


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

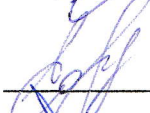
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти

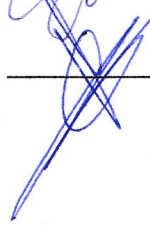
ОЦІНКА ТОКСИЧНОСТІ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВНАСЛІДОК  
ВІЙСЬКОВИХ ОБСТРІЛІВ

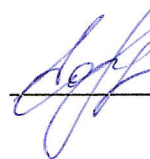
Галузь знань – 10 «Природничі науки»  
Спеціальність – 101 «Екологія»

ДРЕКОЛ. 023185.01.03.00

Виконав: здобувач 2 курсу групи ЕКОЛм-23-1  Богдан ГНАТЮК

Керівник  Ольга ЄФРЕМОВА

Нормоконтролер  Сергій ШЕВЧЕНКО

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри екології  
та біологічної освіти  Ольга ЄФРЕМОВА

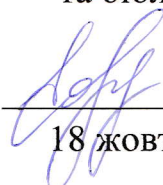
18 грудня 2024 р.

Хмельницький 2024

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри екології  
та біологічно освіти

 Ольга ЄФРЕМОВА  
18 жовтня 2024 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
Гнатюку Богдану В'ячеславовичу

1. Тема роботи «Оцінка токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок військових обстрілів»

керівник роботи Єфремова Ольга Олексіївна, завідувач кафедри екології та біологічної освіти, кандидат технічних наук, доцент.

затверджено наказом ректора університету від 26 серпня 2024 р. № 60.

2. Строк подання здобувачем роботи на кафедру 16 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: довідники, статті, узагальнені дані про стан ґрунтів в результаті впливу військових дій; відомості щодо методів біотестування об'єктів навколишнього середовища.

4. Зміст роботи: 1. Вплив військових дій на екологічний стан ґрунтів. 2. Біотестування в оцінці токсичності ґрунтів. 3. Оцінка токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок військових обстрілів методом біотестування.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу(розділів) кваліфікаційної роботи	Термін виконання роботи	Примітка
1	Визначення об'єкта і предмета дослідження, постановка мети і завдань відповідно до теми кваліфікаційної роботи, формулювання актуальності та гіпотези дослідження. Оформлення вступу	до 01.11	виконано
2	Розділ I Вплив військових дій на екологічний стан ґрунтів	до 15.11	виконано
3	Розділ II Біотестування в оцінці токсичності ґрунтів	до 20.11	виконано
4	Розділ III Оцінка токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок військових обстрілів методом біотестування	до 08.12	виконано
5	Загальні висновки	до 10.12	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	до 12.12	виконано
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи (за графіком)	до 15.12	виконано
8	Захист кваліфікаційної роботи (відповідно до графіка)	24.12	виконано

Дата видачі завдання: 21 жовтня 2024 р.

Здобувачка

 Богдан ГНАТЮК

Керівник

 Ольга ЄФРЕМОВА

## АНОТАЦІЯ

Тема – Оцінка токсичності ґрунтів, забруднених в наслідок військових обстрілів.

Автор – здобувач ЕКОЛМ-23-1 Богдан ГНАТЮК.

Керівник – завідувач кафедри екології та біологічної освіти, кандидат технічних наук, доцент Ольга ЄФРЕМОВА.

Кваліфікаційна робота викладена на 72 сторінках, містить 27 рисунків, 43 таблиці та перелік джерел посилань, що містять 50 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ҐРУНТИ, ТОКСИЧНІСТЬ, ГЕНОТОКСИЧНІСТЬ, БІОТЕСТУВАННЯ, КРЕС-САЛАТ, ВІЙСЬКОВІ ДІЇ, ВІЙСЬКОВІ ОБСТРІЛИ.

У роботі досліджено вплив військових дій на екологічний стан ґрунтів із використанням методів біотестування для оцінки їх токсичності. У першому розділі проаналізовано наслідки військових дій для ґрунтового покриву з точки зору забруднення важкими металами, токсичними сполуками та іншими поллютантами. Другий розділ присвячено теоретичним засадам біотестування як методу оцінки токсичності ґрунтів. Розглянуто вплив порушень ґрунтів на біоту, міграцію забруднюючих речовин, а також методологію проведення біотестування. У третьому розділі проведено практичне дослідження токсичності та генотоксичності ґрунтів. У висновках сформульовано основні результати роботи, дані рекомендації щодо моніторингу та екологічного відновлення територій, постраждалих від військових обстрілів.

16.12.2024

 Богдан ГНАТЮК

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	5
1 Вплив військових дій на екологічний стан ґрунтів.....	8
2 Біотестування в оцінці токсичності ґрунтів.....	23
2.1 Вплив порушення ґрунтів на біоту та шляхи міграції забруднюючих речовин .....	23
2.2 Оцінка токсичності ґрунтів методами біотестування.....	36
3 Оцінка токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок військових обстрілів методом біотестування.....	45
3.1 Характеристика зони дослідження.....	45
3.2 Біотестування забруднених ґрунтів за допомогою насіння крес-салату .....	49
3.3 Біотестування водних витяжок забруднених ґрунтів .....	53
3.4 Визначення генотоксичності забруднених ґрунтів.....	55
3.5 Оцінка ступеню токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок обстрілів.....	60
Висновки.....	62
Перелік джерел посилання.....	65
Додаток А. Результати апробації роботи.....	73

## ВСТУП

Військові дії, які тривають на території України, окрім безпосередніх людських і матеріальних втрат, створюють значний негативний вплив на природне середовище. Особливе занепокоєння викликає стан ґрунтів, що є одним із ключових компонентів екосистеми. Ґрунт виконує життєво важливі функції: забезпечує родючість для рослин, виступає фільтром для води, підтримує біорізноманіття, зберігає вуглець, а також слугує середовищем для безлічі мікроорганізмів. Проте воєнні дії спричиняють забруднення ґрунтів важкими металами, токсичними речовинами, вибуховими залишками, хімікатами та продуктами горіння, що в результаті призводить до їх деградації.

Ураження ґрунтів військовими обстрілами має комплексний характер. Внаслідок потрапляння боєприпасів та супутніх хімічних речовин у ґрунт відбувається зміна його фізико-хімічних властивостей, накопичення токсичних елементів і порушення природних процесів ґрунтоутворення. Таке забруднення має довготривалий характер, адже деякі хімічні елементи можуть залишатися в ґрунті протягом десятиліть, завдаючи шкоди екосистемі та здоров'ю людей, які проживають у таких регіонах.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вивчення впливу військових дій на екологічний стан ґрунтів, зокрема оцінки їхньої токсичності. Це дозволяє не лише оцінити масштаби екологічної катастрофи, але й розробити ефективні заходи для реабілітації пошкоджених територій. Важливим інструментом такого дослідження є біотестування, яке дозволяє визначати токсичний вплив забруднень на живі організми за допомогою тестових об'єктів, таких як рослини, ґрунтові безхребетні чи мікроорганізми.

Мета роботи полягає у проведенні оцінки токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок військових обстрілів, із використанням біотестування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- вивчити типи порушень ґрунтів, що виникають під час військових дій;
- дослідити механізми міграції забруднюючих речовин у ґрунтах та їхній вплив на екологічний стан;
- провести біотестування забруднених ґрунтів із використанням рослинних тест-систем;
- визначити ступінь токсичності досліджуваних ґрунтів на основі отриманих даних.

Об'єктом дослідження є ґрунти, забруднені внаслідок військових обстрілів. Зокрема, увага приділяється змінам фізико-хімічних характеристик ґрунтів, спричинених впливом важких металів, вибухових речовин, продуктів горіння та інших забруднюючих компонентів, які потрапляють у ґрунтове середовище під час воєнних дій.

Предметом дослідження є рівень токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок військових обстрілів, та його вплив на біологічні об'єкти. Зокрема, увага зосереджується на оцінці токсичності за допомогою біотестування, що включає використання рослинних тест-систем та на визначенні генотоксичності забруднених ґрунтів.

Гіпотеза дослідження. Забруднення ґрунтів, спричинене військовими обстрілами, суттєво впливає на їхню екологічну якість, що проявляється в токсичній дії на живі організми. Використання методів біотестування дозволяє точно ідентифікувати рівень токсичності ґрунтів, а також визначити ступінь впливу забруднюючих речовин на рослинні системи.

Методи дослідження. Теоретичні та лабораторні розробки щодо оцінки токсичності ґрунтів забруднених внаслідок військових обстрілів. У роботі також було використано загальнонаукові методи дослідження: теоретичні, емпіричні, експериментальні.

Очікується, що ступінь токсичності ґрунтів буде залежати від концентрації та складу забруднюючих речовин, а також від характеристик зони дослідження. Біотестування підтвердить наявність кореляції між рівнем

забруднення ґрунту та генотоксичністю, що дозволить оцінити екологічні ризики для навколишнього середовища.

Наукова новизна роботи полягає у використанні методів біотестування для оцінки екотоксичності ґрунтів, забруднених внаслідок військових обстрілів, та у комплексному підході до дослідження впливу забруднень на живі організми.

Практичне значення дослідження. Отримані результати можуть бути використані для створення рекомендацій щодо очищення та відновлення забруднених ґрунтів, а також для моніторингу екологічного стану територій, що постраждали внаслідок воєнних дій. Використання біотестування дає можливість проводити швидкий і точний аналіз стану ґрунтів, що є важливим для прийняття екологічних рішень.

Таким чином, дана робота спрямована на вирішення актуальної екологічної проблеми та зробить внесок у подальший розвиток методології оцінки токсичності ґрунтів.

Апробація результатів дипломної роботи і публікації з теми дослідження. Результати дослідження опубліковано у матеріалах Міжнародної науково-практичної конференції «Подільські читання-2024: Дослідження, охорона довкілля та збереження біотичного та ландшафтного різноманіття, природнича освіта» (м. Кам'янець-Подільський 21-22 листопада 2024 р. (додаток А).

## 1 ВПЛИВ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ НА ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ГРУНТІВ

Військові конфлікти, на жаль, завжди були невід'ємною частиною історії людства, але їх вплив виходить далеко за межі людських втрат та економічних збитків. Одним із найсерйозніших наслідків є руйнівний вплив на довкілля. Війна змінює ландшафти, руйнує екосистеми, забруднює повітря, воду та ґрунти, а також спричиняє втрату біорізноманіття. А в умовах сучасної повномасштабної війни РФ проти України, яка супроводжується застосуванням високотехнологічної зброї, хімічних і радіоактивних речовин, екологічна шкода стає ще більш значною. Наслідки бойових дій впливають не лише на безпосередньо уражені території, а й на сусідні регіони та глобальні екосистеми. Серед основних наслідків:

- фізичні пошкодження. Збройні конфлікти можуть спричинити механічні пошкодження ґрунтового покриву, зокрема вирубування лісів, руйнування верхнього родючого шару, засипання або забруднення ґрунту сторонніми матеріалами. Такі зміни стають причиною деградації ґрунтів і зниження їх продуктивності.

- забруднення. Застосування вибухових матеріалів, ракет, боєприпасів, пального та хімічних сполук може стати джерелом забруднення ґрунту різноманітними токсичними речовинами. Це негативно позначається на якості ґрунту та його здатності забезпечувати зростання рослинності.

- втрата біологічного різноманіття. Збройні конфлікти можуть призводити до значного зменшення біорізноманіття через вирубування лісових масивів, руйнування природних екосистем і масову загибель флори та фауни.

- руйнування інфраструктури. Збройні конфлікти здатні завдавати шкоди інфраструктурі, зокрема системам зрошення, дренажу, іригації та іншим об'єктам аграрного призначення. Це ускладнює раціональне

використання земельних ресурсів і перешкоджає вирощуванню сільськогосподарських культур.

– втрата доступу до земель. Конфлікти можуть змусити населення залишати свої домівки та сільськогосподарські угіддя, що призводить до втрати доступу до земельних ресурсів і зниження продуктивності аграрних територій [1].

Такі наслідки знижують родючість ґрунтів, погіршують здатність землі підтримувати життєдіяльність та підривають економічну стабільність сільських і природних екосистем. Для відновлення земельних ресурсів після збройних конфліктів потрібен комплексний підхід, який включає відновлення ґрунтів, збереження біорізноманіття та відбудову інфраструктури.

Часто вплив збройних конфліктів на стан ґрунтового середовища недооцінюють у порівнянні з людськими втратами та руйнуванням інфраструктури. Водночас, погіршення якісних властивостей ґрунту – це тривалий процес, що значно знижує його продуктивність. Утім, ґрунти здатні поступово відновлювати свої функції та підвищувати продуктивність, залежно від типу ґрунту, характеру воєнного впливу та природних умов території. Відновлення, а інколи й посилення процесів ґрунтоутворення, може компенсувати наслідки техногенного навантаження, спричиненого війною. Гіпотеза гетерогенного впливу передбачає, що найбільше біорізноманіття спостерігається в умовах різнорідних типів втручань, які відрізняються тривалістю та масштабом. При цьому вважається, що ландшафт із такими порушеннями створює сприятливе середовище для видів, здатних адаптуватися до цих умов, а також для появи нових видів.

Для аналізу впливу воєнно-техногенного навантаження на ґрунти після завершення бойових дій застосовується система класифікації рівнів інтенсивності військових впливів з урахуванням характеру забруднень, спричинених бойовими діями. Одним із ключових завдань еколого-геохімічного дослідження ґрунтів у зонах, де відбувалися бойові дії, є

визначення складу та структури факторів цього навантаження, а також встановлення взаємозв'язків між ними [1].

З початку 24 лютого 2022 року Україна перебуває в ескалації повномасштабних бойових дій, які мають серйозні наслідки для ґрунтового покриву. Ці наслідки можна умовно розподілити на дві групи:

- первинні – прямі механічні порушення ґрунтового покриву, тепловий вплив, засмічення поверхні;
- вторинні – ті, що виникають внаслідок відсутності реалізації стратегічних заходів з поствоєнного відновлення, такі як підтоплення, засолення, ерозія, пірогенна деградація, дегуміфікація тощо.

Збройні конфлікти спричиняють численні механічні, фізичні та хімічні зміни у ґрунтовому середовищі. Такі зміни руйнують структуру й функціональність ґрунтових екосистем, а також погіршують їх фізико-геохімічні властивості. Залежно від типу військових об'єктів і характеру бойових дій, спостерігаються різноманітні поєднання пошкоджень: утворення вибухових воронок, наслідки руху військової техніки, руйнація оборонних споруд (окопів, бункерів, протитанкових бар'єрів тощо), забруднення верхнього шару ґрунту продуктами військової діяльності, а також захаращення поверхні уламками техніки й споруд. Руйнування рослинного покриву, пошкодження ґрунту, втрата природного зволоження й опустелювання є типовими наслідками техногенного впливу війни. Це веде до суттєвого скорочення біологічних популяцій і зменшення видового різноманіття, викликаних трансформаціями структури й функцій ландшафтів [2].

Механічний вплив. Механічний вплив, який виникає під час воєнно-техногенного навантаження, проявляється у безпосередньому механічному впливі на ґрунтовий покрив під час пересування військової техніки з колісними або гусеничними шасі, активному переміщенні військових підрозділів, будівництві наземних та підземних об'єктів, бомбардуванні, розмінуванні територій і створенні оборонних споруд. Цей механічний вплив

супроводжується хімічним забрудненням ґрунтів, що в кінцевому підсумку призводить до втрати здатності до довгострокового використання земель і накладення обмежень на їх експлуатацію.

Переміщення військової техніки, як на гусеничному, так і на колісному шасі, є потужним фактором впливу на ґрунтовий покрив. Основним наслідком такого впливу є ущільнення ґрунту, що супроводжується руйнуванням гумусного шару, що, своєю чергою, викликає низку негативних наслідків, зокрема порушення водного балансу та сприяння розвитку ерозійних процесів, які можуть бути як вітровими, так і водними. Зменшення щільності ґрунту призводить до розрідження водонасичених дисперсних ґрунтів, що здатне перевести їх у рідинний стан через руйнування структурних зв'язків під дією динамічних навантажень. Цей процес проходить кілька стадій: руйнування ґрунтової структури; розрідження незв'язних ґрунтів; ущільнення ґрунту (рисунок 1.1).

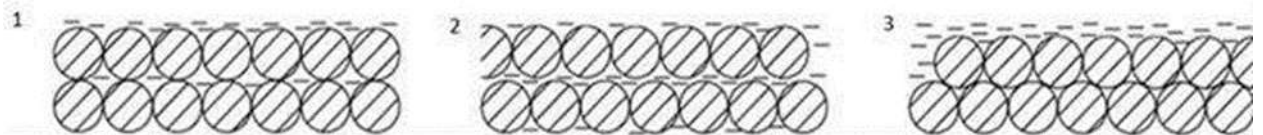


Рисунок 1.1 – Перехід незв'язних водонасичених ґрунтів у розріджений стан (умовна модель) [1]

Руйнування ґрунтової структури виникає внаслідок зміщення шарів частинок один відносно одного під впливом воєнно-техногенних навантажень. Це призводить до втрати міцних зв'язків між частинками ґрунту, що зумовлює повне розрідження структури. Формування більш щільної структури відбувається через поступове занурення ґрунтових агрегатів у нижчі шари розрідженого матеріалу.

Ущільнення ґрунтів негативно впливає на здатність рослин пристосовуватися до змін клімату, посушливих умов і нестачі вологи. Водночас ґрунт, ущільнений внаслідок механічного впливу, стає більш

стійким до подальших воєнно-техногенних навантажень, особливо за умов тривалого дефіциту води, яка є критично важливою для розвитку рослин.

