатиме на агрономічні методи обробки землі. Основною метою рекультиваційних заходів є відновлення природних ґрунтових умов та зниження хімічного впливу на рослини. Сучасні підходи до обробки забруднених ґрунтів включають фізичну, хімічну та біологічну ремедіацію (рисунок 3.7).

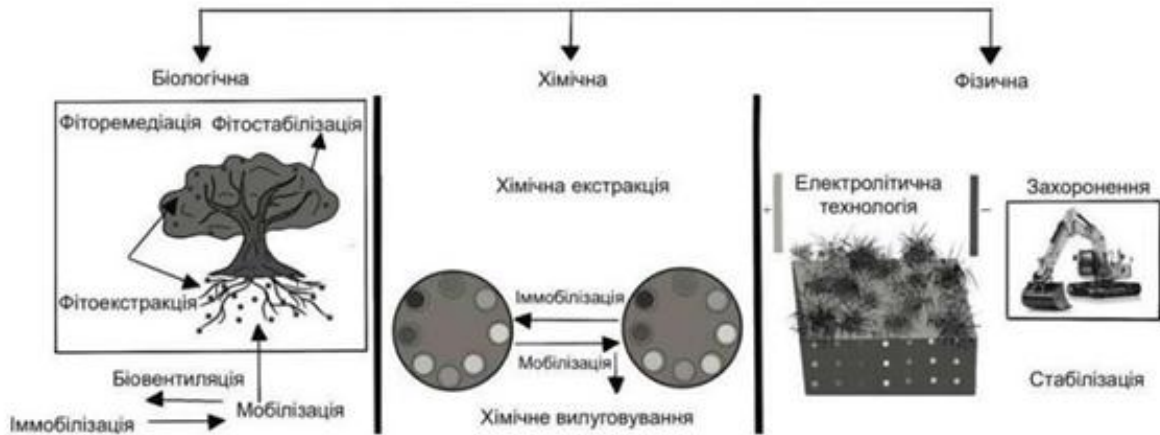


Рисунок 3.7 – Методи обробки забрудненого ґрунту

Вибір технології рекультивації, на нашу думку, значною мірою залежить від характеру та ступеня забруднення, цільового призначення відновлюваної території, а також доступності ефективних та економічно обґрунтованих методів.

Для відновлення родючості ґрунтів, що зазнали забруднення, та їх подальшого введення в сільськогосподарську експлуатацію недостатньо лише механічного засипання утворених вирв. Навіть за оптимальних умов, якщо рослини здатні прорости, залишкові токсичні речовини в ґрунті будуть поглинені кореневою системою і накопичені в продукції, що робить її використання небезпечним.

Прискорення процесів рекультивації є можливим, однак для цього необхідно розробити нові біотехнології, що потребують значних часових та фінансових витрат на проведення відповідних досліджень.

Для вибору оптимальної методики відновлення використовується кумулятивна оцінка ступеня пошкоджень, яка передбачає визначення придатності земельної ділянки для подальшого використання (Додаток А).

У практиках відновлення деградованих земель можуть бути застосовані такі методи:

- відновлення мікробіоти ґрунту з метою покращення біологічної активності;

- зменшення ущільнення ґрунту для покращення його водо- і повітропроникності;

- ліквідація нафтових забруднень, спрямована на детоксикацію ґрунтового середовища.

Для земель сільськогосподарського призначення необхідно здійснити такі заходи:

- оптимізація технологій обробітку ґрунту шляхом переходу на ощадливі методи, такі як strip-till і no-till, а також зменшення кількості проходжень техніки. Це можна досягти через використання дронів, широкозахватних агрегатів, маршрутизацію руху техніки і практики прямого висіву;

- ретельне планування сівозмін для підтримки родючості ґрунтів;

- застосування біологічних препаратів з доведеною ефективністю для відновлення біологічного різноманіття ґрунтів;

- використання сидератів та багаторічних трав для збагачення ґрунту органічними речовинами;

- робота з рослинними рештками – повернення органічної маси в ґрунт, застосування оздоровлювачів ґрунту для пригнічення фітопатогенів;

- внесення гноєвих компостів для поліпшення структури і родючості ґрунту;

- відновлення полезахисних лісосмуг для захисту ґрунтів від вітрової ерозії.

