

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету захисту рослин,
біотехнологій та екології

_____ **Юлія КОЛОМІЄЦЬ**

(підпис)

«_____» _____ 2026р

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри екобіотехнології та
біорізноманіття

_____ **Олена КВАСКО**

(підпис)

«_____» _____ 2026р

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Вплив забруднення ґрунту, забрудненого внаслідок бойових дій, на
чисельність та активність основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів»**

Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Біотехнології та біоінженерія»

Гарант освітньої програми

кандидат біологічних наук,
доцент

(підпис)

Олена КВАСКО

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

доктор
сільськогосподарських наук,
доцент

(підпис)

Віра БОРОДАЙ

Виконала

(підпис)

Дар'я ІВАНЮК

КИЇВ-2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри екобіотехнології та біорізноманіття
доктор біологічних наук, доцент

_____ **Олена КВАСКО**

“ _____ ” _____ 2026р.

ЗАВДАННЯ ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ Іванюк Дар'ї Євгенівни

Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Біотехнології та біоінженерія»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи

«Вплив забруднення ґрунту, забрудненого внаслідок бойових дій, на чисельність та активність основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів»

Затверджена наказом ректора НУБІП України від «30» жовтня 2025р. №2596 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру: 15 травня 2026р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: зразки ґрунту з різної відстані від ушкоджених ділянок після бойових дій в Донецькій області, місто Краматорськ.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Дослідження еколого-трофічних груп мікроорганізмів у стані ґрунту на відстані 5м, 10м, 20м.
2. Порівняння та дослідження тенденцій зміни мікробіому.

Перелік графічних документів: рисунки, таблиці.

Дата видачі завдання « 30 » жовтня 2025р.

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Віра БОРОДАЙ

Завдання взяв до виконання

(підпис)

Дар'я ІВАНЮК

КИЇВ-2026

РЕФЕРАТ

Тема бакалаврської роботи «Вплив забруднення ґрунту, забрудненого внаслідок бойових дій, на чисельність та активність основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів».

Кваліфікаційна робота виконана на базі кафедри екобіотехнології та біорізноманіття факультету захисту рослин, біотехнологій та екології Національного університету біоресурсів і природокористування України у 2026 році.

Робота виконана на 52 сторінках, складається з 3 розділів, містить 19 рисунків, 5 таблиць та 31 використане джерело.

Мета роботи: дослідити вплив забруднення ґрунтів, спричиненого бойовими діями, на чисельність основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів, а також оцінити зміни мікробіологічного стану ґрунту в умовах техногенного навантаження.

Об'єкт дослідження: оцінка зміни мікробіологічного стану ґрунту в умовах техногенного навантаження.

Предмет дослідження: чисельність, активність та морфологічні особливості основних еколого-трофічних груп ґрунтових мікроорганізмів у забруднених та контрольних зразках ґрунту.

Методи дослідження: мікробіологічні методи (культивування мікроорганізмів на поживних середовищах, метод серійних розведень, підрахунок колонієутворюючих одиниць), лабораторні методи приготування та стерилізації живильних середовищ, емпіричні методи (спостереження, опис, порівняння), статистичний та аналітичний підхід до оцінки результатів.

Результати досліджень: проведено порівняльний аналіз ґрунтових зразків із територій, уражених бойовими діями, та контрольних ділянок; досліджено чисельність основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів; визначено морфологічні характеристики колоній на різних поживних середовищах;

встановлено зміни мікробного угруповання ґрунту під впливом воєнного забруднення.

Ключові слова: ґрунт, бойові дії, ґрунтове забруднення, еколого-трофічні групи мікроорганізмів, мікробіота ґрунту, азотфіксуючі мікроорганізми, педотрофи, оліготрофи, актиноміцети, амілолітичні мікроорганізми.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	5
1.1 Наслідки бойових дій та їх вплив на ґрунт. Сучасний стан ґрунтів.....	5
1.2. Методи відновлення ґрунтів залежно від типу забруднення. Загальні підходи до рекультивації ґрунтів.....	9
1.3. Очищення ґрунтів від важких металів.....	13
1.4. Механізми детоксикації важких металів.....	19
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	24
2.1 Об'єкт дослідження.....	24
2.2. Відбір зразків ґрунту.....	24
2.3. Приготування і стерилізація поживних середовищ.....	26
2.4. Дослідження мікрофлори ґрунту. Метод серійних розведень.....	29
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ.....	31
3.1 Чисельність еколого-трофічних груп мікроорганізмів у дослідних зразках ґрунту.....	31
3.2. Морфологічна характеристика колоній мікроорганізмів на різних поживних середовищах.....	31
ВИСНОВКИ.....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

ВСТУП

Сучасна військова агресія проти України спричинила катастрофічний вплив на земельні ресурси, в нашому випадку досліджені в районі міста Краматорськ, Донецької області. Масштаби цього конфлікту корелюють із наслідками найбільших світових конфліктів минулого століття. Актуальність дослідження трансформації ґрунтових мікробіоценозів зумовлена тим, що бойові дії ініціюють низку деградаційних процесів: від прямого механічного руйнування ґрунтового профілю та пірогенного знищення гумусу до глибокої контамінації важкими металами і залишками високотоксичних вибухових речовин. Оскільки мікробіота є головним індикатором екологічного благополуччя едафотопів, її пригнічення не лише зупиняє процеси самоочищення ґрунту, а й ставить під загрозу відновлення агроландшафтів та продовольчу безпеку держави в поствоєнний період. Аналіз дозволяє констатувати, що воєнне забруднення призводить до радикальної перебудови еколого-трофічної структури мікробних угруповань.