На шляхах руху бойової техніки утворюються колії та глибокі сліди, які часто заповнюються водою, що спричиняє надмірне зволоження місцевості. Порушення ґрунтового покриву також сприяє формуванню великих зон дефляції та вторинного підйому пилу, який може розноситися на значні відстані.

Деформації ґрунтового покриву, зокрема переміщення ґрунтових шарів, виникають під час будівництва фортифікаційних споруд та підземних об'єктів (бліндажі, окопи, траншеї, тунелі, сховища паливних матеріалів, сховища бойових матеріалів). Це сприяє підвищенню ризику небезпечних геоморфологічних процесів, таких як зсуви, заболочування та осідання ґрунту (рисунок 1.2) [3].

Тому при зведенні фортифікаційних споруд важливо враховувати глибину залягання ґрунтових вод та умови вологості ґрунту.



Рисунок 1.2 – Приповерхневі фортифікаційні споруди – траншеї [3].

Формування кратерів під час військових дій є результатом бомбардувань, коли вибухи спричиняють швидке вивільнення енергії, створюючи ударну хвилю. Ця хвиля розходиться від епіцентру вибуху, руйнуючи ґрунтові шари та порушуючи повітряно-водний баланс. Унаслідок вибуху частина ґрунту викидається, утворюючи вирву, а залишки ґрунту на місці удару зазнають турбулентних рухів, динамічного ущільнення та насичуються уламками металу й залишками токсичних вибухових речовин. Кратер стає осередком, де інтенсивно відбуваються процеси накопичення листового опаду, прискореного вивітрювання та вилуговування.

Цей процес порушення ґрунту, що отримав назву «бомбтурбація», включає змішування генетичних горизонтів ґрунту, що призводить до трансформації мікрорельєфу та утворення специфічних поствоєнних ландшафтів (рисунок 1.3). Відкладення, що виходять за межі безпосереднього кратеру, розподіляються настільки розріджено, що їх рідко вивчають [4].

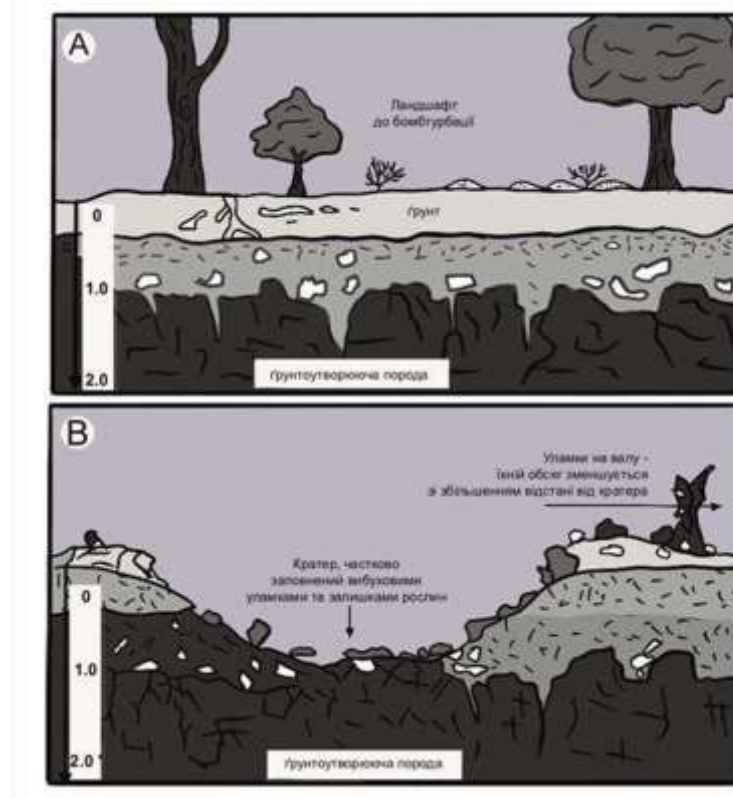


Рисунок 1.3 – Типовий кратер, утворений бомбардуванням [4].

Якщо боеприпаси потрапляють у ґрунт під гострим кутом, формується кругла вирва з піднятими краями або тонкий вал з уламків. У разі вибуху під менш гострим кутом утворюються яйцеподібні чи подовжені кратери, а вибухова хвиля поширюється на значну відстань за межі кратера. У таких умовах ґрунтоутворні відкладення зазнають руйнування та розсіюються під впливом вибухової хвилі.

Під дією вибуху поверхня ґрунту піднімається, утворюючи невисокий вал, половина якого складається з викинутих уламків. Основну частину валу формує структурне підняття підстильної поверхні, яка існувала до вибуху. Краї вирви, під впливом гравітації та великої маси уламків, осідають до її дна. Глибина утвореної вирви визначається складом порід і глибиною їх залягання: у пористих ґрунтах вона буде більшою, ніж у щільних [5].

Утворені вибухами воронки стають місцями накопичення води та органічних речовин. Досить швидко на дні кратера або воронки виникає гідрофільна рослинність, яка відрізняється від типового рослинного покриву навколишньої місцевості (рисунок 1.4). При формуванні воронки в районах, де близько залягають ґрунтові води, процеси розвитку ґрунту та рослинності значно сповільнюються.



Рисунок 1.4 – Кратер, утворений бомбардуванням і заповнений ґрунтовими водами [5].

Так звані «килимові бомбардування» значно порушують ландшафти, що призводить до деградації ґрунтів і посилення процесів внутрішньо-ґрунтового озалізнення (рисунок 1.5) [6].



Рисунок 1.5 – Наслідки «килимових бомбардувань» [6].

Крім початкових змін у стані ґрунтового покриву, механічний вплив виявляється також у забрудненні ґрунтів залишками військових дій, серед яких металеві частини від гільз та осколки артилерійських боєприпасів. Велика частина забруднення зумовлена вибуховими речовинами, що містяться в боєприпасах, які здатні випадково вибухати під впливом зовнішнього тиску.

Під час розмінування території гумусовий горизонт руйнується, що призводить до втрати фізико-хімічних властивостей ґрунту та змінює його гранулометричний і агрегатний склад. Це погіршує родючість ґрунту та його водоутримуючу здатність. Установка мін передбачає виникнення турбулентності ґрунту в майбутньому. Вибухова детонація спричиняє забруднення металевими осколками та залишками вибухових речовин.

Воєнні дії можуть спричинити виникнення пожеж, що є первинним наслідком воєнно-техногенного навантаження, і в подальшому це може стимулювати процеси водної та вітрової ерозії. На згорілих площах можна спостерігати вивітрювання гумусових речовин та формування гідрофобного шару, який обмежує проникнення води (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Наслідки бомбардувань на обстрілів лісів Чернігівщини [6].

У період з 24.02.2022 року по 01.04.2022 року територія зони відчуження Чорнобильської АЕС перебувала під окупацією, під час якої 14074 га ґрунтового покриву зазнали шкоди внаслідок пожеж, спричинених окупантами. Після деокупації зони відчуження було зафіксовано пожежі на площі 18132 га.

Ґрунти, які зазнали впливу пожеж, мають характерні зміни кислотно-лужних умов у бік нейтральної реакції рН. Це зумовлено проникненням водорозчинних зольних сполук у глибинні шари ґрунтового профілю та насиченням поглинаючого комплексу лужноземельними елементами, що змінює реакцію середовища. У горілих ґрунтах концентрації валових форм техногенних металів перевищують фонові рівні: нікель у 4 рази, свинець у 6 разів, цинк та мідь у 3 рази. Вміст ванадію та хрому дещо менший.

Наслідком впливу вибухів також є потоки сміття, неглибокі зсуви та забруднення ґрунтів в результаті горіння (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Наслідки бомбардувань та обстрілів лісів Чернігівщини [6]

Хімічний вплив. Хімічний вплив воєнних конфліктів призводить до змін у природних властивостях ґрунтового покриву через забруднення, спричинене використанням зброї та техніки. Тривала військова діяльність може викликати утворення локальних геохімічних аномалій, що містять різноманітні вибухові та токсичні речовини, що, в свою чергу, накладає тривалі обмеження на використання цих земель.

До хімічного забруднення, спричиненого військовою технікою та діяльністю, належать: палива для транспортних засобів, змащувальні рідини,

розчинники, відходи гальванічного виробництва, залишки вибухових матеріалів, дезактиваційні засоби, важкі метали та їх сполуки, а також радіоактивні елементи. Особливо небезпечними є речовини, які мають вибухову здатність.

Під час проведення вогневих операцій використовуються боєприпаси з різними складами пороху та вибухових матеріалів, що при горінні призводять до утворення різноманітних сполук, таких як азот, сажа, вуглеводні, свинець, двоокис марганцю та інші продукти. Ці речовини мають шкідливий вплив на здоров'я людей та навколишнє середовище. Наприклад, при вибуху одного 115 мм осколково-фугасного боєприпасу, що містить гексоген, утворюється близько 4000 літрів газів, включаючи продукти згоряння цієї вибухової речовини. Приблизно 30 % цих газів розсіюються в атмосфері, а решта (важкі фракції та метали) осідають на поверхні ґрунту.

Вибухові речовини відіграють важливу роль у викидах металів у ґрунтове середовище. Дослідження показали, що частки, які викидаються під час артилерійських ударів, містять високі концентрації свинцю (Pb) і міді (Cu), що можуть походити від артилерійських снарядів та стволів гармат. Крім того, вибухові гранати є значним джерелом високих рівнів свинцю (Pb).

Сучасні енергетичні матеріали або вибухові речовини є органічними сполуками, що містять азот і мають високий потенціал самоокислення, перетворюючись на маломолекулярні гази, такі як N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O і CO<sub>2</sub>. Вибухові речовини поділяються на первинні та вторинні в залежності від їх здатності до ініціації. Первинні вибухові речовини часто використовуються для ініціювання вибуху вторинних матеріалів, таких як тротил, гексоген, октоген і тетрил [7].

Нерозірвані боєприпаси та наземні міни завдають значної шкоди ґрунтовому покриву протягом тривалого часу. Основна загроза полягає в утворенні токсичних речовин через корозію боєприпасів, а також у високому ризику випадкової детонації.

Під час обслуговування та ремонту військової техніки в польових умовах ґрунти забруднюються паливно-мастильними рідинами, відпрацьованими маслами, антифризами та органічними розчинниками. Найбільші концентрації нафтопродуктів спостерігаються в районах зберігання паливно-мастильних матеріалів та технічного обслуговування техніки. Часті витіки нафтопродуктів на польових заправних пунктах призводять до змін хімічного складу ґрунту, що порушує його здатність до самовідновлення, внаслідок чого знижується біологічна активність ґрунту (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Забруднення ґрунту паливно-мастильними матеріалами.

Харківська область (Фото Павла Волкова) [8]

Забруднення ґрунту може виникнути внаслідок детонації вибухонебезпечних предметів, що відбуваються безпосередньо в ґрунті, або витіку гідравлічних рідин та палива під час заправки машин для розмінування [8].

Забруднення, пов'язане з вуглеводневим походженням, може включати нафтопродукти, а також компоненти нафти і нафтопродуктів, такі як парафіни, нафтени, ароматичні вуглеводні, а також їх похідні, такі як бензол, толуол, а також поліциклічні вуглеводні, зокрема нафталін і перилен. Окремою групою є хлорвуглеводневі сполуки, такі як діхлоретан, трихлоретан, хлорбензол тощо. Ці речовини, як і толуол та інші гомологи бензолу, часто використовуються як розчинники. Забруднення трихлоретаном може також бути пов'язане з залишками ракетного палива.

Ґрунти, забруднені вуглеводнями, стають джерелом токсичних газів і пилу, які можуть переноситися повітрям, завдаючи шкоди біорізноманіттю ґрунту. Виділення бензолу, толуолу, етилбензолу та ксилолу з недавно забруднених ґрунтів може мати хронічний вплив на здоров'я людини. Після потрапляння в ґрунт вуглеводні можуть частково або повністю заповнювати поровий простір, що ускладнює проникнення повітря та води. Це, в свою чергу, може погіршити дихання коренів рослин, вплинути на ґрунтові мікроорганізми і порушити їхнє водопостачання [9].

Використання білого фосфору в запальних боєприпасах може мати значний вплив на продуктивність ґрунтів протягом тривалого часу (рисунок 1.9). Хоча з часом фосфор може виступати як добриво, він схильний осідати у вигляді апатиту в нейтральних та лужних ґрунтах або утворювати сполуки з залізом (Fe) і алюмінієм (Al) у кислих ґрунтах. Забруднення ґрунтів ксенобіотиками, такими як важкі метали, органічні розчинники, поверхнево-активні речовини, синтетичні феноли, ціаніди, діоксини, радіонукліди та інші токсичні сполуки, може призвести до серйозних наслідків для рослинності та організмів, що мешкають у ґрунті. Наслідки такого забруднення можуть тривати десятиліттями, накопичуючись в екосистемах і впливаючи на біорізноманіття та здоров'я людей.



Рисунок 1.9 – Кратер, утворений фосфорним бомбардуванням [8]

Фізичний вплив. Фізичний вплив означає зміни у фізичних властивостях ґрунту, що відбуваються внаслідок застосування зброї та військової техніки. Відзначають такі компоненти фізичного впливу різної природи на довкілля, що виникають під час здійснення бойових дій.

Вібраційний вплив визначається низькими частотами коливань, які передаються через тверді матеріали, що мають безпосередній контакт з механізмами, що працюють. Цей тип впливу пов'язаний з виникненням енергетичних імпульсів під час військових навчань. Одноразові імпульси виникають через вибухи боєприпасів на полігонах та постріли з різних видів зброї, а періодичні імпульси створюють шум і вібрацію від військової техніки. Джерелами вібрацій на військовому полігоні можуть бути військові автомобілі, бронетехніка, а також різні дизельні, газодинамічні й вентиляційні системи. Вібрація, що поширюється через ґрунт, може призводити до його ущільнення, витіснення води, утворення ям, а також змін у мікрорельєфі.

Радіоактивний вплив виникає через підвищення рівня радіоактивних речовин, які вивільняються при використанні боєприпасів, що містять збіднений уран, а також під час застосування пристроїв і приладів з

джерелами іонізуючого випромінювання. Важливо зазначити, що на сьогодні в Україні не зафіксовано застосування такого виду зброї.

Тепловий вплив виникає через локальне підвищення температури, спричинене викидами гарячого повітря, порохових газів, газоподібних продуктів вибуху боєприпасів та вихлопними газами. Цей вплив негативно позначається на ґрунтовому покриві, порушуючи термічний і водний баланс, а також змінюючи гранулометричний склад і агрегатну структуру ґрунту. Зміна температурного режиму ґрунту впливає на життєдіяльність ґрунтових організмів, знижуючи рівень кисневого забезпечення і ведучи до зменшення біорізноманіття. На сьогодні відсутні єдині нормативи для оцінки цього виду впливу. У процесі військових дій, зокрема з боку Російської Федерації, використання фосфорних боєприпасів (температура горіння білого фосфору досягає 2760 °C) призводить до плавлення ґрунту, що спричиняє утворення зливої структури та виникнення великих тріщин у сухому ґрунті [10].

## 2 БІОТЕСТУВАННЯ В ОЦІНЦІ ТОКСИЧНОСТІ ҐРУНТІВ

### 2.1 Вплив порушення ґрунтів на біоту та шляхи міграції забруднюючих речовин

В Україні, починаючи з 24 лютого 2022 року (а на Сході країни – з 2014 року), щодня відбуваються обстріли, що включають як дозволені, так і заборонені боєприпаси, утворення вирив від авіабомб і артилерійських ударів, поява нових мінних загроз, знищення важкої військової техніки, що супроводжується витоками нафтопродуктів, пожежами та іншими шкідливими явищами. Всі ці наслідки військових дій призводять до забруднення ґрунтів і мають негативний вплив на економіку країни та здоров'я її громадян [13].

Встановлено, що військово-техногенне забруднення має серйозні руйнівні наслідки для здоров'я населення. Підвищений вміст важких металів може викликати порушення роботи нервової системи, кровотворення та ендокринної системи. Хімічні забруднювачі сприяють розвитку ракових захворювань, атеросклерозу та негативно впливають на генетичний апарат.

Пошкодження ґрунту в результаті військових дій можуть бути механічними, фізичними та хімічними, механізми та вплив яких були розглянуті в попередньому розділі.

Воєнно-техногенні впливи призводять до специфічного забруднення ґрунтового середовища. Окрім викидів органічних забруднювачів, таких як поліароматичні вуглеводні та поліхлоровані біфеніли, військова діяльність тісно пов'язана з контамінацією ґрунтів важкими металами. Найбільше накопичення металів спостерігається на територіях бойових дій через використання різноманітних видів озброєння. Таким чином, викиди забруднювальних речовин, спричинені військовими діями, вказують на прямий вплив на навколишнє середовище і можуть суттєво впливати на здоров'я цивільного населення. Дослідження показують, що вплив

забруднювачів військово-техногенного походження викликає серйозні негативні наслідки для здоров'я, зокрема хвороби серцево-судинної системи, метаболічні порушення, неврологічні захворювання та рак [18].

Потрапляння зазначених речовин в організм людини є фактором ризику для розвитку різних захворювань і може призвести до погіршення перебігу та ускладнення ряду патологій. Багато мікроелементів, необхідних для живих організмів, у високих концентраціях можуть бути токсичними для людини. Навіть низькі концентрації забруднювальних речовин можуть впливати на активність ферментів в організмі, брати участь у процесах кровообігу та синтезу білків, а також спричиняти зміни на генетичному рівні.