Ці ініціативи формують фундамент для забезпечення сталого використання сільськогосподарських земель та підвищення їх продуктивності. Для відновлення економічної активності на територіях, що зазнали руйнувань через військові дії, перспективним є впровадження технологій фіторемедіації. Цей метод являє собою економічно вигідний підхід до екологічного відновлення, заснований на здатності рослин накопичувати та нейтралізувати токсичні речовини й шкідливі елементи з навколишнього середовища. На сьогодні існує велика кількість наукових

досліджень, що підтверджують ефективність та економічну обґрунтованість фітореMediaції. Однак проблема подальшого використання біомаси, що містить небезпечні сполуки, зокрема важкі метали, залишається невирішеною і вимагає додаткового дослідження. У контексті Європейської директиви щодо відновлюваної енергетики, що забороняє пряме спалювання біомаси для енергетичних потреб, цей підхід може значно полегшити процес відновлення. З цієї точки зору, реабілітація забруднених територій може стати стратегічною перевагою для України на європейському енергетичному ринку.

Для ініціювання відновлювальних процесів доцільно застосовувати консорціуми мікроорганізмів, здатних ефективно розкласти токсичні сполуки, а також мікробні препарати, що сприяють збагаченню ґрунтів корисною мікробіотою. Для вилучення токсичних елементів оптимально використовувати різноманітні види фітореMediaнтів, серед яких особливо ефективними є бобові, злакові та хрестоцвіті рослини. В Інституті вже розроблено серію біопрепаратів, які не тільки сприяють розкладу токсичних речовин у ґрунті, але й підвищують адаптаційні здатності та стійкість до стресів у рослин-фітореMediaнтів, що суттєво поліпшує їхню ефективність у процесах очищення та відновлення земель.

Застосування мікробних біопрепаратів стимулює інтенсивніше розкладання токсичних сполук у ґрунті, прискорює ріст і розвиток рослин-фітореMediaнтів, а також підвищує їхню здатність до вилучення токсичних речовин. Це сприятиме швидкому відновленню земель та їх поверненню до використання для вирощування екологічно чистої сільськогосподарської продукції з покращеними якісними показниками.

Для територій із помірним рівнем забруднення обрано біологічні методи очищення, зокрема фітореMediaцію та фітоекстракцію. Хоча ці технології вимагають певних витрат, вони є відносно природними й передбачають вирощування спеціальних рослин, здатних абсорбувати або переробляти забруднювачі. Після поглинання важких металів рослинний

матеріал разом із накопиченими токсичними речовинами підлягає видаленню з території. Цей процес нагадує механізм дії активованого вугілля, яке застосовується для адсорбції токсинів під час отруєнь.

Для видалення важких металів, таких як свинець (Pb), нікель (Ni), хром (Cr), цинк (Zn) та інших з ґрунту, доцільно використовувати певні види рослин, серед яких соняшник та ріпак мають важливе значення завдяки своїм фітоекстракційним властивостям. Однак подальше використання таких культур у харчовій промисловості після проведення рекультивації є суворо забороненим, оскільки вони можуть накопичувати значну кількість токсичних сполук.

Наукові дослідження здійснили оцінку вартості дев'яти технологій очищення ґрунтів, результати яких представлені в додатку Б.

Для прискорення відновлення родючого шару ґрунту та запобігання його деградації зазвичай рекомендується застосовувати два основні підходи: рекультиваційні практики та консерваційні заходи. Вибір оптимальної технології залежить від ступеня та типу забруднення, цільового призначення земельної ділянки, що потребує відновлення, а також від наявності ефективних технологій з екологічної та економічної точок зору. Згідно з проведеними дослідженнями, для земельних ділянок, що зазнали пошкоджень на понад 75 %, найбільш ефективною стратегією є їх консервація, яка передбачає природне відновлення або фітомеліорацію.