Встановлено критичне зниження азотфіксаторів, нітрифікаторів, амоніфікаторів, що свідчить про розрив базових циклів трансформації азоту та втрату природної родючості. Водночас у зонах активного токсичного стресу зафіксовано домінування оліготрофної мікрофлори та мікрофлори розсіювання, адаптованої до дефіциту поживних речовин, а також зростання частки актиноміцетів і бацил здатних до іммобілізації важких металів. Спостерігається падіння загальної біологічної та ферментативної активності (каталази та дегідрогенази), що є прямим наслідком хімічного отруєння ґрунту компонентами боєприпасів, такими як тротил та гексоген. Проте демонструється високий потенціал методів біоремедіації які нейтралізують до 99% певних забруднювачів, що підтверджує можливість прискореного відновлення екосистемних функцій ґрунту за умови науково обґрунтованого мікробіологічного втручання.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Наслідки бойових дій та їх вплив на ґрунт. Сучасний стан ґрунтів

Найбільш видимим та миттєвим фактором деградації, що радикально змінює фізичну структуру едафотопу є механічні порушення. Пряме влучання призводить до викиду величезних мас ґрунту. Це руйнує генетичні горизонти, перемішуючи родючий шар із глибинними малородючими породами.

Пересування важкої гусеничної та колісної техніки спричиняє критичне стиснення ґрунту. Знижується його пористість, повтро та водо проникність, що призводить до пригнічення корневих систем і загибелі мезофауни як дощових хробаків наприклад.

Створення фортифікаційних споруд та прокладання військових доріг змінюють гідрологічний режим територій, що може провокувати ерозію та підтоплення.

Військові дії також супроводжуються масштабними пожежами, що призводить до вигорання органіки та пірогенної деструкції гумусу. Термічний шок призводить до миттєвої загибелі мікрофлори у верхніх 5-10 см ґрунту, яке в подальшому може тривати роками. Змінюється кислотність та агрегатний стан ґрунтових часток, що робить їх більш вразливими до вітрової ерозії.

Найбільш складним для ремедіації є хімічне забруднення. Тротил та гесоген мають бактерицидну та фунгітоксичну дію пригнічуючи азотфіксацію та інші ключові процеси. Уламки боєприпасів є джерелом свинцю, сурми, кадмію, нікелю. Розливи палива та мастил створюють гідрофобну плівку, яка блокує доступ кисню та вологи для мікроорганізмів, викликаючи ‘асфіксію’ ґрунтової біоти. Також використання білого фосфору або специфічних видів палива для ракет змінюють хімізм ґрунтових розчинів [1].



Рис 1.1. Зменшення родючості ґрунтів по регіонах [7].

Інтенсивні процеси деградації ґрунтів в Україні спостерігаються у великих аграрних господарствах із площею обробітку понад 5 тис. га. Регіональні особливості деградації мають свої відмінності. У центральних областях основними проявами є зниження врожайності сільськогосподарських культур, погіршення фізичних властивостей ґрунту та руйнування його структури. У східних регіонах, окрім падіння врожайності, спостерігається також забруднення токсичними речовинами та скорочення біорізноманіття. Найбільш критична ситуація характерна для південних територій, особливо тих, що зазнали окупації, де поряд із суттєвим зменшенням урожайності відзначається значне хімічне забруднення ґрунтів [1].

Показники деградації на 13% перевищують показники довоєнного періоду, решта земель перебуває у зоні потенційного ризику.

Фізико-хімічні зміни ґрунтів, спричинені бойовими діями, мають комплексний і глибоко трансформаційний характер. Основними проявами такої деградації є зміни кислотно-лужного стану, зниження вмісту гумусу, трансформація гранулометричного складу та руйнування структурної організації ґрунту, причому всі ці процеси взаємопов'язані та підсилюють один одного [17].

Зміна рН ґрунту є одним із перших і найбільш показових наслідків впливу вибухів та пожеж. У місцях детонації боєприпасів і знищення військової техніки в ґрунт надходить значна кількість продуктів згоряння, серед яких домінують зольні залишки, оксиди металів і залишки паливно-мастильних матеріалів. Унаслідок високотемпературних процесів відбувається піроліз органічних і неорганічних сполук, що супроводжується утворенням речовин із лужними властивостями. Це призводить до зміщення реакції ґрунтового середовища в лужний бік або до її нестабільності порівняно з фоновими показниками. Додатковим фактором є накопичення важких металів, зокрема свинцю, кадмію та цинку, які не лише змінюють іонний склад ґрунтового розчину, але й впливають на буферні властивості ґрунту [15]. У таких умовах змінюється доступність поживних елементів і токсикантів, що створює нові селективні умови для ґрунтових мікроорганізмів. Не менш важливим наслідком є зниження вмісту гумусу, який виконує ключову роль у забезпеченні родючості ґрунту, стабілізації його структури та підтриманні мікробіологічної активності. Під впливом бойових дій гумусовий горизонт зазнає як термічного, так і механічного руйнування. Пожежі спричиняють вигорання органічної речовини, тоді як високі температури інтенсифікують процеси мінералізації, переводячи складні органічні сполуки у більш прості форми. Додатково відбувається перемішування або часткове знищення верхнього шару ґрунту внаслідок вибухових навантажень [3]. У дослідженні [3] це опосередковано підтверджується значним зниженням мікробної біомаси - у 2,1 раза - та пригніченням мікробіологічної активності, що є характерною ознакою виснаження органічного субстрату. Таким чином, деградація гумусового стану призводить до зменшення енергетичної бази для мікроорганізмів і порушення біогеохімічних циклів.

Суттєвих змін зазнає і гранулометричний склад ґрунтів. У статті [4, 15] наведено конкретні кількісні показники, які свідчать про збільшення частки піщаної фракції у 1,2-1,8 раза та одночасне зменшення вмісту глинистих часток у 1,1-1,2 раза. Такі трансформації є наслідком механічного руйнування ґрунтової маси вибуховою хвилею, а також впливу високих температур, що змінюють

фізичний стан часток і сприяють їх агрегації або, навпаки, дезінтеграції. Додаткову роль відіграють продукти згоряння паливно-мастильних матеріалів, які можуть цементувати окремі частки, змінюючи їх розподіл за розміром. Навіть за відсутності формальної зміни текстурного класу ґрунту такі зрушення істотно впливають на його водно-фізичні властивості, зокрема знижують вологоутримуючу здатність, погіршують сорбційний потенціал і змінюють повітряний режим [1, 2].