Прогнозування поведінки забруднювальних речовин у ґрунті є складним завданням, оскільки ґрунт є комплексною колоїднодисперсною системою. У ньому відбувається накопичення забруднювачів та їх перерозподіл під впливом воєнно-техногенних факторів, що згодом можуть транслюкуватися в трофічні ланцюги (ґрунт – рослина – людина) [19].

Механізм накопичення забруднюючих речовин у ґрунті значною мірою залежить від утворення органічних комплексів, що впливають на біодоступність та розчинність самих забруднювачів. Цей процес також змінює наявні форми забруднень, що, в свою чергу, впливає на їх біодоступність і розчинність.

Після того як вибухові сполуки та важкі метали потрапляють у ґрунт, їхня поведінка визначається абіотичними та біотичними процесами. Швидкість міграції та трансформації цих речовин залежить від фізико-хімічних і біологічних факторів ґрунтового середовища, таких як розчинення, випаровування, адсорбція, фотоліз, гідроліз та біологічне розкладання. На рухливість забруднювальних речовин у ґрунті впливають гранулометричний та мінералогічний склад ґрунту, вміст гумусу, окислювально-відновні та кислотно-лужні умови, а також наявність геохімічних бар'єрів [20].

Часовий аспект також відіграє важливу роль у поведінці забруднювальних речовин у ґрунті. Розчинні органічні сполуки та

підкислення ґрунтового середовища сприяють збільшенню швидкості міграції забруднювачів. Перерозподіл цих речовин відбувається як у горизонтальному, так і в вертикальному напрямку. Горизонтальна міграція особливо виражена після бомбардувань і, в основному, здійснюється завдяки перенесенню забруднювачів повітрям.

Вертикальна міграція забруднювальних речовин залежить від різних факторів, таких як дифузія іонів, переміщення з потоком води, транспортування корінням рослин, активність ґрунтової мезофауни та людська діяльність. Найбільший вплив на інтенсивність міграції забруднювачів у ґрунтовому профілі має водний режим.

У ґрунтовому розчині забруднювальні речовини перебувають у певній рівновазі, існуючи як в іонній, так і в зв'язаній формі. Наявність металів у природних водах у вигляді комплексних сполук з неорганічними лігандами та аніонами органічних кислот значно збільшує їх рухливість. Забруднювальні речовини, зокрема важкі метали, у рідкій фазі ґрунту можуть бути присутні в трьох основних формах: нерозчинній, колоїдній та в істинних розчинах. Важкі метали можуть утворювати гідроксиди та входити до складу органо-мінеральних комплексів, таких як гумінові та фульвокислоти.

Важкі метали в ґрунті можуть бути представлені трьома формами: мінеральною, органічною та органо-мінеральною. Мінеральна форма важких металів включає їхні неорганічні сполуки, такі як сульфати, хлориди, карбонати. Органічна форма важких металів є їхніми сполуками з органічною речовиною ґрунту, наприклад, хелатами. Органо-мінеральна форма важких металів – це їхні сполуки з органічною речовиною та мінералами ґрунту, наприклад, гідроксиди заліза, марганцю та алюмінію.

Коли важкі метали потрапляють у ґрунт, вони можуть взаємодіяти з іншими речовинами, що містяться в ґрунті, утворюючи більш складні сполуки. Цей процес відбувається під впливом біотичного компонента ґрунту, зокрема мікроорганізмів і рослин. У результаті таких реакцій важкі

метали можуть виводитися з розчинів і закріплюватися в твердій фазі ґрунту. Цей процес називається сорбцією [17].

Сорбційні бар'єри є ефективними засобами для запобігання поширенню хімічних речовин у ґрунті та водоносних горизонтах, зокрема важких металів. Вони функціонують за рахунок зв'язування хімічних речовин з поверхнею ґрунту або води. Ефективність сорбційних бар'єрів залежить від кількох факторів, таких як швидкість інфільтрації води, концентрація хімічних речовин у водному розчині та площа поверхні, що взаємодіє з хімічними речовинами.

Адсорбенти, які утворюють неспецифічні комплекси або знаходяться в дисоційованому стані, мають вищу здатність до адсорбції хімічних речовин. Це пояснюється тим, що вони володіють більшою площею поверхні, здатною взаємодіяти з хімічними речовинами.

Серед компонентів ґрунту найбільшу адсорбційну здатність мають глинисті мінерали, оксидні та гідроксидні мінерали, а також органічна речовина.

Органічна речовина ґрунту, завдяки своєму високому поверхневому заряду, здатна зв'язувати метали, що знижує їхню рухливість. Тому ґрунти з високим вмістом органічної речовини є більш стійкими до металевого забруднення. Однак у лужних умовах підвищений рівень розчиненого органічного вуглецю може сприяти утворенню металоорганічних комплексів, у яких метали зв'язані з органічною речовиною. Це може збільшити рухливість таких металів, як свинець, мідь та нікель, які мають високу спорідненість з органічними сполуками. Оксиди алюмінію, заліза та марганцю, завдяки своїм амфотерним властивостям, можуть формувати поверхневі комплекси як з катіонами, так і з аніонами, що робить їх потенційними стабілізаторами для металів, таких як свинець та стибій, які можуть виступати як катіони або аніони [17].

Інтенсивність закріплення важких металів у ґрунті залежить від ряду факторів, серед яких хімічні характеристики металів, органічна речовина,

мінералогічний склад ґрунту, склад ґрунтотворної породи та ландшафтно-геохімічні умови. Хімічні властивості металів впливають на їхню здатність до адсорбції та розчинності. Органічна речовина має високу адсорбційну здатність і може зв'язувати метали, зменшуючи їх рухливість. Мінералогічний склад ґрунту визначає його питому поверхню, що є важливою для адсорбції важких металів. Ґрунтотворна порода також впливає на закріплення металів, оскільки вона може містити різні мінерали з різними адсорбуючими властивостями.

Ландшафтно-геохімічні фактори, такі як вологість, швидкість газообміну з атмосферою та мікробіологічна активність, також впливають на закріплення важких металів у ґрунті. Наприклад, волога ґрунту сприяє розчинності металів, а мікробіологічна активність може викликати їх хімічні перетворення. Особливо важливу роль у закріпленні важких металів відіграють глинисті мінерали, оскільки вони мають велику площу поверхні, що сприяє адсорбції цих металів. Крім того, глинисті мінерали здатні зв'язувати гідрофобні органічні забруднення, що зменшує їх біодоступність.

Текстура та структура ґрунту впливають на перенесення важких металів у ньому. Ґрунти, що містять велику кількість макропор, мають більшу пропускну здатність, що сприяє швидшому переміщенню металів у розчині. У свою чергу, ґрунти з великою кількістю мікропор обмежують дифузію важких металів, сповільнюючи їх перенесення. Хімічні умови середовища, в якому мігрують важкі метали, визначаються окисно-відновними та кислотно-лужними умовами. Окислювальні умови сприяють утворенню сполук важких металів з оксидами заліза та марганцю, що знижує їх рухливість. Натомість, відновлювальні умови сприяють розчиненню цих оксидів, що може призвести до вивільнення важких металів у розчин.

Одним з ключових процесів, що відбуваються за відновлювальних умов, є відновне розчинення аморфних та кристалічних гідроксидів заліза. Цей процес може спричинити вивільнення важких металів, які раніше були зв'язані з оксидами заліза.

Ступінь окислення ґрунту є важливим фактором, що визначає рухливість і біодоступність важких металів. У кислих ґрунтах важкі метали зазвичай знаходяться в розчиненій формі, що збільшує їхню рухливість і біодоступність. Водночас, у лужних ґрунтах ці метали частіше зв'язуються з оксидами заліза та марганцю, що знижує їхню рухливість і біодоступність [18, 19, 20].

Ґрунти з високим вмістом органічної речовини можуть сприяти більш інтенсивному розчиненню металів, що є частинами залишкових осколків, куль, артилерійських патронів та інших предметів, забруднених воєнно-техногенними речовинами. Органічна речовина ґрунту утворює комплекси з металами, що може підвищувати їхню рухливість і біодоступність. Це зумовлюється здатністю органічних сполук до хелатування металів, що сприяє їх розчиненню та подальшому проникненню у ґрунтову систему.

А також кислотно-лужні характеристики ґрунту мають вплив на розчинність металів. У кислих ґрунтах метали здебільшого перебувають у розчиненому стані, в той час як у лужних ґрунтах це спостерігається рідше. Ґрунти, що володіють високою буферною здатністю (здатністю стабільно утримувати рН), менш вразливі до корозії куль та вибухових матеріалів. Це пояснюється тим, що такі ґрунти мають меншу схильність до коливань рН, що може спричинити розчинення металів. Значне зростання корозії куль та вибухових матеріалів спостерігалось, коли рН ґрунту знижувався з лужного до кислотного. У кислих ґрунтах метали частіше перебувають у розчиненому вигляді, що підвищує їх біодоступність, а також доступність вибухових речовин.

Ємність катіонного обміну ґрунту визначає здатність ґрунту утримувати вибухові речовини та метали. Ґрунти з високою ємністю катіонного обміну здатні краще утримувати ці речовини, що знижує їх доступність для організмів. Наприклад, тротил, що є вибуховою речовиною, має низьку біодоступність у чорноземах, які мають високу ємність

катионного обміну. Це означає, що тротил у чорноземі має менший токсичний вплив на дощових черв'яків та інші живі організми.

Рельєф місцевості також має вплив на біодоступність вибухових матеріалів та металів. Райони з рівнинним рельєфом більш схильні до латеральної міграції, тобто переміщення речовин в горизонтальному напрямку. Це може спричинити поширення забруднення на великі території. Водний режим ландшафтів також грає роль у біодоступності вибухових речовин та металів. Території з високим рівнем опадів більш піддаються поверхневому та підземному стоку, що може призвести до вимивання забруднюючих речовин у підземні води.

Температурні умови, кількість та характер опадів впливають на розчинення вибухових речовин у ґрунті, що збільшує їх доступність для живих організмів. Найвища корозійна активність вибухових матеріалів та гільз спостерігається в ґрунтах з високим вмістом вологи. Ґрунти, які піддаються періодичному затопленню, також характеризуються високою корозійною активністю.

Температура також має вплив на процес розчинення вибухових речовин. Тротил розчиняється найшвидше при підвищенні температури, тоді як гексоген – найповільніше. Раніші дослідження продемонстрували, що підвищення температури навколишнього середовища також сприяє збільшенню розчинення куль.

Рослини на територіях, що піддаються воєнно-техногенному впливу, можуть знижувати міграцію вибухових речовин та важких металів у підземні води. Це пояснюється тим, що рослини абсорбують ці речовини з ґрунту, що зменшує їх доступність для інших живих організмів.

Для цього використовуються багаторічні трав'янисті рослини, такі як міскантус, а також деревні види, наприклад, верби та тополі. Вважається, що вплив забруднювачів на ґрунтове середовище залежить не від їх загальної концентрації, а від наявності рухливих форм. Це означає, що менш рухливі

форми забруднювальних речовин мають менший негативний вплив на ґрунт та рослинність [19].

Надходження забруднюючих речовин у рослини з ґрунту контролюється двома групами факторів:

- вмістом рухомих форм забруднюючих речовин у ґрунті;
- біологічними властивостями рослин щодо забруднюючих речовин.

Ґрунт впливає на процес поглинання важких металів рослинами в двох напрямках. З одного боку, через сорбцію ґрунти зменшують кількість важких металів, які потрапляють у рослини. З іншого боку, накопичення сорбованих важких металів у верхніх шарах ґрунту сприяє їх поглинанню рослинами та подальшому накопиченню. Це пояснюється тим, що коренева система рослин здебільшого знаходиться у верхніх горизонтах ґрунту.

Важкі метали, які доступні для рослин, можуть бути представлені у формі водорозчинних іонів, обмінних фракцій або легко розчинних металоорганічних комплексів. Окремі фракції металів, такі як нестабільні органічні сполуки та метали, пов'язані з карбонатами, також можуть бути потенційно біодоступними.

Поглинання металів рослинами залежить від їхньої хімічної форми та співвідношення у ґрунтового розчині. Чинники, такі як атмосферні опади, рівень рН, органічні сполуки, структура ґрунту та гумінові речовини, можуть впливати на вивільнення важких металів із рослин до інших компонентів біосфери. Це може спричинити забруднення навколишнього середовища.

Сорбція забруднюючих елементів ґрунтами впливає на їхню міграцію з ґрунту в рослини та подальше накопичення в них. Різна міцність зв'язування цих елементів у ґрунті свідчить про те, що їх потрапляння в рослини значною мірою залежить від типу ґрунту та його властивостей, які визначають поглинальну здатність. На проникнення важких металів у рослини впливають такі чинники [20]:

- видові особливості рослин;

- тип ґрунту;
- концентрація металів у ґрунті;
- форма знаходження металів у ґрунті;
- рН ґрунту;
- гранулометричний склад ґрунту;
- вміст органічних речовин у ґрунті;
- ємність поглинання катіонів у ґрунті;
- наявність техногенних джерел забруднення.

Ґрунти з високим рівнем рН, значним вмістом глинистих мінералів, кальцієвих карбонатів та органічної речовини ефективно утримують важкі метали. Це знижує їхню доступність для рослин, що сприяє захисту рослин від забруднення. Важкі метали можуть осідати у ґрунті або адсорбуватися на поверхні його частинок, а також заміщувати лужні й лужноземельні метали, які вже зв'язані з ґрунтом.

У кислих ґрунтах важкі метали легше переходять у розчинений стан, що сприяє їх більш інтенсивному поглинанню рослинами. Це може призвести до накопичення важких металів у рослинах і, як результат, до забруднення навколишнього середовища. Наприклад, на дерново-підзолистих ґрунтах з рН 5,3 при однаковій концентрації свинцю в ґрунті насиченість листової тканини пшениці вдвічі вища, ніж на високобуферному малогумусному чорноземі з рН 6,9.

Попри те, що важкі метали можуть легко проникати в рослини, вони мають захисні механізми, які знижують їх надходження. Ці механізми регулювання надходження іонів зосереджені в коренях і репродуктивних органах рослин. Значна частина важких металів, які поглинаються рослинами з ґрунту, затримується в коренях. Це відбувається у зоні так званого пояса Каспарі, який розташований на периферії кореня (рисунок 2.1).

Хоча захисні механізми коренів рослин здатні зменшувати кількість важких металів, що надходять у вегетативну масу, повністю зупинити цей процес вони не можуть. У таких випадках важкі метали починають

накопичуватися у надземних частинах рослин, що може мати негативний вплив на їхній стан. Проте рослини мають спеціальні механізми, які регулюють надходження хімічних елементів у репродуктивні органи (насіння). Ці механізми знижують накопичення важких металів у насінні, що є важливим для забезпечення безпеки здоров'я людей.

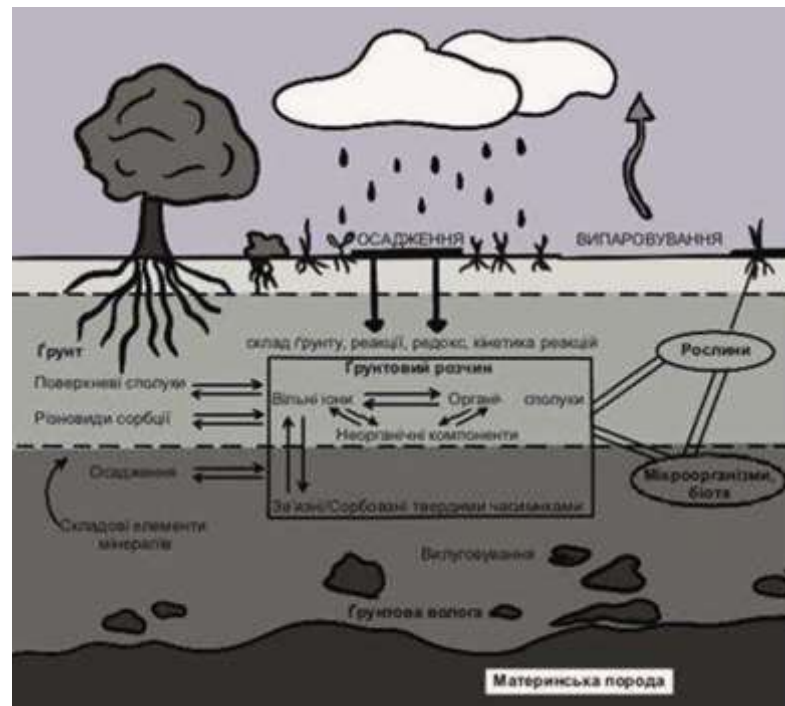


Рисунок 2.1 – Схема фізико-хімічних процесів міграції забруднюючих речовин у ґрунтах [21]

Хімічний склад рослин значною мірою визначається складом ґрунту, в якому вони ростуть. Однак рослини поглинають лише ті елементи, які необхідні для їхнього нормального розвитку та росту, і не абсорбують усі доступні речовини з ґрунту. Вони мають різноманітні механізми захисту від надмірного накопичення важких металів. Деякі види рослин здатні накопичувати високі концентрації металів без негативних наслідків, тоді як інші обмежують їх надходження завдяки своїм бар'єрним механізмам.

Рівень накопичення важких металів рослинами визначається їхніми генетичними та видовими характеристиками. Попри значну варіативність у здатності рослин до накопичення металів, можна виділити певні

закономірності, що дозволяють класифікувати метали за ступенем їх накопичення в рослинах:

- елементи інтенсивного поглинання: Cd, Cs, Rb;
- елементи середнього ступеня поглинання: Zn, Mo, Cu, Ni, Pb, As;
- елементи слабкого поглинання: Mn, Cr, Co;
- елементи важкодоступні для рослин: Se, Fe, Ba, Te.