Консервація передбачає припинення або обмеження господарської діяльності та вилучення земель з сільськогосподарського обігу. Найбільш доцільним підходом для управління такими територіями в Хмельницькій області є надання їм природоохоронного статусу, що забезпечить належний менеджмент та сприятиме відновленню екосистем.

Заходи з відновлення земель після воєнних дій в Україні, зокрема в Старокостянтинівській громаді, повинні включати використання консерваційної практики, яка показала свою ефективність після Чорнобильської катастрофи, коли значні території були переведені до

природоохоронних зон. Цей підхід дозволяє відновити екологічний баланс і забезпечити тривале збереження природних ресурсів.

Серед основних рекомендацій для відновлення земель у післявоєнний період виділяються такі ключові заходи:

- проведення комплексної еколого-геохімічної оцінки ґрунтів у поствоєнних ландшафтах з метою глибокого аналізу та визначення пріоритетних напрямків відновлення;
- діагностика біологічної активності та фітотоксичності ґрунтів, взятих із зон бойових дій, у лабораторних умовах для виявлення потенційних загроз;
- розробка схем використання мікробних біотехнологій, що враховують стан ґрунту, наявні токсичні речовини та доступність до методів обробки;
- планування консерваційних заходів для земель з найбільшими пошкодженнями, де природне відновлення є економічно доцільнішим за інші методи рекультивації.

Ці кроки забезпечать раціональне відновлення земельного фонду та сприятимуть стійкому розвитку постраждалих територій.

Серед численних підходів до рекультивації земель важливим чинником є правильний вибір методів, що відповідають типу та ступеню забруднення ґрунту. Однак значною перешкодою для масштабного впровадження цих методів на території Хмельницької області є висока вартість рекультиваційних робіт. Тому не всі заходи можуть бути економічно доцільними, і для деяких земель консервація може виявитися ефективнішою альтернативою.

Ураховуючи високий рівень розораності земель та стрімкі темпи деградації ґрунтів, консерваційні заходи виглядають як перспективний підхід для збереження та відновлення їх родючості й екологічної функції.

ВИСНОВКИ

Починаючи з 24 лютого 2022 року, на території України тривають активні бойові дії, що спричинили низку механічних, фізичних і хімічних впливів на ґрунтовий покрив. Це, своєю чергою, призвело до порушення структурної цілісності ґрунту, деградації його фізико-геохімічних властивостей та дестабілізації функціонування екосистеми загалом.

Держави, що зазнали наслідків збройних конфліктів, розробляють і реалізують стратегії щодо відновлення ґрунтів з метою досягнення екологічної рівноваги та забезпечення продовольчої безпеки.

На території Старокостянтинівської міської громади, зокрема в селі Красносілка, одним із найпомітніших наслідків збройного протистояння є падіння БПЛА. У результаті падіння БПЛА на території села зафіксовано утворення вирв, що свідчить про локальну руйнацію ґрунтового покриву та потребу у подальших відновлювальних заходах.

Результати лабораторних досліджень засвідчили, що на ділянці № 1 (східна частина села), у місцях вибухів концентрації важких металів не перевищують ГДК. Водночас виявлено підвищені рівні свинцю, кадмію, хрому та ртуті порівняно з показниками контрольної точки, що свідчить про локальне забруднення внаслідок техногенного впливу.

На ділянці № 2 (південно-західна частина села) у місцях кратерів зафіксовано перевищення ГДК за вмістом свинцю, кадмію, хрому та ртуті. Найвищий рівень перевищення встановлено для ртуті – понад 1,63 рази. Хоча концентрації цинку й марганцю не перевищують нормативних значень, їхній вміст суттєво вищий порівняно з контрольними значеннями, що вказує на техногенне збагачення ґрунту цими елементами.