Вибухи спричиняють утворення вирв і повне руйнування агрегатної будови ґрунту, тоді як пересування важкої техніки призводить до його ущільнення. Термічний вплив руйнує органічні речовини, що виконують функцію цементуючих агентів, унаслідок чого ґрунтови втрачають стійкість. Крім того, у ґрунт потрапляють сторонні матеріали — металеві уламки, залишки боєприпасів, продукти згоряння, які додатково змінюють його фізичні властивості. У дослідженні зазначається, що в усіх випадках спостерігалася механічна та фізична деградація ґрунтів, що супроводжувалася високим рівнем токсичності (до 99,8%) і суттєвими змінами мікробного угруповання, зокрема різким зростанням частки міцеліальних організмів.

1.2. Методи відновлення ґрунтів залежно від типу забруднення.

Меліорація та рекультивація ґрунтів є складовими ширшого процесу відновлення земель, який відбувається після порушення екосистем і природних комплексів. Ці процеси відіграють ключову роль у досягненні ефективного відновлення, ґрунтуючись на припущенні про можливість цілеспрямованого впливу на властивості ґрунту з метою прискорення його формування та відновлення. Меліорація визначається як процес перетворення порушених або деградованих земель у стан, придатний для попереднього чи іншого продуктивного використання. Вона охоплює всі компоненти екосистеми, включаючи ґрунти, водний режим, рослинність і тваринний світ.

Екологічна реставрація включає збереження біорізноманіття, відновлення екологічних процесів і структур, а також врахування регіональних, історичних і культурних особливостей. Реабілітація передбачає покращення стану забруднених територій з метою усунення негативного впливу на здоров'я людини та довкілля. Рекультивація ґрунтів включає широкий спектр заходів, спрямованих на видалення, нейтралізацію, ізоляцію або трансформацію забруднювачів, а також на зниження їхньої доступності для живих організмів. Такі заходи можуть реалізовуватися як безпосередньо на місці (*in situ*), так і з вилученням ґрунту (*ex situ*) [26].

Рекультивація рослинного покриву полягає у створенні або відновленні рослинності на деградованих чи оголених ділянках, наближеної до природного стану до порушення. Цей процес часто є складовою загальної стратегії меліорації та відновлення ґрунтів. Таким чином, меліорація виступає узагальнюючим поняттям, тоді як екологічна реставрація є її окремим напрямом, а рекультивація та відновлення рослинності - конкретними практичними складовими цього процесу.

Процеси рекультивації регулюються нормативними вимогами, що встановлюються на рівні окремих юрисдикцій [7]. У більшості випадків законодавство передбачає обов'язкове відновлення земель до стану, який забезпечує їхню еквівалентну продуктивність і функціональність. Це оцінюється з урахуванням фізичних характеристик території, обмежень щодо її використання та передбачуваних систем господарювання.

Нижче наведено біологічні метод відновлення як біоре mediaція. На першій дослідній ділянці було відібрано зразки ґрунту з двох точок: безпосередньо з-під військової техніки та з умовно непорушеної території в межах однієї ґрунтової відміни.

Мікробіологічні дослідження засвідчили, що внаслідок горіння техніки зазнали значного впливу всі основні групи ґрунтових мікроорганізмів у шарі 0-20 см. Біогенність ґрунту зменшилася приблизно на 30%, що свідчить про

суттєве порушення його біологічної активності та загальне погіршення екологічного стану [7].

Таблиця 1.1. Чисельність мікроорганізмів основних таксономічних і фізіологічних груп [7].

Грунт з ділянок	млн КУО/г ґрунту (*тис. КУО/г ґрунту)									
	Загальна кількість			Оліго-трофи	Педо-трофи	Мікроорганізми, які використовують сполуки азоту		Оліго-нітрофіли	Споро-утворюючі	Загальна чисельність мікро-організмів (біогенність ґрунту)
	Бактерій	Мікро-міцетів*	Актино-міцетів			мінеральні	органічні			
«ґрунт непорушеної ділянки»	38,1	96,0	3,9	13,9	24,6	18,0	36,0	21,4	1,4	157,9
«ґрунт з-під танку»	30,8	30,5	0,65	11,7	9,6	9,1	25,6	10,1	2,1	100,5

В локаціях горіння військової техніки виявлено зміни стану мікробного ценозу, порівняно з непорушеним ґрунтом.

Фіторе mediaція поєднує природні механізми детоксикації із відносною екологічною безпечністю. Вона базується на використанні рослин, здатних поглинати, акумулювати та частково трансформувати забруднювачі, насамперед важкі метали. Приклади таких рослин, як соняшник (*Helianthus annuus*), гірчиця біла (*Sinapis alba*) та коноплі (*Cannabis sativa*) демонструють здатність ефективно вилучати свинець, кадмій і цинк із ґрунту, бо мають кореневої системи, що забезпечує поглинання іонів металів та їх подальше накопичення у надземній біомасі. Важливу роль відіграють кореневі екsudати, які змінюють хімічні властивості ґрунтового розчину, підвищуючи рухомість металів і їх доступність для поглинання. Ефективність фіторе mediaції значно зростає при її поєднанні з мікроорганізмами. У статті [10] зазначено, що азотфіксуючі бактерії, такі як *Rhizobium* і *Azotobacter*, покращують живлення рослин і сприяють відновленню родючості ґрунту. Бактерії родів *Bacillus* і *Pseudomonas* виконують функції біоконтролю, пригнічуючи розвиток патогенів і підтримуючи стабільність мікробіоценозу. Водночас мікоризні гриби (*Glomus intraradices*, *Rhizophagus irregularis*) утворюють симбіотичні асоціації з рослинами, підвищують засвоєння фосфору, посилюють стійкість рослин до стресових умов.