Відомо, що рослини мають різну здатність накопичувати важкі метали. Деякі з них здатні збирати значні кількості цих елементів, тоді як інші – лише малі. Серед сільськогосподарських культур найбільшу концентрацію важких металів спостерігають у листових овочах та культурах, що використовуються для силосу. Це пояснюється тим, що листя є головним органом фотосинтезу, де і відбувається накопичення важких металів.

Найменше важких металів накопичують бобові, злакові та технічні культури. Це зумовлено тим, що ці рослини мають інші фізіологічні вимоги, і важкі метали для них не є критичними. Різниця в здатності рослин до накопичення важких металів може бути дуже виразною. Наприклад, для деяких видів рослин рівні концентрацій важких металів можуть у сотні або тисячі разів перевищувати природний фон. Такі незвичайні властивості металоакумуляції зустрічаються рідко, але вони становлять цінний інструмент для оцінки забруднення ґрунтів та підстилаючих порід важкими металами.

Воєнно-техногенні забруднювачі потрапляють у ґрунт у вигляді залишків або часток боєприпасів. Вони можуть розповсюджуватися через порову матрицю ґрунту. Забруднюючі сполуки мають різну ступінь розчинності у воді, що дозволяє їм проникати в глибші шари ґрунту. Проте, найчастіше вони зосереджуються в верхньому шарі ґрунту, що має товщину до 15 см. Сполуки вибухових речовин, що вивільняються під час вибуху, взаємодіють із ґрунтом, де вони поглинаються та адсорбуються його частинками (рисунок 2.2). Тривалість сорбції залежить від складу сполук.

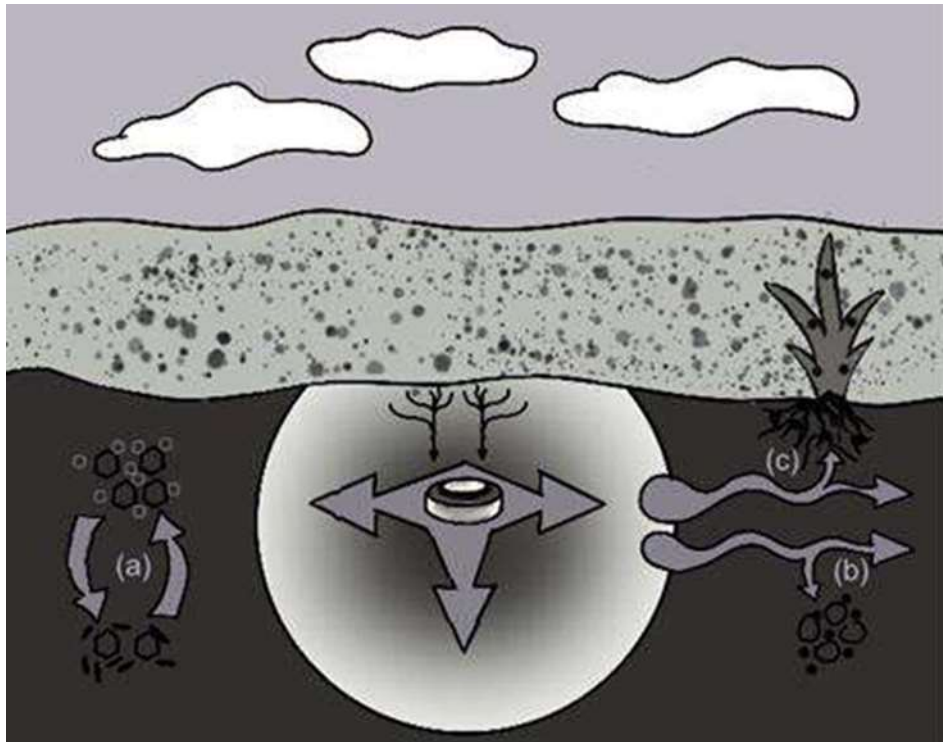


Рисунок 2.2 – Поведінка сполук вибухових речовин у ґрунтах

На представленому рисунку центральний символ вказує на місце знаходження нерозірваних боєприпасів. Колір навколо цього знака відображає поширення забруднювачів від боєприпасів. Рух води через ґрунт позначено світлими стрілками. Наявність забруднювачів за межами центральної зони дифузії показана у вигляді п'ятикутників. Область (a) позначає мікробну взаємодію та метаболізм, де мікроорганізми здатні розщеплювати забруднювачі на менш токсичні сполуки або перетворювати їх на форми, які можуть бути поглинені чи адсорбовані ґрунтом або рослинами. Область (b) позначає процес сорбції частинками ґрунту, коли забруднювачі адсорбуються на поверхні ґрунтових частинок, що ускладнює їх переміщення в ґрунті. Область (c) вказує на поглинання та секвестрацію забруднювачів рослинами, як у надземних, так і в підземних частинах. Рослини здатні поглинати забруднювачі з ґрунту та зберігати їх у своїх тканинах. Взаємодія рослин з забруднювачами починається з їх поглинання через розчин у ґрунті. Цей розчин може потрапляти в коріння рослин як самостійно, так і завдяки підвищеному потоку води, що створюється транспірацією листя. Сполуки

вибухових речовин, що потрапили до коренів, вільно переміщуються між мембранами, рухаючись через пасок Каспарі до ксилеми, де вони в кінцевому підсумку накопичуються в рослині [21].

Токсичність вибухових речовин для рослин може бути надзвичайно високою. Це може призвести до різних стресових реакцій у рослин, починаючи від змін у морфологічних структурах до порушень клітинних процесів. Рівень токсичності вибухових речовин у рослинах залежить від кількох факторів, зокрема від виду рослини, тривалості впливу забруднювачів, їх концентрації та типу.

На сьогодні добре вивчені закономірності забруднення ґрунтів вибуховими сполуками та важкими металами, а також їх розподіл серед рослин. Біомоніторингові дослідження виявили, що рівень свинцю (Pb) та міді (Cu) у ґрунті на незахищених стрільбищах значно перевищує рівень цих елементів у контрольних зонах. Кульбаба лікарська, що росте в зонах бойових дій, є ефективним поглиначем металів воєнно-техногенного походження, зокрема миш'яку, барію, кадмію, кобальту, хрому, міді, ванадію та цинку.

Тротил та його продукти розпаду є надзвичайно токсичними для ґрунтової фауни, хоча різні види демонструють різний рівень чутливості до цих забруднювачів. Вплив тротилу та інших хімічних боєприпасів може суттєво пригнічувати мікробну активність ґрунту. Високі концентрації тротилу можуть спричинити симптоми отруєння у дощових черв'яків, такі як набряк кільцевих м'язів, застій, зневоднення, значне послаблення сегментації та здатності до руху й скорочень.

Продукти реакцій нітроароматичних сполук можуть бути навіть більш небезпечними, ніж самі вихідні сполуки. Органічні компоненти ґрунту відіграють важливішу роль в адсорбції та інактивації тротилу, ніж глинисті мінерали. Чим вищий вміст глинистих мінералів і гумінових речовин у ґрунті, тим більший потенціал цих компонентів для запобігання поглинанню нітроароматичних сполук організмами [18, 20].

Незважаючи на обмежену кількість досліджень у цій сфері, існують беззаперечні свідчення того, що воєнно-техногенні впливи негативно позначаються на здоров'ї людей. Високі концентрації важких металів у ґрунті та воді можуть потрапляти в організм через дихання, травлення та шкіру. Вони здатні пошкоджувати або порушувати функціонування важливих систем організму, таких як центральна і периферична нервова система, кровотворення, ендокринна система тощо. Деякі хімічні елементи, наприклад, свинець, ртуть і кадмій, можуть також сприяти розвитку атеросклерозу, злоякісних новоутворень та порушень спадковості.

Епідеміологічний моніторинг, що включає аналіз захворюваності та смертності серед населення на територіях, які зазнали воєнно-техногенних впливів, є важливою частиною комплексної програми дослідження таких регіонів.

## 2.2 Оцінка токсичності ґрунтів методами біотестування

Біотестування є методом оцінки токсичності навколишнього середовища, заснованим на аналізі реакцій тест-організмів, які відображають рівень екологічної безпеки або потенційної загрози (токсичності), незалежно від природи та співвідношення забруднювальних речовин, що спричиняють порушення життєво важливих функцій тест-організмів. У якості тест-організмів використовують мікроорганізми (бактерії, одноклітинні гриби, водорості), рослини (багатоклітинні водорості, мохи, вищі спорові та квіткові рослини), тварини (ракоподібні, комахи, риби, птахи, ссавці) та симбіотичні організми (лишайники). Для оцінки рівня забруднення довкілля проводиться аналіз відхилень анатомо-морфологічних, фізіологічних, біохімічних, генетичних, імунологічних та інших характеристик тест-організмів, які знаходилися в умовах забрудненого середовища, порівнюючи їх із встановленими нормативними показниками.

Сучасні системи моніторингу стану довкілля ґрунтуються на кількісному аналізі складу проб і порівнянні отриманих даних із гранично допустимими концентраціями шкідливих речовин. Водночас оцінка екологічної загрози техногенного впливу здійснюється переважно за загальним вмістом хімічних елементів. Проте цей підхід має низку обмежень: він не враховує можливих синергічних чи антагоністичних взаємодій між хімічними сполуками, характеризується високою трудомісткістю та не враховує впливу рухомих форм забруднювачів, які є найтоксичнішими для живих організмів. Крім того, у природних умовах відбуваються постійні хімічні трансформації, які спричиняють утворення нових сполук, що можуть перевищувати початкові речовини за рівнем токсичності.

Згідно з підходом, запропонованим Г. Реймерсом, токсичність визначається як отруйність, тобто здатність хімічних елементів, сполук та біогенних речовин спричинити шкідливий вплив на живі організми, завдаючи їм функціональних порушень або шкоди [21]. Основним критерієм, який визначає токсичність, є достовірні кількісні зміни певних тестових параметрів, що дозволяють зробити висновок про рівень токсичності конкретної речовини, води, ґрунту чи інших складових довкілля. Оцінка токсичності ґрунтів здійснюється шляхом використання біотестування.

Біотестування розглядається як методологічний підхід, що базується на використанні тестових організмів для визначення токсичності середовища. Цей метод дозволяє отримати інтегральну токсикологічну оцінку забруднення як ґрунтів, так і інших компонентів біосфери, незалежно від хімічної природи або комбінацій речовин, які спричиняють порушення життєвих функцій тест-організмів. Біотестування дає змогу оцінити реакції біоти на комплексне забруднення, використовуючи тест-організми як біологічні індикатори.

Хоча методи біотестування для оцінки токсичності компонентів довкілля активно застосовуються лише в останні десятиліття, історичні витоки фітоіндикаційних досліджень сягають стародавніх часів, коли

природні умови оцінювалися за наявністю або вирощуванням специфічних рослин. У сучасній науці біотестування та біомоніторинг інтенсивно розвиваються як універсальні інструменти для об'єктивної оцінки стану біологічних і екологічних систем.

Методи біоіндикації та біотестування забезпечують оцінку стану екосистеми на основі реакцій окремих компонентів біоти на вплив зовнішніх стресових факторів. Екологічна діагностика, що базується на цих підходах, дозволяє здійснювати комплексну оцінку якості середовища існування біологічних популяцій, включно з людською. Біотести доцільно використовувати для експрес-контролю екологічного стану промислових зон, моніторингу шкідливих викидів, оцінки ефективності очисних споруд, екологічної паспортизації підприємств, а також аналізу екологічних наслідків бойових дій.

Сучасні підходи до біомоніторингу пропонують різноманітні трактування біотестування. Цей метод визначається як систематичний підхід до аналізу впливу факторів довкілля, зокрема токсичних, на організм, його функції або системи [22]. Основна мета біотестування — оперативне отримання даних про токсичність, яка оцінюється за рівнем виживання, станом або поведінковими реакціями тест-об'єктів [26]. Вимоги до тест-об'єктів включають: здатність відображати зміни середовища; універсальність і значущість показників життєдіяльності; високу чутливість до навіть незначних екологічних змін; зручність у лабораторних і польових умовах; економічність і доступність для масового використання.

Для екологічного моніторингу використовуються різні тест-системи, що охоплюють біоти від прокариот до ссавців. Зокрема, для аналізу токсичних забруднень водного середовища застосовують мікроорганізми. Тестові системи, що базуються на прокариотах, демонструють високу пропускну здатність, особливо при використанні специфічних штамів, таких як у відомому тесті Еймса з *Salmonella typhimurium*. У цьому тесті

застосовують штамми ТА 97, ТА 98 і ТА 100, що забезпечує високу точність оцінки [41].

Найбільш поширеним напрямом біотестування є використання рослин, які виступають чутливими індикаторами стану довкілля. Як уже зазначалося, застосування рослин для оцінки забруднення природного середовища має глибоке історичне коріння. Перші зафіксовані спостереження, що пов'язували зовнішній вигляд рослин із умовами їхнього зростання, датуються ще античними часами.

На сучасному етапі рослини активно застосовуються для біоіндикації різних компонентів екосистеми. Індикаційні види рослин використовуються для оцінки кислотності ґрунтів, їхньої родючості, рівня перезволоження або засолення, ступеня забруднення важкими металами, нафтопродуктами, сполуками фтору, рівня мінералізації підземних вод, а також забруднення атмосферного повітря газоподібними речовинами.

Чутливі фотоіндикатори сигналізують про наявність забруднювальних речовин у повітрі чи ґрунті через морфологічні зміни, такі як зміна кольору листя, утворення некротичних уражень різної форми або передчасне опадання листя. У багаторічних рослин забруднювачі часто викликають зміну форми, розмірів або зупинку росту пагонів. Водночас варто зазначити, що певні морфологічні зміни можуть бути спричинені природними факторами. Наприклад, хлороз листя може бути наслідком дефіциту заліза в ґрунті. Тому для інтерпретації морфологічних ознак необхідно враховувати всі можливі фактори, які впливають на ріст і розвиток рослин [20].

Існує широкий спектр методичних підходів до використання рослин у біотестуванні для оцінки забруднення ґрунтів. Серед найбільш поширених рослин-тестів використовують насіння пшениці (*Triticum* spp.), вівса (*Avena* spp.), крес-салату (*Lepidium sativum*), гірчиці білої (*Sinapis alba*), редису посівного (*Raphanus sativus* var.), оскільки ці види характеризуються високою чутливістю до токсичних речовин. Окрім того, значного поширення набуло використання насіння цибулі ріпчастої (*Allium cepa* L.), яке є ефективним

тест-об'єктом для оцінки токсичного впливу різноманітних хімічних сполук [33, 38].

Відповідно до міжнародного стандарту ISO 11269-1, для проведення біотестування рекомендовано використовувати ячмінь звичайний (*Hordeum vulgare*). Утім, зазначається можливість застосування насіння інших рослин. Згідно зі стандартом ISO 11269-2, для тестування необхідно обрати щонайменше два види рослин, при цьому один із них має належати до однодольних, а інший – до дводольних.

Серед найбільш поширених методів оцінки генотоксичності виділяють біотестування з використанням крес-салату (*Lepidium sativum*) та цибулі (*Allium sera*). Їх популярність зумовлена простотою проведення, доступністю матеріалів і високою чутливістю до токсичних впливів. Ці рослини дозволяють швидко виявити мутагенні або токсичні ефекти різних забруднювачів завдяки аналізу фізіологічних і цитологічних змін.

Крес-салат (*Lepidium sativum*), зокрема, є ідеальним об'єктом для біотестування через свою здатність швидко проростати. Це дозволяє оперативно отримувати результати щодо впливу токсичних речовин. У процесі досліджень насіння крес-салату зазвичай замочують у розчинах тестованих речовин різної концентрації або висаджують у ґрунт із забруднювачами. Основними критеріями оцінки є швидкість і відсоток проростання, довжина коренів і пагонів, а також характер морфологічних змін. Токсичний вплив проявляється у формі пригнічення росту, затримки розвитку або появи аномалій, таких як деформації тканин чи зміна їхнього кольору.

Метод біотестування з використанням крес-салату є особливо ефективним для виявлення екологічних ризиків, пов'язаних із впливом пестицидів, важких металів та інших токсичних речовин, присутніх у ґрунті чи водному середовищі.

У дослідженнях із застосуванням крес-салату (*Lepidium sativum*) насіння попередньо ретельно очищують, промиваючи дистильованою водою,

щоб усунути забруднення і патогени. Після цього його висаджують у чашки Петрі, заповнені зразками досліджуваного ґрунту. У кожену чашку поміщають однакову кількість насіння (у даному випадку 50 насінин). Протягом 10 днів відбувається проростання насіння, після чого порівнюють результати між контрольними та експериментальними групами, що дозволяє визначити рівень токсичності досліджуваного середовища.

Цибуля (*Allium* *sepa*) широко застосовується для аналізу генотоксичності завдяки великим, добре видимим хромосомам у клітинах кореневої меристеми. У рамках тестування цибулини поміщають у розчини тестованих речовин, а потім спостерігають за ростом коренів і проводять цитологічний аналіз. Основними показниками токсичного впливу є пригнічення росту коренів, зниження мітотичної активності (уповільнення або зупинка поділу клітин), поява хромосомних аберацій (наприклад, розриви, мости, мікроядра) і структурні зміни клітинних стінок. Метод "Allium test" відзначається високою чутливістю до мутагенів і токсичних речовин, тому він широко застосовується для оцінки впливу промислових викидів, пестицидів, важких металів і лікарських препаратів.