На ділянці № 3 (північна частина села) концентрації важких металів у місцях вибухів не перевищують встановлених нормативів. Проте порівняно з контрольними зразками зафіксовано підвищені концентрації свинцю,

миш'яку та ртуті, що також свідчить про вплив вибухової діяльності на хімічний склад ґрунту.

Найвища загальна концентрація важких металів, зокрема свинцю, цинку та ртуті, виявлена у зразках ґрунту з місць вибухів на ділянці № 2, що визначає її як зону з найвищим рівнем техногенного навантаження та пріоритетною для проведення заходів екологічної реабілітації.

Згідно з результатами лабораторного аналізу, вміст валових форм заліза у зразках ґрунтів, відібраних у зонах падіння безпілотних літальних апаратів, варіював у межах від 11,11 мг/кг до 28,62 мг/кг. Для порівняння, на контрольних ділянках, розташованих поза межами впливу БПЛА, концентрація заліза становила від 7,53 мг/кг до 12,24 мг/кг. Перевищення фонового рівня заліза зафіксовано в усіх аналізованих пробах, що вказує на загальне техногенне забруднення території.

Найбільший ступінь порушення ґрунтового покриву встановлено на ділянці № 2, де концентрація заліза перевищила фонове значення у 3,51 рази.

Серед сучасних підходів до оцінки та прогнозування стану ґрунтів в умовах воєнного впливу варто виокремити: супутниковий моніторинг і дистанційне зондування, використання ГІС та карт ризику, біоіндикацію, застосування БПЛА з датчиками, моделі машинного навчання, а також нанотехнології для ремедіації.

Для відновлення деградованих земель ефективними є: відновлення мікробіоти для підвищення біоактивності ґрунту, зменшення його ущільнення та ліквідація нафтового забруднення з метою детоксикації.

Для пришвидшення відновлення родючості ґрунтів та запобігання їх подальшій деградації доцільно використовувати рекультиваційні та консерваційні підходи. Проте високі витрати на рекультивацію значно ускладнюють її широке впровадження в межах Старокостянтинівської громади, тому для частини територій економічно доцільнішою стратегією може бути консервація.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Балюк С. А. Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня / С. А. Балюк, В. В. Медведєв, Л. І. Воротинцева // Вісник аграрної науки. – 2017. – № 8. – С. 5–11.
2. Hury J. P. Introducing «bombturbation», a singular type of soil disturbance and mixing / J.P. Hury, R.J. Schaetzl // Soil Sci. – 2006. – P. 823–836.
3. Takahashi K. Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar – soil characterisation and its verification by a field test / K. Takahashi, H. Preetz, J. Igel // J. Appl. Geophys – 2011. – № 73. – P. 368–377.
4. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко. – Київ : ГО – Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. – 32 с.
5. Василюк О. Вплив військової діяльності на природу України: посібник / О. Василюк, К. Норенко. – Львів : Манускрипт, 2019 – 68 с.
6. Weber A.K. Reduction in lead exposures with lead-free ammunition in an advanced urban assault course / A. K. Weber, D. I. Bannon, J. H. Abraham, R. B. Seymour, P. H. Passman // J. Occup. Environ. Hyg. – 2020. – № 17 (11–12). – P. 598–610.
7. Khan K.Y. Bioavailability and bioaccessibility of Cd in low and high Cd uptake affinity cultivars of Brassica rapa ssp. Chinensis L. (Pakchoi) using an In vitro gastrointestinal and physiologically-based extraction test. Commun / K. Y. Khan, P. J. Stoffella, Y. Feng // Soil Sci. – 2020. – Plan 51 (1). – P. 28–37.
8. Rehman K. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences / K. Rehman, F. Fatima, I. Waheed, M.S.H. Akash // J. Cell. Biochem. – 2018. – № 119 (1). – P. 157–184.
9. Baraquoni, N. A. It takes time to unravel the ecology of war in Gaza, Palestine: long-term changes in maternal, newborn and toddlers' heavy metal

loads, and infant and toddler developmental milestones in the aftermath of the 2014 military attacks / N.A. Baraquoni, S.R. Qouta, S.Y. Diab // *Int. J. Environ. Res. Publ.* – 2020. – Health 17 (18). – P. 6698.