1.3. Очищення ґрунтів від важких металів.



Рис 1.2. Характеристика важких металів як забруднювачів [1].

Міграція та трансформація важких металів у ґрунті, відповідно до результатів дослідження, визначається передусім вмістом їх рухомих форм, які безпосередньо контролюють інтенсивність переходу елементів у систему «ґрунт-рослина». Рухомі форми металів, зокрема Cu, Pb, Zn, Cd, є найбільш реакційно здатними та доступними для поглинання рослинами, і саме їх концентрація визначає рівень біоаккумуляції. Наприклад, у дослідженні встановлено, що мохи накопичують значно вищі концентрації важких металів порівняно з папоротями та листям бука. Це пояснюється тим, що мохи не мають розвиненої кореневої системи і поглинають елементи безпосередньо з поверхні, що робить їх залежними від рухомих форм металів у ґрунтовому розчині та атмосферних випадіннях. Таким чином, високий рівень рухливості металів прямо корелює з їх інтенсивною акумуляцією у біомасі [29].

З позиції біотехнології, рухливість важких металів визначає їх біодоступність. У випадку мохів, які характеризуються безбар'єрним типом накопичення, практично відсутні ефективні механізми селективного контролю надходження елементів, тому навіть невеликі концентрації рухомих форм у ґрунті можуть призводити до значного накопичення металів у тканинах. Натомість у вищих рослин, таких як бук, спостерігається бар'єрний тип

накопичення, де коренева система виконує функцію фільтра, обмежуючи надходження токсичних елементів, що пояснює значно нижчі концентрації металів у листі.

Важливим фактором, що впливає на рухливість і трансформацію важких металів, є рН ґрунту. Хоча в роботі рН не досліджувався експериментально, зазначається, що міграція металів залежить від умов середовища, що дозволяє інтерпретувати кислотність як один із ключових регуляторів цих процесів. У більш кислих умовах відбувається підвищення розчинності сполук металів, що сприяє переходу їх у рухомі іонні форми. Це збільшує їх доступність для поглинання рослинами. Наприклад, за умов підвищеної рухливості металів можна спостерігати більш інтенсивне їх накопичення у мохах, які швидко реагують на зміни хімічного складу середовища.

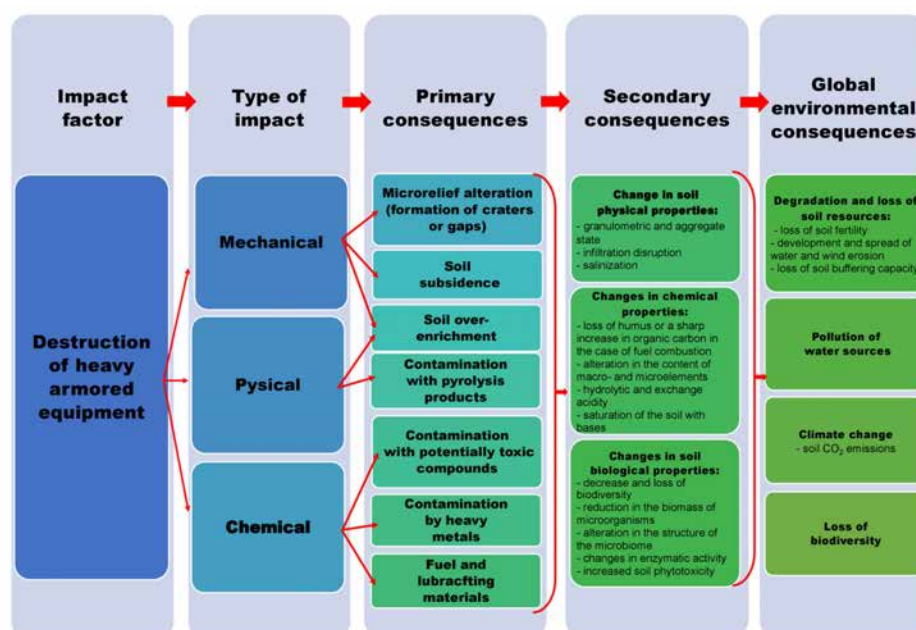
Роль органічної речовини ґрунту в трансформації важких металів проявляється через її здатність впливати на їх фіксацію або, навпаки, мобілізацію. У статті підкреслюється, що накопичення металів залежить від типу ґрунтового покриву, що включає і вміст органічної речовини як одну з його характеристик. Органічні компоненти ґрунту можуть зв'язувати іони металів, утворюючи більш стабільні комплекси, що знижує їх рухливість і біодоступність. Водночас за певних умов такі комплекси можуть руйнуватися, переводячи метали знову у доступні форми. Це пояснює варіабельність накопичення металів навіть у межах одного виду рослин, яка була зафіксована в дослідженні [30, 31].

Вплив важких металів на ґрунтову мікробіоту має вибіркового характеру, що зумовлює нерівномірну чутливість різних еколого-трофічних груп мікроорганізмів. За результатами дослідження встановлено, що найбільшого пригнічення зазнають азотфіксуючі бактерії, мікроскопічні гриби, олігонітрофіли та амілолітичні мікроорганізми, що пов'язано з особливостями їхньої фізіології та метаболічної активності.

Зокрема, азотфіксуючі бактерії є одними з найчутливіших до токсичної дії важких металів через наявність у їх клітинах ферментного комплексу

нітрогенази, який каталізує процес фіксації атмосферного азоту. Цей фермент містить металопротейнові центри (зокрема залізо та молібден), які легко інактивуються під впливом іонів важких металів (Cd, Pb, Cu тощо). Унаслідок цього порушується процес біологічної фіксації азоту, що призводить до різкого зниження чисельності цієї групи мікроорганізмів та погіршення азотного режиму ґрунту [30, 31].