Дослідження із застосуванням цибулі починаються з вибору здорових цибулин середнього розміру (від 4 см до 5 см у діаметрі). Перед початком тестування видаляють сухі зовнішні оболонки, дотримуючись обережності, щоб не пошкодити денце. Кореневу зону промивають дистильованою водою. Для проведення тесту готують водні витяжки із зразків досліджуваного ґрунту, а в ролі контролю використовують дистильовану воду. Підготовлені розчини наливають у стерильні ємності, наприклад, пробірки. Цибулини розміщують денцем у розчинах так, щоб воно було повністю занурене. Експозиція триває від 24 годин до 72 годин при кімнатній температурі. Після завершення експозиції вимірюють довжину коренів: затримка росту чи пригнічення проростання свідчать про токсичність середовища.

Для оцінки генотоксичності кілька коренів (від 1 см до 2 см завдовжки) відрізають і фіксують у фіксаторі Кларка. Далі корені забарвлюють ацето-

карміном або орсеїном і аналізують під мікроскопом. Отримані кількісні та якісні показники порівнюють між контрольними та експериментальними групами, що дозволяє оцінити вплив тестованих агентів на генетичному рівні.

Обидва методи є ключовими інструментами екотоксикології завдяки їх здатності швидко й ефективно оцінювати вплив токсичних речовин на клітинному, тканинному та організмовому рівнях. Вони забезпечують отримання не лише кількісних, але й якісних даних про характер пошкоджень, що робить ці рослини незамінними моделями для скринінгу токсичності.

Особливість забруднення ґрунтів, особливо в межах урбанізованих територій, полягає в їхній багатоконпонентності, яка включає широкий спектр хімічних сполук. Сучасні методи біотестування широко застосовуються для аналізу ґрунтів, забруднених нафтопродуктами, важкими металами, а також для оцінки впливу антропогенного забруднення в сільських регіонах. Окрім цього, вони ефективно використовуються для вивчення ґрунтів, забруднених сполуками фтору та іншими токсичними речовинами, які значно погіршують екологічний стан і створюють серйозні ризики для здоров'я населення.

Попри певні обмеження біотестування, такі як необхідність врахування адаптивних реакцій тест-організмів, сезонність їхніх відповідей, а також стимуляція фізіологічних функцій при низьких концентраціях забруднювачів та їх пригнічення за високих концентрацій, метод залишається перспективним інструментом для моніторингу антропогенного впливу на ґрунти. Це підтверджується численними науковими дослідженнями, проведеними в різних країнах. В Україні методи біотестування офіційно визнані та закріплені в нормативних актах, таких як ДСТУ ISO 11269-2:2002 «Вплив хімічних речовин на проростання і ріст вищих рослин» і ДСТУ ISO 11269-1:2004 «Метод визначення гальмівної дії на ріст коренів» [24, 25].

Методи біотестування дозволяють оцінювати токсичність середовища за допомогою тестових організмів, які сигналізують про наявність потенційної загрози, незалежно від типу та пропорцій речовин, що викликають порушення життєво важливих функцій організму тест-об'єкта.

Незважаючи на численні переваги біоіндикаційних методів, такі як швидкість отримання результатів, простота і доступність проведення досліджень, висока відтворюваність і достовірність результатів, економічна ефективність та об'єктивність, їх застосування слід поєднувати з іншими аналітичними методами. Це забезпечить можливість отримання як якісних, так і кількісних даних для більш комплексної оцінки токсичності ґрунтів та інших компонентів біосфери, а також підвищить надійність контролю природного середовища.

Рослини, що використовуються для біотестування, повинні відповідати певним критеріям. Зокрема, вони повинні нормально розвиватися після замочування у воді, демонструвати достатню швидкість росту у водній витяжці, щоб протягом п'яти діб досягти довжини коренів і паростків, необхідної для подальшого підрахунку та аналізу.

Основними показниками для оцінки фітотоксичності ґрунтів є кількість пророслих рослин, довжина їхніх коренів і паростків. Аналіз передбачає врахування статистично значущих відхилень цих параметрів від контрольних значень. Ґрунти вважаються фітотоксичними, якщо результати біотестування виявляють достовірні відмінності в будь-якому з зазначених критеріїв порівняно з контролем. Визначення токсичності ґрунтів на основі тестування вищих рослин ґрунтується на порівнянні інтенсивності росту рослин у водній витяжці з ґрунту (дослідна група) та у дистильованій воді (контрольна група).

Критерієм токсичності є зменшення довжини проростків і/або коренів у дослідній групі на 20 % і більше порівняно з контролем протягом 96 годин біотестування. Наприкінці експерименту проводять вимірювання довжини коренів і паростків як у контрольній, так і в дослідній групах. Якщо

біотестування проводиться безпосередньо з ґрунтом, пророслі рослини обережно очищають від ґрунту, промивають у дистильованій воді, після чого вимірюють довжину і масу їхніх коренів і паростків.

При проведенні біотестування з використанням насіння вищих рослин застосовують такі показники (тест-функції): загальна схожість насіння (%), довжина надземної частини рослин (мм), маса надземної частини (г), довжина підземної частини (мм) і маса підземної частини (г).

Для отримання порівнянних результатів за підсумками біотестування розраховують індекс токсичності проби ґрунту (ІТФ) для кожної тест-функції за допомогою формули (2.1):

$$\text{ІТФ} = ( \text{ТФ}_0 / \text{ТФ}_к ), \quad (2.1)$$

де:  $\text{ТФ}_0$  – значення реєстрованого тест-відгуку в досліді;  
 $\text{ТФ}_к$  – значення реєстрованого тест-відгуку у контрольній групі.

Значення індексу токсичності (ІТФ) варіюється у межах від 0 до N, де N є будь-яким позитивним числом.

Середнє значення індексу токсичності ( $\text{ІТФ}_{\text{сер}}$ ) для кожної проби ґрунту визначають за формулою (2.3):

$$\text{ІТФ}_{\text{сер}} = (\text{ІТФ}_1 + \text{ІТФ}_2 + \dots + \text{ІТФ}_n) / n, \quad (2.3)$$

де:  $\text{ІТФ}_1, \text{ІТФ}_2, \text{ІТФ}_n$  – індекси токсичності, обчислені для кожної тест-функції;

n – кількість тест-відгуків, залучених до експерименту.

Цей підхід забезпечує стандартизовану оцінку токсичності ґрунту на основі інтегрального аналізу всіх отриманих тестових показників.

### **3 ОЦІНКА ТОКСИЧНОСТІ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ОБСТРІЛІВ МЕТОДОМ БІОТЕСТУВАННЯ**

#### **3.1 Характеристика зони дослідження**

Метою нашого дослідження є визначення рівня токсичності ґрунтів на територіях, що зазнали обстрілів, з акцентом на використання біотестування як ключового інструменту для оцінки їхнього екологічного стану та впливу на живі організми. Для дослідження була обрана ділянка на території сільськогосподарських земель Хмельницької міської територіальної громади, що зазнала обстрілу восени 2022 року (рисунок 3.1). На даній ділянці вирви від авіаснарядів не підлягали рекультивації чи іншим методам відновлення, що дозволило відібрати проби ґрунтів для визначення їх токсичності. Висновки щодо ступеню токсичності дають змогу оцінити віддалені наслідки для ґрунтів.

Внаслідок влучання двох снарядів на цій території утворилися дві вирви, розташовані на відстані приблизно від 1 м до 2 м одна від одної. Діаметр кожної вирви складав від 3 м до 5 м, а глибина досягала 2 метрів (рисунок 3.2, 3.3).

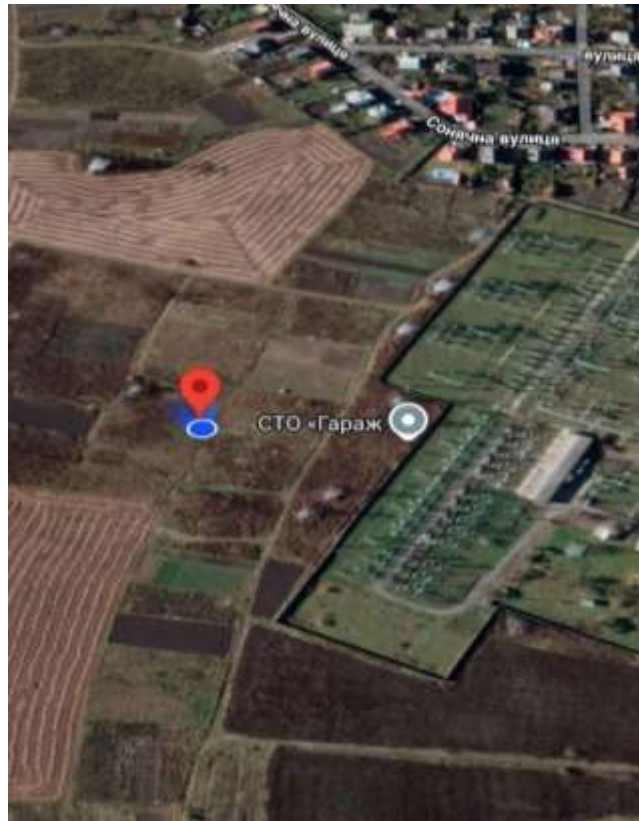


Рисунок 3.1 – Місце влучання двох військових снарядів



Рисунок 3.2 – Перша вирва, утворена внаслідок влучання військового снаряду



Рисунок 3.3 – Друга вирва, утворена в наслідок влучання військового снаряду

На місці влучання було проведено відбір проб ґрунту з двох вирв. Вибір місць для відбору зразків був обумовлений необхідністю оцінити рівень забруднення ґрунту. Для цього було здійснено забір зразків з глибини 20 сантиметрів. Кожен зразок було належним чином марковано і підготовлено для подальшого лабораторного аналізу (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Відбір проб ґрунту

Точка відбору знаходиться на рівнинній території із типовим для цієї місцевості суглинковим ґрунтом [35-37]. Внаслідок вибуху снарядів ґрунтовий покрив зазнав значного механічного та хімічного впливу. Основними очікуваними наслідками є забруднення ґрунту важкими металами та токсичними сполуками, що утворюються при детонації боєприпасів. Зокрема, у ґрунті можуть бути присутні:

- оксиди азоту, сірки та інші продукти горіння вибухових речовин;
- важкі метали, зокрема свинець, мідь, кадмій, що можуть міститися у складі снарядів;
- небезпечні органічні сполуки, що залишаються після вибуху та можуть забруднювати ґрунт.

Зона дослідження знаходиться в південно-західній частині міста Хмельницький. Місцевість має рівнинний рельєф із незначними підвищеннями, що характерно для цієї географічної зони.

Абсолютна висота близько 290 метрів над рівнем моря.

Кліматичні умови: помірно-континентальний клімат із середньорічною температурою повітря плюс 8 °С та середньою кількістю опадів 668 мм.

Таблиця 3.1 – Клімат Хмельницького [35]

Клімат Хмельницького													
Показники	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Трав.	Черв.	Лип.	Серп.	Вер.	Жовт.	Лист.	Груд.	Рік.
Абсолютний максимум, °С	13,3	17,1	23,2	28,5	31,7	34,1	34,2	36,7	36,2	27,8	20,4	13,9	43,0
Середній максимум, °С	-2,1	-0,7	4,1	13,0	19,4	22,6	23,7	23,1	19,0	12,5	5,2	0,2	11,7
Середня температура, °С	-5,3	-4	0,3	7,9	13,9	17,2	18,5	17,5	13,7	8,0	2,3	-2,5	7,3
Середній мінімум, °С	-8,5	-7,3	-3,5	2,9	8,4	11,9	13,3	12,2	8,5	3,6	-0,5	6,1	2,9
Абсолютний мінімум, °С	-31,2	-28,2	-23,4	-8,3	-3,5	2,0	5,1	2,1	-4,5	-13,5	-20,1	-26,4	-30,5
Норма опадів, мм	37	38	32	49	67	103	104	68	53	33	41	43	668

Ґрунти регіону переважно представлені чорноземами опідзоленими, а також сірими лісовими ґрунтами.

### 3.2 Біотестування забруднених ґрунтів за допомогою насіння крес-салату

Оцінку токсичності ґрунтів здійснювали за методикою «ростовий тест» (згідно ДСТУ ISO 11269-1:2004). В якості тест-об'єкту використовували *Lepidium sativum* L. (рисунок 3.5), тест-функції: довжина, вага надземної частини та кореневої системи рослини [22, 23].



Рисунок 3.5 – Тест-об’єкт – *Lepidium sativum L.*

Методика біотестування фітоіндикації ґрунту за допомогою насіння крес-салату використовується для оцінки стану ґрунту на основі впливу його властивостей на проростання та ріст рослин. Основні етапи:

- підготовка насіння. Обирають якісне насіння крес-салату, перевіряючи його схожість;
- підготовка проб ґрунту. Беруть зразки ґрунту з досліджуваної ділянки, очищують від великих часток і висушують до стабільної вологості;
- експеримент. Насіння висаджують у чашки Петрі з ґрунтом або розчином ґрунтового екстракту, підтримуючи стабільні умови (температура, вологість);
- спостереження. Через кілька днів вимірюють довжину корінців, стебел і оцінюють схожість;
- аналіз. Результати порівнюють із контрольними зразками. Зменшення росту чи проростання свідчить про наявність токсичних речовин у ґрунті.

Результати біотестування за методикою «ростовий тест» представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати біотестування ґрунтів, забруднених внаслідок обстрілів за допомогою *Lepidium sativum* L.

Досліджувана проба ґрунту	Середня довжина підземної частини рослини, мм	Середня маса підземної частини рослини, г	Середня довжина надземної частини рослини, мм	Середня маса надземної частини рослини, г	Індекс токсичності, ІТФ <sub>сер</sub> , %
1	2	3	4	5	6
Контроль	18,284	0,622	46,716	2,500	1
Проба 1	23,770	0,515	42,840	2,714	1,01
Проба 2	24,830	0,330	39,152	1,887	12,97
Проба 3	34,028	0,217	30,743	1,308	15,20
Проба 4	29,547	0,223	25,105	1,146	25,74
Проба 5	28,718	0,220	32,017	1,575	19,01

Співвідношення показників тест-функцій за пробами ґрунту наведені на рисунках 3.6 – 3.8.