10. Manduca P. Long term risks to neonatal health from exposure to war-9 Years long survey of reproductive health and contamination by weapon-delivered heavy metals in Gaza, Palestine / P. Manduca, N. Al Baraquuni, S. Parodi // *Int. J. Environ.* – 2020. – Health 17 (7). – P. 2538.

11. Fayiga A. O. Remediation of inorganic and organic contaminants in military ranges / A.O. Fayiga // *Environ. Chem.* – 2019. – 16 (2). – P. 81–91.

12. Rylott E. L. Right on target: using plants and microbes to remediate explosives / E.L. Rylott, N.C. Bruce. – *Int. J.* – 2019.– *Phytoremediation* 21 (11). – P. 1051–1064.

13. Забруднення земель внаслідок агресії росії проти України / А. Сплодитель, О. Голубцов, С. Чумаченко, Л. Сорокіна – Київ : ГО – Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. – 154 с.

14. Все про забруднення земель в Україні внаслідок воєнних дій. Куркуль – онлайн-асистент фермера. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kurkul.com/spetsproekty/1423-chi-mojna-vilikuvati-grunt-vid-viyni--vidpovid-na-nauroshirenishi-zapitannya> (дата звернення 14.05.2025).

15. Singh, S. N. Phytoremediation of TNT and RDX / S.N. Singh, S. Mishra // In: Singh, S.N. (Ed.), *Biological remediation of explosive residues*. Springer, Cham, 2014. – P. 371–392.

16. Pilon-Smits E.A. Phytoremediation / E.A. Pilon-Smits // *Annu.* – 2005. – *Rev. Plant. – Biol.* 56. – P. 15–39.

17. Jentsch A. Assessing conservation action for substitution of missing dynamics on former military training areas in Central Europe / A. Jentsch S. Friedrich, T. Steinlein, W. Beyschlag, // *Restoration Ecology.* – 2009. – № 2(1). – P. 107–116.

18. Via S. M. Phytoremediation of Explosives. In: Shmaefsky B. (eds) *Phytoremediation. Concepts and Strategies in Plant Sciences* Springer, Cham. –

2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00099-8_8 (дата звернення 10.05.2025).

19. Рибалова О.В. Новий метод оцінки ризику для здоров'я населення від забруднення ґрунтів важкими металами. Проблеми надзвичайних ситуацій / О. В. Рибалова, О. В. Бригада, О. О. Бондаренко, Є.О. Макаров. – 2019. – № 1(29). – С. 79–99.

20. На межі виживання: знищення довкілля під час збройного конфлікту на сході України / А.Б. Блага, І.В. Загороднюк, Т.Р. Короткий, О.А. Мартиненко, М.О. Медведєва, В.В. Пархоменко; за заг. ред. А.П. Бущенко / Українська Гельсінська спілка з прав людини. – Київ : КИТ, 2017 – 88 с.

21. Вплив військової діяльності на природу України: посібник / О. Василюк, К. Норенко. – Львів : «Компанія «Манускрипт»», 2019. – 68 с.

22. Singh, S. N. Phytoremediation of TNT and RDX. In: Singh, S.N. (Ed.) / S. N. Singh, S. Mishra // Biological remediation of explosive residues. Springer, Cham, 2014. – P. 371–392.

23. Вплив військової діяльності на природу України: посібник / О. Кравченко, О. Василюк, К. Норенко // Львів : «Компанія «Манускрипт»», 2019 – 68с.

24. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко – Київ: ГО – Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. – 32 с.

25. Наказ Міністерства охорони здоров'я № 1595 від 14.07.2020 «Про затвердження Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті». – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text> (дата звернення: 16.05.2025).