Таблиця 1.3. Причинно-наслідкові зв'язки між деградацією ґрунту та деструкцією важкими транспортними засобами [4].



Мікроскопічні гриби також демонструють високу чутливість до забруднення, оскільки їхній міцелій має велику поверхню контакту з ґрунтовим середовищем, що сприяє інтенсивному накопиченню токсикантів. Важкі метали порушують проникність клітинних мембран грибів, інгібують синтез ферментів та пригнічують ріст гіф, що в кінцевому результаті знижує їх чисельність і активність. Оскільки гриби відіграють ключову роль у розкладанні складних органічних сполук, їх пригнічення безпосередньо впливає на процеси гуміфікації.

Олігонітрофіли, адаптовані до умов низького вмісту поживних речовин, також виявляються вразливими до дії важких металів через обмежені можливості детоксикації. Вони мають менш розвинені механізми зв'язування та виведення

токсичних іонів, що призводить до їх швидкого пригнічення навіть при відносно невисоких концентраціях забруднювачів [3].

Амілолітичні мікроорганізми, які відповідають за розклад полісахаридів (зокрема крохмалю), зазнають негативного впливу через інгібування відповідних ферментів (амілаз). Важкі метали здатні зв'язувати активні центри ферментів або змінювати їхню просторову структуру, що знижує ефективність ферментативного гідролізу органічних речовин.

На відміну від цих груп, амоніфікатори, спорові бактерії та деякі представники ентеробактерій виявляють більшу стійкість до токсичного навантаження. Це пояснюється наявністю у них адаптаційних механізмів утворення спор, здатність до швидкої зміни метаболізму, ефективні системи детоксикації та виведення важких металів з клітини.

У контексті воєнних дій, коли відбувається інтенсивне надходження важких металів у ґрунт унаслідок вибухів, горіння військової техніки та руйнування інфраструктури, зазначені механізми зумовлюють глибоку перебудову мікробного ценозу. Найбільш функціонально важливі групи мікроорганізмів пригнічуються, тоді як стійкі форми починають домінувати, що призводить до зниження біологічної активності ґрунту та порушення його екологічних функцій.

Актиноміцети - це велика група бактерій, які за способом росту та функціями нагадують гриби. Їхні клітини значно менші (приблизно 1–2 мкм), ніж у грибів (10–50 мкм), і вони чутливі до антибактеріальних речовин. Саме актиноміцети, зокрема стрептоміцети, надають ґрунту характерного «земляного» запаху, який відчувається, наприклад, під час оранки. Є джерелом багатьох антибіотиків, зокрема стрептоміцину. Вони здатні розкладати широкий спектр органічних сполук і проявляють найбільшу активність у середовищі з підвищеним рівнем рН. Особливо важливу роль актиноміцети відіграють у розщепленні складних і стійких речовин, таких як хітин, лігнін, кератин, грибна целюлоза та тваринні полімери. У кислих умовах цю функцію ефективніше виконують гриби. Актиноміцети сприяють утворенню стабільного гумусу, що

покращує структуру ґрунту, підвищує його здатність накопичувати поживні речовини та утримувати вологу [3].

У процесах біоремедіації ґрунтів, забруднених внаслідок воєнних дій, ключову роль відіграють різні групи мікроорганізмів-ремедіаторів, серед яких домінують бактерії, актиноміцети та мікроскопічні гриби. Їх ефективність зумовлена здатністю до трансформації, іммобілізації та детоксикації забруднювачів, зокрема важких металів і органічних токсикантів. Бактерії є найбільш дослідженою та широко застосовуваною групою мікроорганізмів у біоремедіації. Особливе значення мають представники родів *Bacillus*, *Pseudomonas* та *Azotobacter*. Їхня роль полягає у реалізації основних механізмів очищення ґрунту - біоаккумуляції, біосорбції, біопреципітації та біовідновлення важких металів. Представники роду *Bacillus* характеризуються високою стійкістю до токсичних умов, що пояснюється їх здатністю утворювати спори та синтезувати металзв'язуючі білки (наприклад, металотіонеїни). Вони активно акумулюють такі метали, як кадмій, свинець, цинк, арсен і хром, а також здатні до їх внутрішньоклітинного накопичення та детоксикації. Крім того, окремі штами здійснюють відновлення токсичних форм металів, наприклад перетворення Cr(VI) у менш токсичний Cr(III), що значно знижує їхню рухливість і біодоступність у ґрунті. Бактерії роду *Pseudomonas* відзначаються високою метаболічною пластичністю та адаптивністю до забруднених середовищ. Вони є одними з найефективніших агентів біодеструкції як органічних забруднювачів, вибухових речовин і нафтопродуктів, так і важких металів. Їхня здатність до біоаккумуляції та біовідновлення (перетворення Cu^{2+} у менш токсичні форми) забезпечує ефективне зниження токсичності ґрунту [4].

Бактерії роду *Azotobacter*, хоча менш детально представлені у статті, належать до групи азотфіксуючих мікроорганізмів, що відіграють важливу роль у відновленні родючості ґрунтів після забруднення. Вони не лише покращують азотний баланс, а й беруть участь у зв'язуванні важких металів через синтез полісахаридів та інших біополімерів, що сприяє їх іммобілізації. Актиноміцети займають проміжне положення між бактеріями та грибами і характеризуються

високою стійкістю до екстремальних умов, включаючи високі концентрації токсикантів. Вони здатні до деградації складних органічних сполук, зокрема компонентів нафти та вибухових речовин, що особливо актуально для ґрунтів, забруднених унаслідок бойових дій. Їхня розгалужена міцеліальна структура сприяє ефективній сорбції важких металів, а також формуванню стабільних органо-мінеральних комплексів, що знижують мобільність токсикантів. Мікроскопічні гриби (мікроміцети) відіграють важливу роль у біоремедіації завдяки потужному ферментативному апарату та здатності до позаклітинного розкладання складних органічних речовин. Вони продукують органічні кислоти, які можуть змінювати рН ґрунту та впливати на розчинність важких металів, а також сприяють їх хелатуванню і подальшій іммобілізації. Крім того, гриби активно беруть участь у процесах гуміфікації, що сприяє відновленню структури ґрунту та його біологічної активності [14].