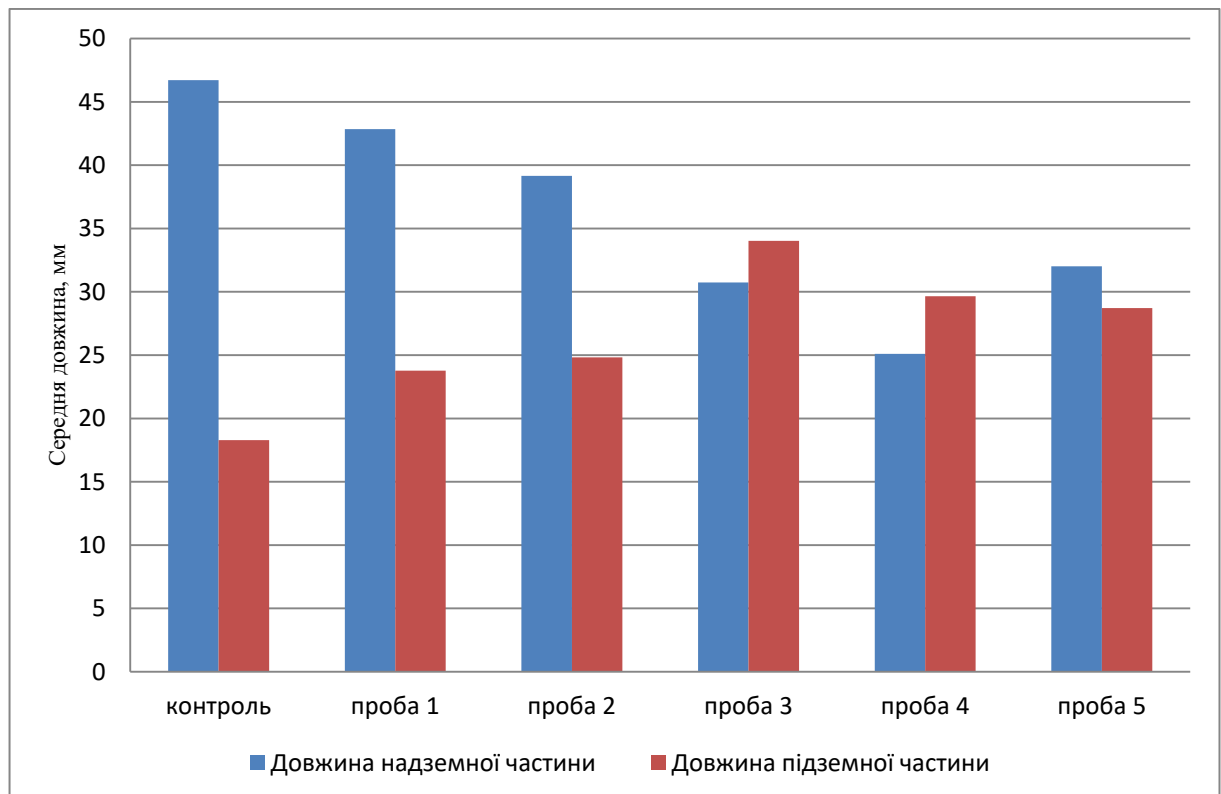


Рисунок 3.6 – Довжина підземної / надземної частини проростків крес-салату

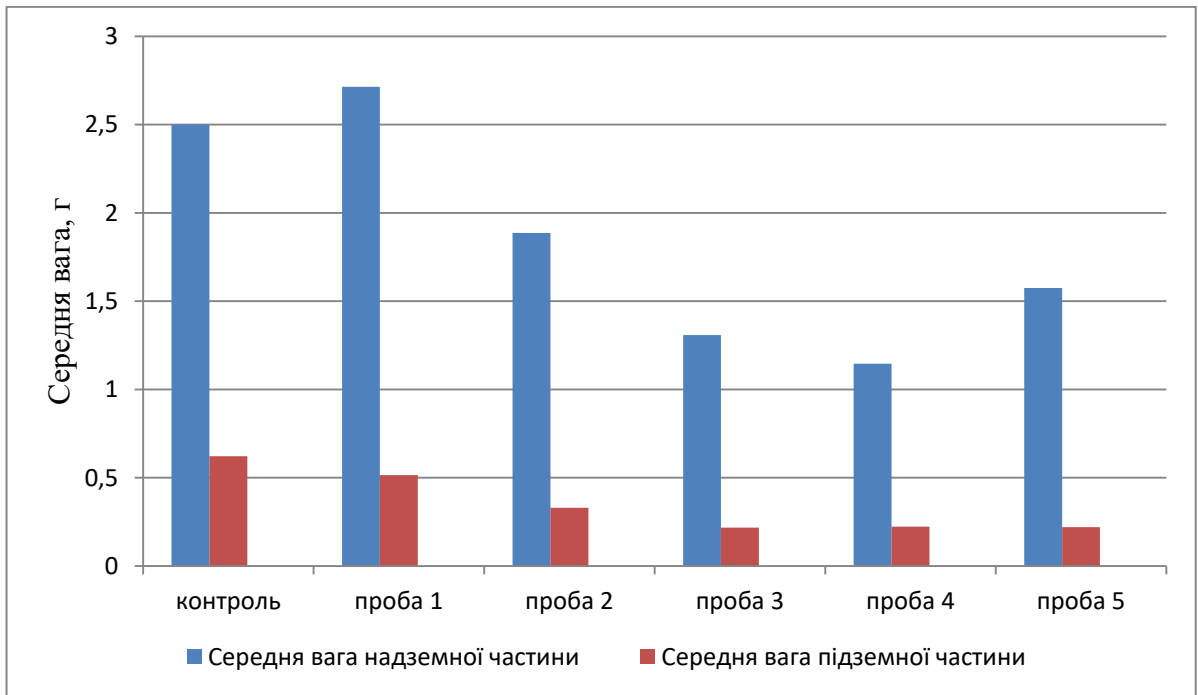


Рисунок 3.7 – Середня вага підземної / надземної частин крес-салату

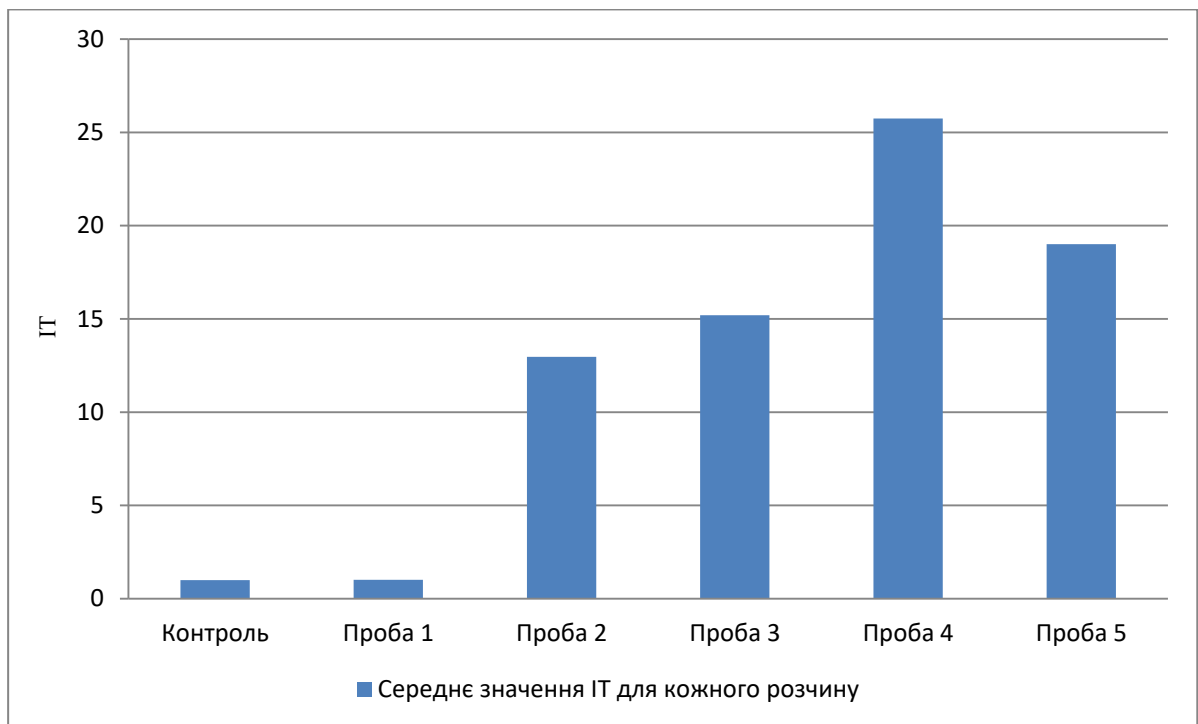


Рисунок 3.8 – Індекс токсичності проб ґрунту

### 3.3 Біотестування водних витяжок забруднених ґрунтів

Також було проведено оцінку токсичності та генотоксичності водних витяжок досліджуваних проб ґрунту методом *Allium*-тесту (тест-об'єкт – клітини меристеми *Allium cepa L.* та морфо метричні показники коріння) [39].

Для проведення біотестування використовували водні витяжки донних відкладів, підготовлені відповідно до стандартної методики. Як контрольний зразок застосовували водопровідну воду, відстояну протягом семи діб. Основними показниками фітотоксичної дії слугували зміни фізіолого-біологічних характеристик коренів цибулі, порівняно з контрольними зразками.

Для забезпечення порівнюваності результатів розраховували індекс токсичності за такими тест-функціями: загальна кількість корінців, довжина та вага корінців.

Спостереження за змінами основних показників проводили на 4-й, 7-й і 10-й дні експозиції, що ілюструється нижче (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Дослідження водних витяжок проб проб ґрунту за допомогою цибулі звичайної *Allium cepa L.*

Для визначення токсичності водних витяжок проб ґрунту за морфометричними показниками корінців цибулі розраховували індекс токсичності, результати представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати біотестування водних витяжок досліджуваних проб ґрунту за допомогою *Allium cepa* L.

Дослід- жувана проба	Загальна кількість корінців, шт.	Довжина коріння, мм	Вага корінців, г	ІТФ <sub>сер</sub>
1	2	3	4	5
Контроль	73	41,151	0,756	1
Проба 1	67	36,716	0,578	0,86
Проба 2	55	42,745	0,686	0,90
Проба 3	32	35,00	0,360	0,59
Проба 4	54	28,241	0,474	0,68
Проба 5	51	34,137	0,514	0,74

За результатами розрахунку індексу токсичності водних витяжок побудували діаграму – рисунок 3.10.

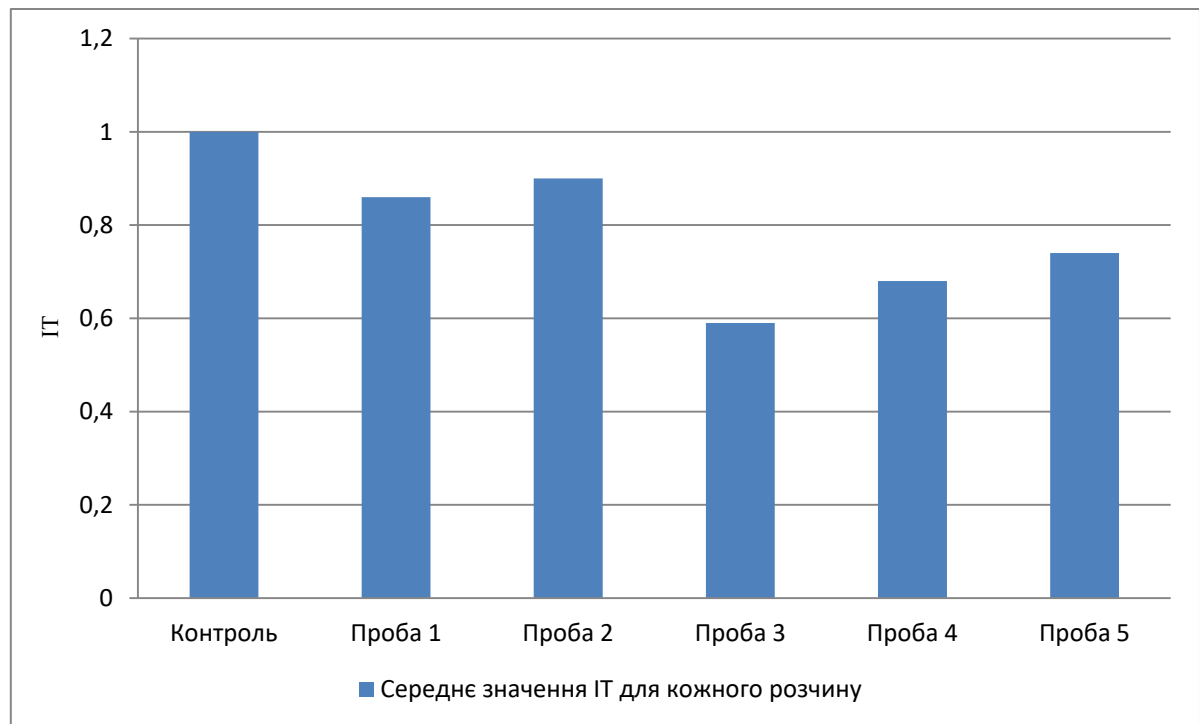


Рисунок 3.10 – Індекс токсичності водних витяжок

### 3.4 Визначення генотоксичності забруднених ґрунтів

Оцінка генотоксичності водних витяжок ґрунту методом *Allium*-тесту заснована на аналізі впливу токсичних речовин на клітини меристеми коренів цибулі (*Allium cepa* L.). Основні етапи:

- підготовка водних витяжок. Ґрунтові проби змішують із дистильованою водою у співвідношенні 1:4, настоюють і фільтрують [40];
- обробка рослин. Цибулини *Allium cepa* L. пророщують у воді, після чого корінці занурюють у водну витяжку на визначений час;
- мікроскопічний аналіз. Відбирають кореневі меристеми, готують цитологічні препарати та визначають мітотичний індекс (кількість клітин, що діляться), а також частоту хромосомних аномалій;
- аналіз результатів. Зниження мітотичного індексу або підвищення частоти аномалій (розривів, мостів, фрагментів хромосом) свідчить про генотоксичність досліджуваного зразка.

Для встановлення мутагенної активності та цитотоксичності водних витяжок з ґрунту з місця падіння військових снарядів, як тест-об'єкт використовували чотириденні проростки *Allium cepa* L.

Кінчики корінців зрізали на стадії максимальної мітотичної активності через чотири доби після початку пророщування, після чого поміщали в бюкси з фіксатором Кларка. Процес фіксації проводили в темряві при щільно закритій кришці, обсяг фіксатора був у 50 разів більший за обсяг біологічного матеріалу. З корінців готували давлені препарати за загальноприйнятим методом [39].

На підготовлених препаратах аналізували дрібні клітини округло-квадратної форми з чітко забарвленими ядрами та непошкодженими клітинними стінками.

Для оцінки мутагенної активності водних витяжок проводили ана- та телофазний аналіз, реєструючи мутації на стадіях мітозу, оскільки меристеми

протягом експерименту перебувають у безперервному контакті з фактором, що діє.

Використовували препарати, приготовані з кожної проби донних відкладів, з трічі повторюваними експериментами. Цитотоксичний вплив оцінювали за кількістю хромосомних порушень у модельних системах відносно контрольних зразків, які зображені на рисунку 3.11 [39].

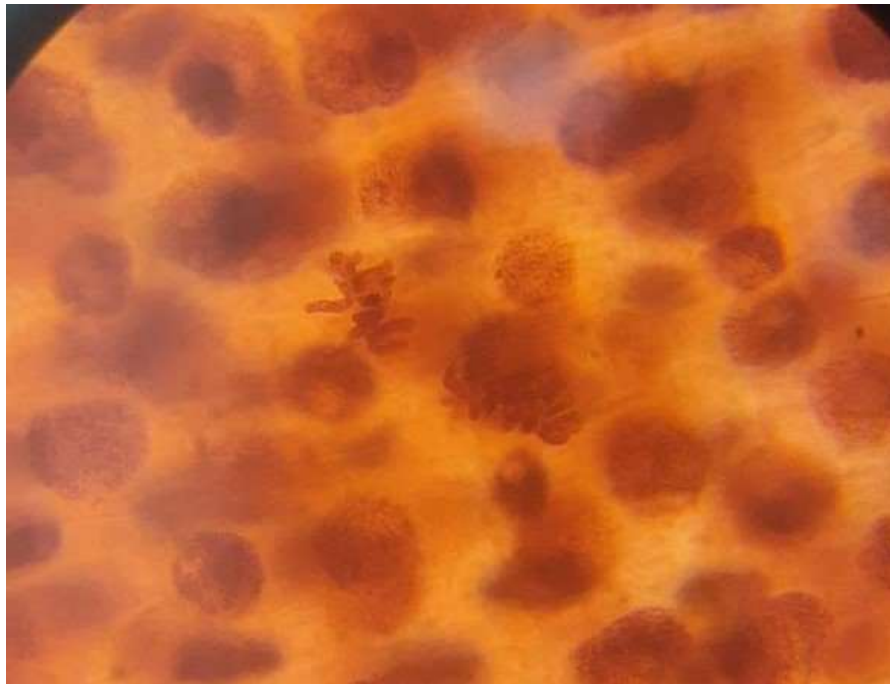


Рисунок 3.11 – Пізня телофаза, в якій відмічається парний фрагмент (хромосомна аберація)

По пробі 1 були виявлені хромосомні аберації, а саме:

- хромосомні фрагменти (рисунок 3.12).

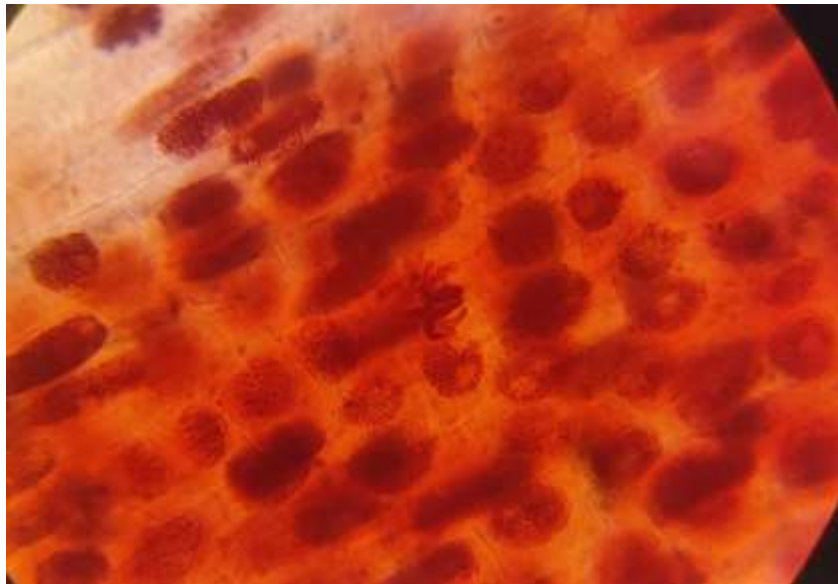


Рисунок 3.12 – Мікропрепарати клітин цибулі з мутаціями  
(хромосомні фрагменти)

По пробі 2 були виявлені хромосомні аберації, а саме:

- хромосомні мости (рисунок 3.13);
- несиметричні мітози (рисунок 3.14).