26. Linkov et al. Munitions and explosives of concern: international governance and applications for the United States. Environmental Sciences Europe 2014. P. 26 – 30. – Режим доступу: <http://www.enveurope.com/content/26/1/30> (дата звернення: 17.05.2025).

27. Robinson B.H. Plant uptake of trace elements on a Swiss military shooting range: uptake pathways and land management implications / B. H. Robinson, S. Bischofberger, A. Stoll, D. Schroer, G. Furrer, S. Roulier, A. Gruenwald, W. Attinger, R. Schulin // Environ. Pollut. – 2008. – № 153 (3). – P. 668–676. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.08.034> (дата звернення: 20.05.2025).

28. Пошкоджена земля: як відновити родючість ґрунту після бомбардувань та пожеж? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agrilab.ua/poshkodzhena-zemlya-yak-vidnovyty-rodyuchist-gruntu-pislya-bombarduvan-ta-pozhezh> (дата звернення: 21.05.2025).

29. Кумбер Є. «Ніде у світі з таким не стикалися». Росія застосувала проти України всі наявні типи ракет – Повітряні сили [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/raketni-udari-po-ukrajini-rosiya-vikoristovuye-vsi-tipi-raket-ale-pochinaye-ekonomiti-dorogi-50256188.html> (дата звернення: 21.05.2025).

30. Петрович О. Військові шрами на українських полях, або Як відновити аграрний ландшафт після бомбардування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://latifundist.com/blog/read/2884-vijskovi-shrami-na-ukrayinskih-polyah-abo-yak-vidnoviti-agrarnij-landshaft-pislya-bombarduvannya> (дата звернення: 21.05.2025).

31. Кравченко О. Воєнні дії на сході України – цивілізаційні виклики людству. Львів : ЕПЛ, 2015. 136 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2015/07/1817_WEB_EPL_Posibnuk_ATO_Cover_Ukrainian.pdf (дата звернення: 05.06.2025).

32. Норенко К. Наслідки розривів снарядів на сході України: понівечена отруєна земля. Екологія. Право. Людина. – 2015. – № 23–24 (63–64). – С. 60–63.

33. Крайнюков О. М. Оцінка впливу важких металів на фотосинтезуючий апарат рослин / О. М. Крайнюков, І. А. Кривицька,

Ю. Ю. Черкашина // Young Scientist. Сер. Біологічні науки. – 2020. – № 4 (80). – С. 244–252.

34. Методика визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98/conv/page2> (дата звернення 22.05.2025).

35. Рекультивация та фітомеліорація / В. П. Кучерявий та ін. Львів : Світ, 2006. – 116 с.

36. Впровадження новітньої технології хімічної та фітомеліорації кислих та засолених ґрунтів / Н. В. Заїменко та ін. // Nauka innov, 2016. – № 12 (1). – С. 66–77.

37. Порядок консервації земель від 19.01.2022 р. № 35. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/35-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 24.05.2025).

38. Гусарова А. Мікробні продукти можуть знизити вплив важких металів на рослини у разі забруднення ґрунтів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://superagronom.com/news/16438-mikrobni-produkti-mojut-zniziti-vpliv-vajkih-metaliv-na-roslini-u-razi-zabrudnennya-gruntiv> (дата звернення: 25.05.2025).

39. Іванішена Т. В. Сучасні підходи у дослідженні якості ґрунтів внаслідок забруднення військовими діями / Т. В. Іванішена, П. І. Лепікаш // Перспективи розвитку науки, освіти і суспільства в контексті євроінтеграції: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Ізмаїл, 31 жовтня 2024 р.): у 2 ч. Ізмаїл : ЦФЕНД, 2024. – С. 41–44.

40. Кваліфікаційна робота : методичні рекомендації щодо її виконання здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 101 «Екологія» / Н. Г. Міронова, О. О. Єфремова, С. М. Шевченко. Хмельницький : ХНУ, 2024. – 38 с.