1.4. Механізми детоксикації важких металів

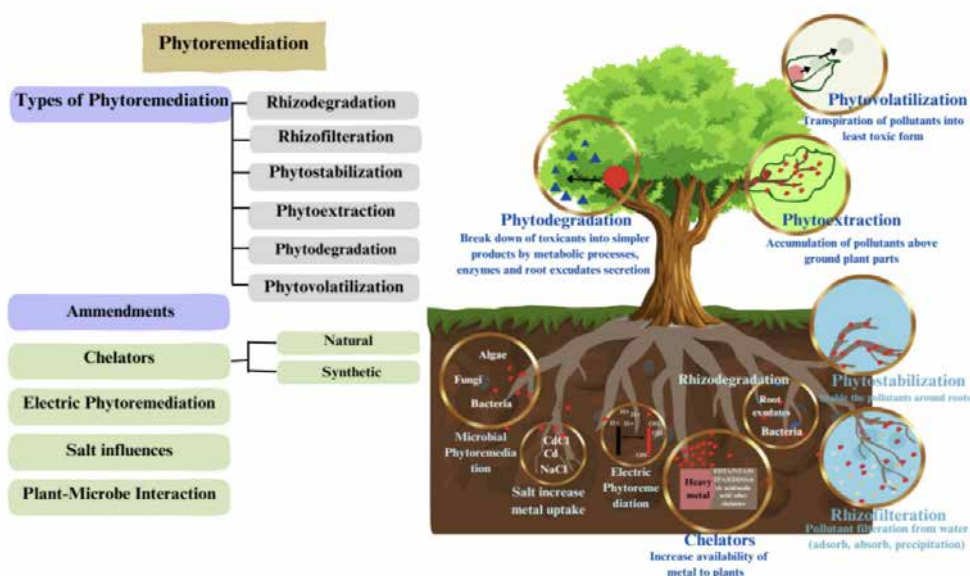


Рис 1.3. Механізм фітореMediaції [9].

Процес очищення навколишнього середовища від важких металів за допомогою біологічних агентів ґрунтується на декількох ключових механізмах, які дозволяють організмам виживати в умовах токсичного стресу та ефективно видаляти або знешкоджувати забруднювачі. Основними стратегіями, описаними в дослідженні, є біоаккумуляція, біосорбція, біотрансформація та утворення нерозчинних сполук. Біоаккумуляція є активним метаболічним процесом, при якому живі організми (переважно рослини та мікроорганізми) поглинають іони металів і накопичують їх у своїх тканинах або клітинах. У контексті фітореMediaції цей процес включає поглинання металів корінням із ґрунтового розчину та їх подальше транспортування до пагонів і листя. Наприклад, рослина *Typha angustifolia* демонструє високу здатність до накопичення Cd та Zn, концентруючи в собі значні маси цих елементів (до 14,1 г Cd та 59,3 г Zn на рослину). Гіперакумулятори, такі як соняшник (*Helianthus annuus*), здатні витримувати надзвичайно високі концентрації металів, не виявляючи ознак фітотоксичності, що робить їх незамінними для фітоекстракції [11]. Біосорбція виступає як початковий, часто пасивний етап взаємодії, що не потребує витрат енергії клітини. Цей механізм базується на фізико-хімічному зв'язуванні іонів

металів на поверхні біомаси (клітинних стінках). Клітинні стінки рослин багаті на пектин, який завдяки здатності до катіонного обміну стає природним фільтром, що утримує важкі метали, перешкоджаючи їхньому проникненню в цитоплазму. Цей механізм відіграє вирішальну роль у процесі фітостабілізації, де метали іммобілізуються безпосередньо в ризосфері або на поверхні коренів, що мінімізує їхнє вимивання в підземні води. Біотрансформація полягає у зміні хімічного стану металу для зниження його біологічної доступності або токсичності. Оскільки важкі метали є елементами, що не піддаються біологічному розкладу, детоксикація відбувається шляхом зміни ступеня окиснення. Класичним прикладом є відновлення високотоксичного та рухливого шестивалентного хрому Cr (VI) до менш токсичного тривалентного стану Cr (III). Також мікроорганізми можуть здійснювати метилювання металів (ртуть), що змінює їхню леткість та розчинність, впливаючи на цикл їхнього переміщення в екосистемі [9].

Преципітація, стратегія іммобілізації металів у формі твердих осадів. Рослини сприяють цьому процесу через виділення корневих ексудатів (цукрів, органічних кислот), які змінюють рН середовища навколо кореня, спричиняючи випадання металів в осад. Наприклад, токсичний арсен (As) може бути нейтралізований шляхом утворення арсен-трис-тіолату за участю сульфату заліза. Крім того, хром у формі Cr (III) природно утворює нерозчинні солі, які втрачають здатність мігрувати в ґрунті. На клітинному рівні детоксикація підкріплюється внутрішніми механізмами толерантності. До них належать хелатування (зв'язування металів спеціальними білками, такими як фітохелатини та металотіонеїни), секвестрація (ізоляція металевих комплексів у вакуолях, подалі від життєво важливих органел) та активація антиоксидантної системи (ферментів каталази та пероксидази), що нейтралізує окиснювальний стрес, спричинений присутністю важких металів [8]. Сукупність цих методів забезпечує високу ефективність сучасних біотехнологічних підходів до ремедіації забруднених територій.