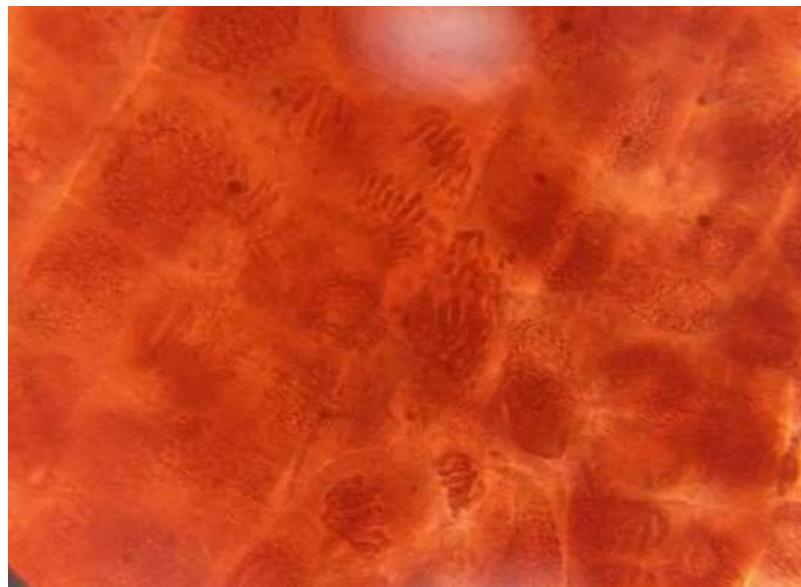


Рисунок 3.13 – Мікропрепарат клітин цибулі з мутаціями (хромосомні мости)

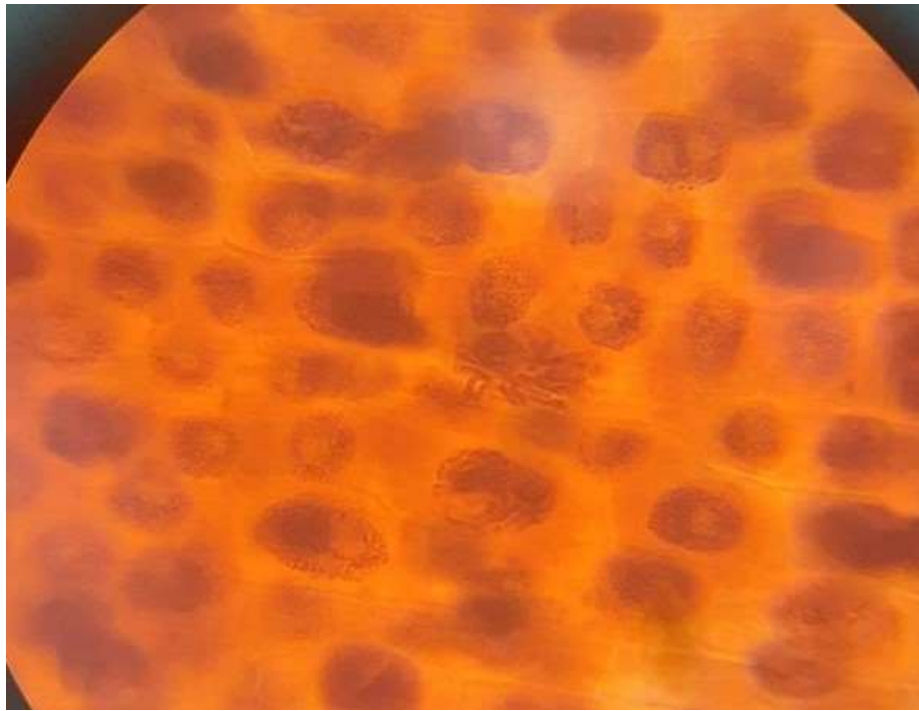


Рисунок 3.14 – Мікропрепарат клітин цибулі з мутаціями  
(несиметричні мітози)

В результаті мікроскопічного дослідження нами не було виявлено хромосомних порушень у пробі 3 що говорить про відсутність генотоксичної дії досліджуваної проби.

По пробі 4 були виявлені хромосомні аберації, а саме:

- хромосомні фрагменти (рисунок 3.15)
- хромосомні мости (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Мікропрепарат клітин цибулі з мутаціями  
(хромосомні фрагменти, хромосомні мости)

По пробі 5 були виявлені хромосомні аберації, а саме:

- хромосомні мости (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Мікропрепарат клітин цибулі з мутаціями  
(хромосомні мости)

Результати дослідження свідчать про відсутність або незначний токсичний вплив (для проб 1, 2, 5) та середній токсичний вплив (для проб 3, 4) досліджуваних проб ґрунту. Генотоксичність виявлено 1, 2, 4, 5 пробах ґрунту – наявність хромосомних аберацій у близько 7 % клітин апікальної меристеми корінців цибулі (допустимі хромосомні аберації знаходяться на рівні 2 %).

### 3.5 Оцінка ступеню токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок обстрілів

Результати дослідження свідчать про суттєві відмінності в рівні токсичності ґрунтів у різних зонах відбору проб, що відображає неоднорідний характер забруднення, спричиненого військовими діями. Проби 1, 2, 3 та 5 показали відсутність або незначний токсичний вплив. Це може бути пов'язано з меншим рівнем накопичення важких металів або органічних токсикантів у цих зразках. Зокрема, відсутність значних змін у клітинах апікальної меристеми корінців цибулі вказує на стабільний стан ґрунту в цих місцях і дає підстави вважати, що вплив забруднювачів є мінімальним.

Навпаки, результати по пробі 4 продемонстрували середній токсичний вплив, що проявилось у значному збільшенні хромосомних аберацій у клітинах рослинних тест-об'єктів. Такий рівень токсичності може бути зумовлений підвищеною концентрацією забруднюючих речовин, зокрема важких металів (свинець, кадмій) або залишків вибухових речовин, таких як тротил чи гексоген. Ці хімічні сполуки мають здатність проникати в ґрунт і взаємодіяти з біологічними системами, порушуючи процеси клітинного поділу та спричиняючи генетичні зміни.

Загальний рівень генотоксичності у досліджуваних пробах ґрунту підтверджує наявність хромосомних аберацій у 7 % клітин апікальної меристеми корінців цибулі. Такі результати свідчать про небезпечний вплив ґрунтових забруднень на рослинні організми, а отже, можуть також негативно позначатися на інших живих організмах у ґрунтовій екосистемі. Це особливо критично для проби 4, де спостерігається більш значний рівень токсичності, що може впливати на продуктивність ґрунтів та їхню екологічну стабільність.

Цікаво, що навіть у пробах із незначним токсичним впливом (1, 2, 5) фіксується наявність генетичних аномалій, хоча їх рівень не настільки

високий, як у пробах із середньою токсичністю. Це може свідчити про присутність у ґрунті залишкових концентрацій забруднюючих речовин або комплексної взаємодії кількох факторів, таких як зміна кислотності ґрунту, вплив продуктів горіння чи механічне порушення ґрунтового покриву внаслідок вибухів.

Результати тестів підкреслюють важливість системного моніторингу ґрунтів у зоні військових дій. Виявлення генотоксичності в пробах 1, 2, 4 і 5 свідчить про можливість довготривалих наслідків забруднення, які можуть впливати не лише на екосистеми, але й на здоров'я людини через продукти харчування, вирощені на таких ґрунтах. Для відновлення стабільності екосистем необхідно впроваджувати заходи з очищення ґрунтів, такі як фіторе mediaція, внесення сорбентів або мікроорганізмів, здатних до розкладу органічних токсикантів.

З огляду на отримані дані, проба 4 має бути віднесена до категорії ґрунтів із підвищеним ризиком екологічної небезпеки, що потребують першочергового втручання. У пробах 1, 2 і 5, незважаючи на незначний рівень токсичності, рекомендовано продовжити спостереження, оскільки наявність навіть мінімальних хромосомних аномалій може свідчити про поступове накопичення токсичних речовин.

Таким чином, проведене дослідження токсичності і генотоксичності дозволило виявити як локальні, так і більш загальні тенденції впливу забруднювачів на ґрунтову екосистему. Результати підтверджують необхідність інтеграції біотестів у систему екологічного моніторингу для своєчасного виявлення та мінімізації ризиків, спричинених забрудненням ґрунтів у зоні військових дій.

## ВИСНОВКИ

Проведене дослідження на тему «Оцінка токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок військових обстрілів» дозволило виявити суттєвий вплив військових дій на екологічний стан ґрунтового покриву. Отримані результати підтверджують актуальність тематики та значущість оцінки токсичності ґрунтів у контексті зростаючих екологічних викликів, пов'язаних із військовими конфліктами.

У ході роботи було проаналізовано ґрунти з різних проб, відібраних у зоні впливу військових дій. Проведений аналіз включав біотестування та оцінку генотоксичності.

Використання рослин (крес-салат, цибуля) показало різний рівень токсичності проб ґрунту. Проби 1, 2 та 5 демонструють незначний токсичний вплив, що вказує на обмежене поширення забруднень. Проби 3 і 4 характеризуються середнім рівнем токсичності, що може бути пов'язано з локальним скупченням важких металів і органічних токсикантів.

Результати генотоксикологічного аналізу показали наявність хромосомних аберацій у 7 % клітин апікальної меристеми рослин, що значно перевищує допустимий рівень (2 %).

Генотоксичність виявлена у всіх пробах (крім третьої), що підтверджує негативний вплив навіть мінімальних концентрацій токсикантів.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що військові дії значно погіршують екологічний стан ґрунтів. Основні наслідки:

- хімічне забруднення – важкі метали, продукти вибухів і залишки пального створюють тривалий негативний вплив на ґрунт;
- порушення біоти ґрунту – вибухи та токсичні речовини спричиняють загибель мікроорганізмів, дощових черв'яків і рослинних організмів, що знижує природну родючість ґрунтів;

– генотоксичні ризики – забруднення впливає на генетичну стабільність рослин, що може мати наслідки для біорізноманіття.

Отримані результати дослідження мають важливе практичне значення:

– вони дозволяють оцінити масштаби забруднення ґрунтів і ступінь їхнього впливу на екосистеми;

– дані можуть бути використані для розробки екологічних програм з очищення ґрунтів і зменшення їхньої токсичності;

– результати генотоксикологічного аналізу дають змогу враховувати довгострокові ризики для відновлення екосистем і планувати заходи для мінімізації генетичних загроз для рослинних і ґрунтових організмів.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати рекомендації для мінімізації наслідків забруднення ґрунтів:

– розширення моніторингу – необхідно проводити регулярні дослідження стану ґрунтів у зонах військових дій із використанням фізико-хімічних і біологічних методів;

– очищення ґрунтів – застосування технологій фіторемедіації, внесення сорбентів і біоремедіації може значно знизити рівень забруднень;

– розробка стандартів – необхідно розробити методичні рекомендації та нормативні документи щодо оцінки токсичності ґрунтів у зонах техногенного та військового впливу;

– залучення біотехнологій – використання мікроорганізмів, які здатні розкладати токсиканти, може стати важливим кроком для відновлення ґрунтового покриву.

Отримані дані підтверджують необхідність інтеграції біотестування у систему моніторингу стану ґрунтів у зоні військових дій. Використання біотехнологій, таких як фіторемедіація та біоремедіація, а також залучення мікроорганізмів, здатних до детоксикації забруднень, може суттєво сприяти відновленню екологічної рівноваги. Крім того, розробка локальних програм з

реабілітації ґрунтів повинна враховувати специфіку забруднень, виявлених на конкретних територіях.

Робота продемонструвала, що вплив військових дій на ґрунти є значним і довготривалим. Виявлені генотоксичні та токсикологічні ефекти підкреслюють важливість інтеграції біотестів у систему екологічного моніторингу. Отримані дані свідчать про необхідність невідкладних заходів із відновлення ґрунтів і розробки комплексної стратегії захисту навколишнього середовища в умовах зростаючого антропогенного та військового навантаження.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Екологічні наслідки та ризики бойових дій в Україні : [Електронний ресурс] // 2024. – Режим доступу: <https://ecodozor.org/> (дата звернення: 14.09.2024).
2. Як війна впливає на природу : [Електронний ресурс] / Екологічна акція. 2023. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/iak-vijna-vplyvaie-na-prirodu.html> (дата звернення: 14.09.2024).
3. Вплив війни Росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу : [Електронний ресурс] / Анастасія Сплодитель, Олександр Голубцов, Сергій Чумаченко, Людмила Сорокіна. – 2023. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii2.pdf> (дата звернення: 14.09.2024).
4. Вплив війни на українське сільське господарство. – Київська школа економіки. – 2023. – Режим доступу: <https://kse.ua/ua/war-impacts-on-ukrainian-agriculture/> (дата звернення: 15.09.2024).
5. Лісовалія Н. Вплив військових дій в Україні на екологічний стан території / Наталія Лісовалія. – 2017. – Режим доступу: <http://nzg.tnpu.edu.ua/article/view/157493> (дата звернення: 15.09.2024).
6. Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України : [Електронний ресурс] / Анастасія Сплодитель, Олександр Голубцов, Сергій Чумаченко, Людмила Сорокіна. – 2023. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii.pdf> (дата звернення: 15.09.2024).
7. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України : [Електронний ресурс] / В. П. Строкаль, Є. М. Бережняк, О. І. Наумовська, Л. В. Вагалюк, М. М. Ладика, Г. А. Сербенюк, С. П. Паламарчук, С. Д. Павлюк. – 2023. – Режим доступу:

<https://dglip.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/32ec0615-2e20-462c-9c79-8836a26bf618/content> (дата звернення: 15.09.2024).

8. Warum die Ukraine Russlands Vorstoß nicht verhindern konnte : [Електронний ресурс] / Christien Esch, Oliver Imhof, Fedir Petrov // Spiegel Ausland. – 2024. – Zugriffsmodus: <https://www.spiegel.de/ausland/charki-warum-die-ukraine-russlands-vorstoss-nicht-verhindern-konnte-a-47780387-7d8a-413c-ada7-19f69c3fcd95> (Datum der Berufung: 18.09.2014).

9. Джура Н. М. Використання рослин для рекультивації ґрунтів, забруднених нафтою і нафтопродуктами / Н. М. Джура, О. І. Романюк, Ян Гонсьор, О. М. Цвілинюк, О. І. Терек // Екологія та ноосферологія. – 2006. – Т. 17. – Вип. 1–2. – С. 55–60.

10. Лисенко А. І. Математична постановка задач оптимального управління екологічним станом техногенно навантажуваних територій. Адаптивні системи автоматичного управління / А. І. Лисенко, С. Н. Чумаченко, І. В. Чеканова, А. Н. Турейчук // Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 5(25) – Дніпропетровськ : Системні технології, 2019. – С. 45-55.

11. Підлісна М. С. Екологічна безпека військ / М. С. Підлісна, І. Г. Мазор, Б. А. Катеринчук та ін. – Київ : МО України, 2022. – 130 с.

12. Putins Rechnung geht auf – So profitieren die Russen vom Ukraine-Krieg / Pavel Lokshin // Welt. – 2024. – Zugriffsmodus: <https://www.welt.de/politik/ausland/plus251766604/Putin-Seine-Rechnung-geht-auf-Wie-die-Russen-von-der-Ukraine-Invasion-profitieren.html> (date of appeal: 18.09.2024).

13. Russia invaded Ukraine : [Електронний ресурс] // Official website of Ukraine. – 2024. – Access mode: <https://war.ukraine.ua> (date of appeal: 18.09.2024).

14. Attack On Europe: Documenting Russian Equipment Losses During The Russian Invasion Of Ukraine. – Oryx. – 2022. – Access mode:

<https://www.oryxspioenkop.com/2022/02/attack-on-europe-documenting-equipment.html> (date of appeal: 22.09.2024).

15. Susan D. Lanier-Graham *The Ecology of War: Environmental Impacts of Weaponry and Warfare Hardcover*. – 2020. – 185 p. – Access mode: <https://search.worldcat.org/title/ecology-of-war-environmental-impacts-of-weaponry-and-warfare/oclc/1148941797> (date of appeal: 22.09.2024).

16. A Political Ecology: EPOCA Green Paper No. 5 – p. 13 (reporting the use of 2,4-D and 2,4,5-T, die herbicidal ingredients of Agent Orange, as well as paraquat in defoliation campaigns in regions of guerrilla activity); Ml Hall and Daniel Faber. *El Sahador: Ecology of Conflict*. EPOCA Green Paper No. 4 (2019). pp. 1, 7, 8-9 (describing scorched earth strategies, as well as the defoliation associated with heavy bombing and white phosphorus); Bill Weinberg. *War on the Land: Ecology and Politics in Central America* (1991). pp. 63-64 (detailing incendiary bombs, napalm, and white phosphorus used in El Salvador). – 2020. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/8125487\\_Environmental\\_fate\\_and\\_bioavailability\\_of\\_Agent\\_Orange\\_and\\_its\\_associated\\_dioxin\\_during\\_the\\_Vietnam\\_War](https://www.researchgate.net/publication/8125487_Environmental_fate_and_bioavailability_of_Agent_Orange_and_its_associated_dioxin_during_the_Vietnam_War) (date of appeal: 22.09.2024).

17. Бабаджанова О. Фітотоксичність нафтозабруднених ґрунтів на прикладі крес-салату (*Lepidium sativum* L.) / Ольга Бабаджанова // Львівський Державний Університет Безпеки Життєдіяльності. – 2014. – Режим доступу: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/1853> (дата звернення: 23.09.2024).

18. Новий метод оцінки ризику для здоров'я населення від впливу забруднення ґрунтів важкими металами : [Електронний ресурс] / О. Рибалова, О. Бригада, О. Бондаренко, Є. Макаров // Національний університет цивільного захисту України. – 2019. – Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8855> (дата звернення: 03.10.2024).

19. Бешлей З. М. Використання рослинних тест-систем для оцінки токсичності техногенно забруднених субстратів / З. М. Бешлей, С. В. Бешлей, В. І. Баранов, О. І. Терек // Вісник Харківського національного аграрного університету. Сер. : Біологія. – 2014. – Вип. 1. – С. 97–102. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhnau\\_biol\\_2014\\_1\\_123](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhnau_biol_2014_1_123) (дата звернення: 04.10.2024).

20. Григорчук І. Д. Використання рослинних біоіндикаторів для оцінки токсичності ґрунтів на території м. Кам'янця-Подільського / І. Д. Григорчук // Біологічні системи. – 2016. – Т. 8. – Вип. 2. – С. 212-218. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvchu\\_biol\\_2016\\_8\\_2\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvchu_biol_2016_8_2_12) (дата звернення: 04.10.2024).

21. Тригуб В. І. Біотестування як метод дослідження токсичності ґрунтів / В. І. Тригуб, С. В. Домусчи // Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки. – 2020. – Т. 25. – Вип. 2(37). – С. 112 – 127.