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

ВИЗНАЧЕННЯ КАТЕГОРІЇ ПРИДАТНОСТІ ДО ВИКОРИСТАННЯ
ЗЕМЕЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ

Таблиця А.1 – Визначення категорії придатності до використання земельної ділянки

Рівень пошкодження (S, %)	Категорія придатності земель	Характеристика забруднених ґрунтів	Використання	Необхідні заходи
Пошкодження дуже низького рівня до 10 % площі ділянки	Безумовно придатні	Вміст хімічних речовин у ґрунті перебуває в межах фонових значень	Ведення сільськогосподарської діяльності. Вирощування будь-яких культур	не потрібні
Пошкодження низького рівня від 10 % до 25 % площі ділянки	Придатні	Вміст хімічних речовин у ґрунті перевищує фонове значення, але не вище ГДК	Використовують під будь-які культури за умови контролю за якістю сільськогосподарської продукції	Проведення агротехнічних заходів для зменшення надходження металів у продукцію (вапнування, застосування органічних і мінеральних добрив)
Пошкодження середнього рівня від 25 % до 50 % площі ділянки	Мало придатні	Вміст хімічних речовин у ґрунтах перевищує ГДК при лімітуючому транслокаційному показнику	Використання під технічні культури без отримання на них продуктів харчування та кормів	Фіторемедіація, підбір сільськогосподарських культур, що не накопичують забруднюючі речовини. Проведення агротехнічних заходів
Пошкодження середнього рівня від 50 % до 75 % площі ділянки	Умовно придатні	Вміст хімічних речовин у ґрунтах перевищує ГДК для більшості досліджувальних забруднюючих речовин	Використання під культурні пасовища, вирощування ефіроолійних культур	Протиерозійні, гідротехнічні, фізичні та хімічні рекультивації. Виключаючи вирощування культур для продовольчих цілей
Пошкодження катастрофічного рівня від 75 % до 100 % площі ділянки	Не придатні	Вміст хімічних речовин у ґрунтах перевищує ГДК за всіма показниками	Вилучення із сільськогосподарського використання. Консервація	Природне відновлення

ДОДАТОК Б

(довідковий)

ВАРТІСТЬ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТУ

Таблиця Б.1 – Вартість технологій очищення ґрунту [17, с. 87]

№ п/п	Технологія	Орієнтовна вартість, USD
1	Землеробство	Лабораторні дослідження від 20 000 USD/м ³ ; Пілотні дослідження від 100 000 USD; Обробка 1 м ³ ґрунту до 100 USD;
2	Стабілізація	Вартість технології з реагентами складає (за 1 м ³): – від 50 USD до 120 USD для поверхневих забруднень; – від 200 USD для глибинних. Окремо закладається вартість на обладнання від 200 000 USD у залежності від особливостей території та вартості енергоносіїв
3	Фітосанація	Вартість 1 га потужністю 0,5 м ґрунту складає від 150 USD до 250 000 USD
4	Компостування	Вартість технології залежить від кількості обробленого ґрунту, доступності поживних речовин, типу забруднення і складає від 200 USD за 1 м ³
5	Хімічне вилуговування (промивання)	Вартість технології складає від 30 USD до 300 USD за 1 м ³ з урахуванням типу та концентрації речовин, що входять в склад розчину
6	Термічна десорбція	Вартість обробки складає від 10 USD до 70 USD за 1 м ³ ґрунту. Пілотні дослідження сягають затрат від 10 000 USD. Концентрація забруднень, ландшафтно-геохімічні умови визначають верхню межу вартості
7	Хімічна екстракція	Вартість технології оцінюється від 150 USD до 500 USD за 1 м ³ ґрунту
8	Хімічне окислення/відновлення	Вартість всього процесу оцінюється в межах від 200 USD до 500 USD за тону обробленого ґрунту без врахування затрат на аналітичні дослідження
9	Захоронення	Вартість 1 т становить від 1 000 000 USD