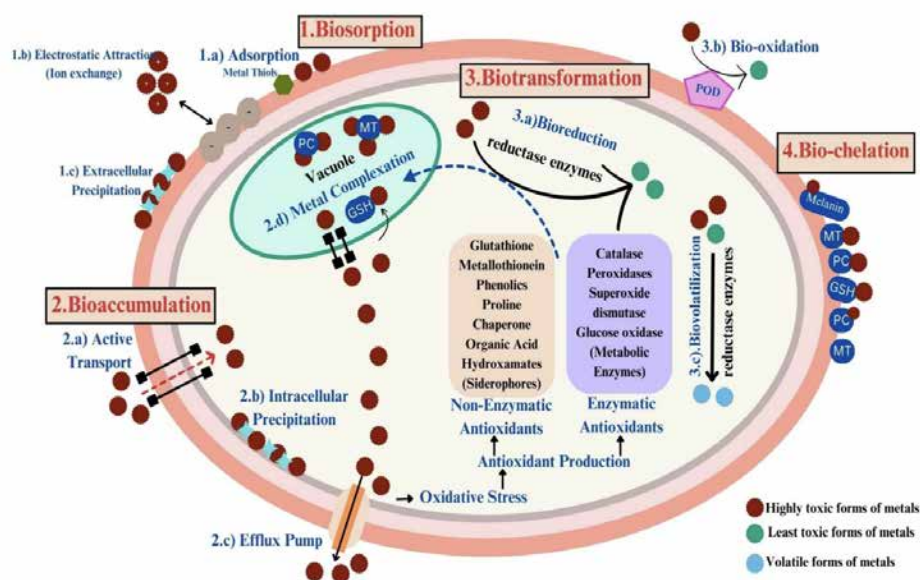


Fig. 2 Microbial bioremediation (Bacteria, Fungi) of toxic heavy metals through biosorption, bioaccumulation, biotransformation and bio-chelation. PC- phytochelutins, MT- metallothionein, GSH- glutathione, POD- peroxidase

Рис 1.4. Мікробна біоремедіація важких металів та їх механізм [9].

Встановлено, що застосування біоремедіаційних підходів у ґрунтах, забруднених унаслідок бойових дій, супроводжується низкою обмежень, пов'язаних передусім із високим рівнем токсичності такого середовища. Відповідно до досліджень, уражені ґрунти характеризуються значним накопиченням важких металів і продуктів згоряння, що зумовлює різке підвищення токсичності (до 99,8 %). Такі умови пригнічують мікробіологічну активність, що підтверджується зниженням мікробної біомаси у 2,1 раза та загальним уповільненням біохімічних процесів. Унаслідок цього ефективність як природних, так і керованих процесів ремедіації суттєво обмежується, оскільки саме мікроорганізми є ключовими агентами трансформації забруднювачів. Водночас у таких екстремальних умовах відбуваються процеси адаптації мікроорганізмів, що проявляються у зміні структури мікробного угруповання. У дослідженні відзначено зростання частки міцеліальних форм у 20,5 раза, що свідчить про їхню вищу стійкість до токсикантів і здатність функціонувати в умовах підвищеного забруднення. Це вказує на селекційний відбір резистентних форм, які можуть брати участь у трансформації забруднювачів навіть за несприятливих умов. Проте така перебудова мікробіому супроводжується

зменшенням біорізноманіття та функціональної активності, що обмежує швидкість відновлення ґрунтових екосистем [9].

Серед методів рекультивації земель, забруднених вибухонебезпечними речовинами, виділяють кілька основних підходів. Одним із них є вапнування ґрунту, яке сприяє суттєвому зниженню концентрації вибухових сполук, зокрема RDX - до 75%, а також зменшенню їх вмісту у поверхневому водному стоку - до 98%. Іншим методом є спалювання, яке розглядається як крайній захід. Її застосування доцільне у випадках значного забруднення ґрунтів легкозаймистими речовинами та хімічно активними речовинами [10].

Перспективним є також створення штучних водно-болотних угідь, які можуть бути ефективними для відновлення територій, що зазнали гідроекологічних порушень, зокрема внаслідок руйнування Каховської ГЕС. Окрему увагу приділяють біологічним підходам до відновлення ґрунтів, забруднених хімічними речовинами. Зокрема, пропонується концепція натуралізації деградованих територій, яка передбачає їх часткове виведення з господарського використання з метою природного самовідновлення екосистем. Водночас цей процес є тривалим, що обумовлює необхідність пошуку шляхів його прискорення. Одним із таких підходів є використання адаптованих мікроорганізмів сформованих у забруднених середовищах. Встановлено, що на територіях із тривалим впливом пестицидів і агрохімікатів формується специфічна мікрофлора, здатна витримувати високі концентрації токсикантів. Виділення, культивування та подальше застосування таких мікроорганізмів у вигляді селективних біопрепаратів може забезпечити ефективну деградацію забруднюючих речовин у ґрунті [7].

Серед інноваційних рішень вирощування спеціально підібраних рослин на забруднених територіях (фітомеліорація), подальшу переробку отриманої біомаси з утворенням біогазу, а також використання залишкової органічної маси для живлення личинок комах. У результаті формується зоокомпост, збагачений макро та мікроелементами, гуміновими і фульвовими кислотами, який може бути повернутий у ґрунт для підвищення його родючості. Додатково отримуються

побічні продукти (біомаса личинок), що може використовуватися як джерело жирів для виробництва біодизеля та протеїнів. Вказано, що лабораторний етап досліджень щодо створення зоокомпосту вже завершено, і найближчим часом планується його практичне впровадження в виробничих умовах [11].