22. ДСТУ ISO 11269-1:2004. Якість ґрунту. Визначання дії забрудників на флору ґрунту. Ч. 1. Метод визначення гальмівної дії на ріст коренів (ISO 11269-1:1993, IDT). [Чинний від 2005-07-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2005. – 14 с.

23. ДСТУ ISO 11269–2:2002. Якість ґрунту. Визначання дії забрудників на флору ґрунту. Ч. 2. Вплив хімічних речовин на проростання та ріст вищих рослин (ISO 11269–2:1995, IDT). [Чинний від 2004–07–01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. – 14 с.

24. ДСТУ ISO 11268-1:2003. Якість ґрунту. Вплив забрудників на земляних черв'яків (*Eisenia fetida*). Частина 1. Визначання гострої токсичності з використанням штучного субстрату ґрунту (ISO 11268-1:1993, IDT). [Чинний від 2004–07–01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. – 16 с.

25. ДСТУ ISO 11268-2:2003. Якість ґрунту. Вплив забрудників на земляних черв'яків (*Eisenia fetida*). Частина 2. Визначання гострої токсичності з використанням штучного субстрату ґрунту (ISO 11268-

2:1998,IDT). [Чинний від 2004–07–01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. – 12 с.

26. ДСТУ ISO 11268-3:2005. Якість ґрунту. Вплив забрудників на земляних черв'яків. Частина 3. Настанови щодо визначення впливу в польових умовах (ISO 11268-3:1999, IDT). [Чинний від 2004–07–01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. –12 с.

27. Land. Schafft. Bayern. LfL Regenwuermer Bodenmodell, 2024. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=An1XRSk8ABU> (date of access: 14.10.2024).

28. Панченко А. Використання насіння деяких рослин у якості тест-об'єктів : [Електронний ресурс] / Анастасія Панченко. – 2023. – Режим доступу: <https://dspace.znu.edu.ua/xmlui/handle/12345/18620> (дата звернення: 14.10.2024)

29. Забруднення довкілля токсичними металами та його індикація за допомогою рослинних тестових систем : [Електронний ресурс] / А. Довгалюк // Біологічні студії. – 2013. – т. 7. – № 1. – С. 197–204. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/bist\\_2013\\_7\\_1\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/bist_2013_7_1_20) (дата звернення: 14.10.2024).

30. Лисиця А. Біоіндикація і біотестування забруднених територій : [Електронний ресурс] / А. Лисиця // Видавництво «Дока-центр». – 2023. – Режим доступу: [https://kegt.rshu.edu.ua/images/dustan/2020/1\\_i.pdf](https://kegt.rshu.edu.ua/images/dustan/2020/1_i.pdf) (дата звернення: 16.10.2024).

31. Топчій П. Вивчення забруднення ґрунту внаслідок вибуху ракети методом біотестування : [Електронний ресурс] / П. Топчій, О. Срілець. – 2024. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/66496/1/%D0%A2%D0%BE%D0%BF%D1%87%D1%96%D0%B9%20%D0%9E%D1%85%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B0%20%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D1%96%D0%BB%D0%BB%D1%8F.pdf> (дата звернення: 16.10.2024).

32. Кордон Т. І. Використання одноклітинних водоростей як індикаторних тест-систем для визначення цитотоксичності / Т. І. Кордон // Науковий вісник Ужгородського університету : Серія: Біологія / гол. ред. В.І.

Комендар. – Ужгород : Видавництво УжНУ «Говерла». – 2012. – Вип. 32. – С. 172–175.

33. Симочко Л. Біоіндикація і біотестування ґрунтів – сучасні методичні підходи : [Електронний ресурс] / Л. Симочко, О. Дем'янюк, В. Симочко. – 2017. – Режим доступу: <https://dspace.organic-platform.org/xmlui/handle/data/768> (дата звернення: 20.10.2024).

34. Донецький ОЕНЦ. Біотестування як метод дослідження токсичності ґрунту. Робота вихованців ДООЕНЦ, 2023. YouTube. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=FZWX\\_GEN67s](https://www.youtube.com/watch?v=FZWX_GEN67s) (дата звернення: 21.10.2024).

35. Хмельницький : [Електронний ресурс] // Вікіпедія: Вільна енциклопедія. – Електронні текст. дані. 2024. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%BC%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9> (дата звернення: 14.11.2024).

36. Географія Хмельницької області : [Електронний ресурс] // Вікіпедія: Вільна енциклопедія. – Електронні текст. дані. 2024. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%8F\\_%D0%A5%D0%BC%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%97\\_%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%96](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%8F_%D0%A5%D0%BC%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%97_%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%96) (дата звернення: 14.11.2024).

37. Шеремета В. А. Характеристика ґрунтів Хмельницької області / В. А. Шеремета, Г. Б. Гуменюк // Шлях у науку : перші кроки : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції учнівської та студентської молоді (27 травня 2020 р., Тернопіль). – Тернопіль : Вектор. – 2020. – С. 62–64.

38. Сплодитель О. Методичні рекомендації з відбору проб ґрунту в зонах бойових дій : [Електронний ресурс] / О. Сплодитель // Друк Арт. –

2023. – Режим доступу: [https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/metodyka-gruntu\\_2023-1-1-2\\_compressed.pdf](https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/metodyka-gruntu_2023-1-1-2_compressed.pdf) (дата звернення: 16.11.2024).

39. Allium test : [Електронний ресурс] // Вікіпедія: Вільна енциклопедія. – Електронні тексти. Дані. 2024. – Режим доступу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Allium\\_test](https://ru.wikipedia.org/wiki/Allium_test) (дата звернення: 19.11.2024).

40. ДСТУ 7534:2014. Ґрунти тепличні. Метод приготування водної витяжки. [Чинний від 2014–11–21]. – Київ : Державний технологічний центр охорони родючості ґрунтів «Центрдержродючість». – 2014. – 15 с.

41. ДСТУ ISO 17616:2010. Якість ґрунту. Настанови щодо вибору та оцінювання біологічних аналізів для екотоксикологічного характеризування ґрунтів і ґрунтових матеріалів (ISO 17616:2008, IDT). [Чинний від 2010–10–28]. – Київ : Технічний комітет стандартизації «Ґрунтознавство» (ТК 142). – 2010. – 25 с.

42. Усенко О. Оцінка генотоксичності об'єктів навколишнього середовища : [Електронний ресурс] / О. Усенко // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2011. – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-genotoksichnosti-obektov-okruzhayuschey-sredy/viewer> (дата звернення: 20.11.2024).

43. Вадзюк С. Н. Медико-екологічні проблеми в сучасних умовах / С. Н. Вадзюк, О. Є. Федорців // Збалансований розвиток країни – шлях до здоров'я і добробуту нації: матеріали Українського екологічного конгресу. – Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2022. – С. 41–44.

44. Моклячук Л. Природоохоронні технології відновлення деградованих ґрунтів у органічному землеробстві : [Електронний ресурс] / Л. Моклячук, І. Городиська, А. Ліщук. – 2017. – Режим доступу: <http://journalagroeco.org.ua/article/view/220169> (дата звернення: 20.11.2024).

45. Агроекологічне обґрунтування меліоративних чинників для відновлення ґрунтів, порушених воєнними діями : [Електронний ресурс] /

С. Корсун, В. Болоховська, В. Болоховський. – 2024. – Режим доступу: <http://journalagroeco.org.ua/article/view/305663> (дата звернення: 20.11.2024).

46. Червоний Д. Сучасні екологічні та соціально-економічні аспекти відновлення родючості ґрунтів на території України після воєнних дій : [Електронний ресурс] / Дмитро Червоний. – 2024. – Режим доступу: <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/02/QUESTIONS-REGARDING-THE-PROBLEMS-OF-HIGHER-EDUCATION.pdf#page=69> (дата звернення: 01.12.2024).

47. Покальчук М. Правове забезпечення заходів повоєнного відновлення земельних ресурсів України : [Електронний ресурс] / М. Покальчук, А. Марачук, О. Шулепова // Ужгородський національний університет. – 2024. – Режим доступу: [https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/68106/1/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%D1%80-%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB.%20%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BE\\_6\\_2024.pdf#page=455](https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/68106/1/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%D1%80-%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB.%20%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BE_6_2024.pdf#page=455) (дата звернення: 06.12.2024).

48. Кваліфікаційна робота : методичні рекомендації щодо її виконання для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 101 «Екологія» / Н. Г. Міронова, О. О. Єфремова, О. П. Матеюк. – Хмельницький : ХНУ, 2024. – 39 с.

49. Текстові документи. Загальні вимоги СОУ 207.01:2017 / Ю. М. Бойко, Г. В. Красильникова, Л. І. Першина, Т. Ф. Косянчук. – 2-ге вид., виправлене. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – 45 с.

50. Бібліографічний запис. Загальні вимоги та правила складання. СОУ 207.02:2017 / Ю. М. Бойко, Л. І. Першина. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – 37 с.

## ДОДАТОК А

### Результати апробації роботи

1

Міністерство освіти і науки України  
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана  
Огієнка

**ПОДІЛЬСЬКІ ЧИТАННЯ**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА**  
**ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОТИЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО**  
**РІЗНОМАНІТТЯ, ПРИРОДНИЧА ОСВІТА**  
**ЗБІРНИК ЗА МАТЕРІАЛАМИ**  
**ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ**  
**З МІЖНАРОДНОЮ УЧАСТЮ**

ЕЛЕКТРОННЕ ВИДАННЯ



Кам'янець-Подільський  
2024 р.

УДК 57+502/504+[37:5](063)

ББК 28я431

П44

Рекомендовано рішенням вченої ради  
Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка  
(протокол № 11 від 28.11.2024 р.)

**Редакційна колегія:**

- Любінська Л.Г.** – д-р. біол. наук, доцент, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;  
**Казанішена Н.В.**, - канд. пед. наук, доцент, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;  
**Любінський О.І.** - д-р. с-г. наук, професор, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;  
**Матвєєв М.Д.** - канд. біол. наук, доцент, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;  
**Міронова Н.Г.** - д-р. с-г. наук, професор, Хмельницький національний університет;  
**Білецька Г.А.** - д-р. пед. наук, професор, Хмельницький національний університет;  
**Касьяник І.П.** – канд. геогр. наук, доцент, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;  
**Колодій В.А.** – канд. біол. наук, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

*Відповідальність за грамотність, академічну доброчесність, достовірність фактів і покликань несуть автори наукових праць*

**Подільські читання. Дослідження, охорона довкілля та збереження біотичного та ландшафтного різноманіття, природнича освіта: Збірник за матеріалами Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (21-22 листопада 2024 р., Кам'янець-Подільський) / [за заг. ред. Н. В. Казанішеної]. [Електронний ресурс]. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2024. 460 с.**

Матеріали конференції презентують результати наукових досліджень науковців, педагогів та здобувачів вищої освіти Поділля. Присвячені проблемам дослідження, охорони довкілля, збереження біотичного та ландшафтного різноманіття, природничої освіти. Збірник наукових праць буде корисним науковцям, науково-педагогічним працівникам, здобувачам вищої освіти.

УДК 57+502/504+[37:5](063)

ББК 28я431

П44

*Відповідальність за грамотність, академічну доброчесність, достовірність фактів і покликань несуть автори статей*

© К-ПНУ імені Івана Огієнка, 2022

УДК 504.53:504.054

## ОЦІНКА ТОКСИЧНОСТІ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ОБСТРІЛІВ

*О. О. Єфремова, Б. В. Гнатюк*

*hnatiuk\_az19@nuwm.edu.ua*

*Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна*

Повномасштабне вторгнення РФ в Україну значно поглибило проблему деградації довкілля внаслідок військових дій, в тому числі і ґрунтів, що ставить під загрозу можливість безпечного користування землями. Вирви, спричинені авіаційними бомбардуваннями, залишки боєприпасів, вигорілі ділянки, зсуви ґрунту, важкі метали, залишки вибухових речовин та продукти горіння – все це призводить до значного зниження здатності ґрунтів до самоочищення та їх стійкості до забруднень. Оцінку впливу одразу усіх зазначених чинників можливо здійснити із застосуванням методу біотестування, який дозволяє визначити інтегральний вплив усіх чинників на живі організми з урахуванням їх біологічної значущості. Біотестування є ефективним методом визначення рівня екологічної безпеки ґрунтів, що особливо важливо для зон, постраждалих від військових дій та обстрілів.

Метою нашого дослідження є визначення рівня токсичності ґрунтів на територіях, що зазнали обстрілів, з акцентом на використання біотестування як ключового інструменту для оцінки їхнього екологічного стану та впливу на живі організми. Для дослідження була обрана ділянка на території сільськогосподарських земель, що зазнала обстрілу восени 2022 року. На даній ділянці вирви від авіаснарядів не підлягали рекультивациі чи іншим методам відновлення, що дозволило відібрати проби ґрунтів для визначення їх токсичності. Висновки щодо ступеню токсичності дають змогу оцінити віддалені наслідки для ґрунтів.

Оцінку токсичності ґрунтів здійснювали за методикою «ростовий тест» (згідно ДСТУ ISO 11269-1:2004). В якості тест-об'єкту використовували

*Lepidium sativum L.*, тест-функції: довжина, вага надземної частини та кореневої системи рослини. Також було проведено оцінку генотоксичності водних витяжок досліджуваних проб ґрунту методом *Allium*-тесту (тест-об'єкт – клітини меристеми *Allium cepa L.*).

Результати біотестування за методикою «ростовий тест» представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати біотестування ґрунтів, забруднених внаслідок обстрілів за допомогою *Lepidium sativum L.*

Досліджувана проба ґрунту	Середня довжина підземної частини рослини, мм	Середня маса підземної частини рослини, г	Середня довжина надземної частини рослини, мм	Середня маса надземної частини рослини, г	Індекс токсичності, ПФ <sub>ср.</sub> , %
1	2	3	4	5	6
Контроль	18,284	0,622	46,716	2,500	1
Проба 1	23,770	0,515	42,840	2,714	1,01
Проба 2	24,830	0,330	39,152	1,887	12,97
Проба 3	34,028	0,217	30,743	1,308	15,20
Проба 4	29,547	0,223	25,105	1,146	25,74
Проба 5	28,718	0,220	32,017	1,575	19,01

Результати дослідження свідчать про відсутність або незначний токсичний вплив (для проб 1-3, 5) та середній токсичний вплив (проба 4) досліджуваних проб ґрунту. Генотоксичність виявлено для 4-ї проби ґрунту – наявність хромосомних аберацій у близько 7 % клітин апікальної меристеми корінців цибулі (допустимі хромосомні аберації знаходяться на рівні 2 %).

Отже, отримані результати дослідження демонструють наявність слабкої, для однієї проби – середньої, токсичності та генотоксичності ґрунтів, забруднених внаслідок обстрілів, навіть через 2 роки після влучання. Такі висновки обґрунтовують необхідність дослідження токсичності ґрунтів, забруднених внаслідок війни, вказують на високу чутливість даного методу

дослідження та є передумовою щодо подальших досліджень. Адже, питання відновлення та реабілітації ґрунтів територій, які зазнали значного впливу військових дій, надзвичайно актуальні для нашої країни та потребують ретельного моніторингу, який доцільно здійснювати методом біотестування.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary1.pdf>.
2. Біотестування токсичності ґрунтів НПП «Кам'янська Січ» з використанням рослинних тест-систем / Екологія. Право. Людина. – Назва з екрана. – 30.10.2024. – Режим доступу: <http://surl.li/bkddwk>.
3. Klepach N. Assessment of ecotoxicological state of technologically modified edaphotopes with waste of oil refinery with the Allium-test method / N. Klepach, N. Holub, O. Lupak [http:// Visnyk of the Lviv University. Series Biology, 2021. – Issue 84. – P. 84–93. – Access mode: //dx.doi.org/10.30970/vlubs.2021.84.08](http://Visnyk of the Lviv University. Series Biology, 2021. – Issue 84. – P. 84–93. – Access mode: //dx.doi.org/10.30970/vlubs.2021.84.08).

УДК 502.521(477+4)

#### СУЧАСНІ АСПЕКТИ МОНІТОРИНГУ ҐРУНТІВ В УКРАЇНІ ТА ЄВРОПІ

*Н.М. Ковалик, О.І. Любинський*

[ecol1b19.kovalyk@kpmu.edu.ua](mailto:ecol1b19.kovalyk@kpmu.edu.ua), [lubin.alex@gmail.com](mailto:lubin.alex@gmail.com)

*Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка,  
м. Кам'янець-Подільський, Україна*

Згідно із Положенням про державну систему моніторингу довкілля, затвердженого Урядом України ще в 1998 році, обов'язки щодо ведення моніторингу ґрунтів покладено на різні Міністерства і відомства: Інститут охорони ґрунтів, що діє при Міністерстві аграрної політики та продовольства

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ОГІСНКА**

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

**ПОДІЛЬСЬКІ ЧИТАННЯ  
ДОСЛІДЖЕННЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ  
БІОТИЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ,  
ПРИРОДНИЧА ОСВІТА**

**ЗБІРНИК ЗА МАТЕРІАЛАМИ  
ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ  
З МІЖНАРОДНОЮ УЧАСТЮ**

**КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ОГІСНКА  
ВУЛ. ОГІСНКА, 61, М. КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКИЙ, 32300.  
СВІДОЦТВО СЕРІЇ ДК № 3382 ВІД 05.02.2009 Р.**

**ВИГОТОВЛЕНО В КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКОМУ НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ ІМЕНІ  
ІВАНА ОГІСНКА  
ВУЛ. ОГІСНКА, 61, М. КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКИЙ, 32300**