Рис 1.5. Одна зі схем нових ‘Зелених технологій’ запропонована МХП.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є зразки ґрунту взятій з ділянки близької до бойових дій місто Краматорськ, Донецька область та контрольний зразок взятий з місця, на біом якої впливу не було в тому самому регіоні.

Еколого-трофічні групи це сукупність мікроорганізмів та безхребетних, що об'єднані подібним типом живлення та способом отримання енергії у ґрунті

Педотрофи (копіотрофи) - розщеплюють токсичні органічні речовини, стійкі до важких металів (*Trichoderma*, *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*). Ростуть на Ґрунтовому агарі (ҐрА).

Оліготрофи - живуть на бідних на поживні речовини ґрунтах (*Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*). Ростуть на Голодному агарі (ГА).

Амілолітичні - здатні розкласти важкодоступні для рослин речовини за наявності певних ферментів (*Trichoderma*, *Chaetomium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Alternaria*). Ростуть на Крохмально-аміачному агарі (КАА).

Патогенні мікроміцети - здатні при зниженні природної резистентності організму викликати захворювання (*Trichoderma*, *Chaetomium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Alternaria*, *Cladosporium*). Ростуть на середовищі Чапека (ЧА)

Азотфіксуючі мікроорганізми - здатні фіксувати атмосферний азот і переводити його в доступні для рослин форми, підвищуючи засвоєння азоту рослинами (*Azotobacter chroococcum*). Ростуть на середовищі Ешбі.

Фосформобілізуючі мікроорганізми - здатні переводити нерозчинні сполуки фосфору в доступні для рослин форми, покращуючи засвоєння фосфору (*Bacillus megaterium*).

2.2. Відбір зразків ґрунту

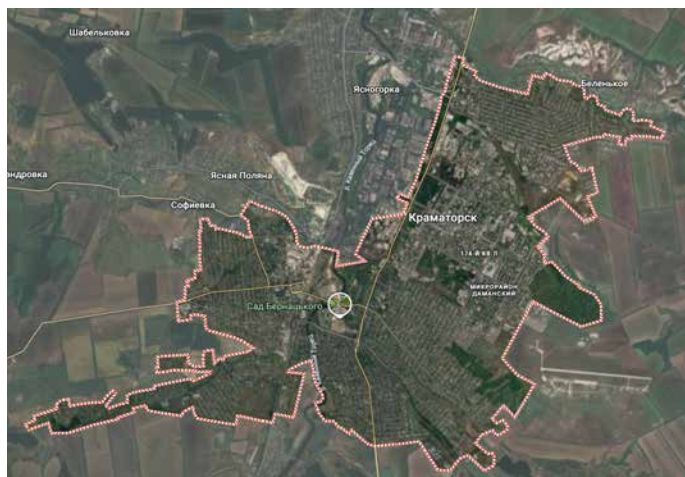
Зразки ґрунту бралися з регіону Донецької області, з міста Краматорська, який зараз є прифронтовим та має багато ділянок уражень бомбами, важкою

воєнною технікою тощо. В якості контрольної групи використовували ґрунт з околиць міста, які не мали жодного контакту з боєприпасами. В якості експериментальної групи використовували зразки з уражених ділянок після прильотів.

СХЕМА ДОСЛІДЖЕНЬ

- 1- контрольний зразок - непорушена територія
- 2- від епіцентру ураження 5 метрів - зона безпосереднього термічного та хімічного впливу внаслідок детонації боєприпасів.
- 3- від епіцентру ураження 10 метрів
- 4- від епіцентру ураження 20 метрів

Відповідно до проаналізованого стандарту ДСТУ ISO 10381-4:2005, відбирання ґрунтових проб здійснювалися за чітко визначеними принципами, які забезпечують репрезентативність і достовірність результатів. Стандарт передбачає, що схема відбору може бути систематичною, випадковою або статистично обґрунтованою, але обов'язково повинна забезпечувати типове представлення ділянки. При цьому рекомендується уникати нетипових місць (краї ділянок, перезволожені або аномальні зони), які можуть спотворювати результати. Стандарт підкреслює, що такі проби повинні бути рівномірно відібрані та змішані, щоб кінцевий зразок був репрезентативним для всієї ділянки. У ряді випадків рекомендується відбирати не менше 15 точкових проб для формування одного зразка [12, 26]



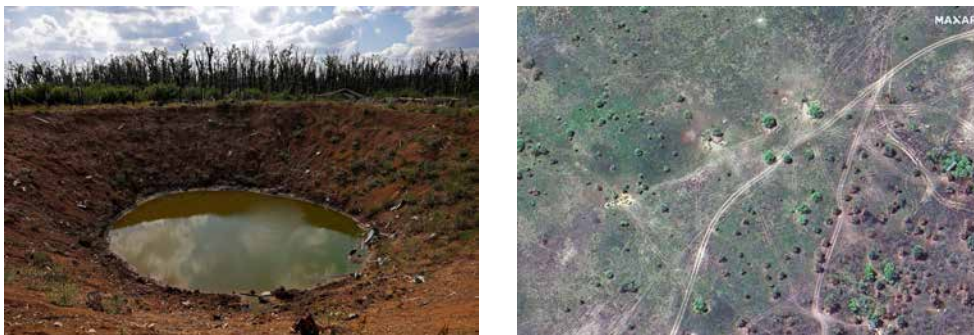


Рис 2.1. Пошкодження від бойових дій в місті Краматорськ.

2.3. Приготування і стерилізація поживних середовищ

Біотехнологічна лабораторія - це спеціально обладнане місце або блок приміщень, в яких проводяться процеси роботи дослідження мікроорганізмів ґрунту починаючи з приготування живильних середовищ, введення та культивування зразків до проведення численних аналізів. Лабораторії має виділені зони для кожного окремого етапу, щоб запобігти контамінації.

Головною умовою будь-якого лабораторного дослідження є стерильність на всіх етапах роботи, від підготовки обладнання до самого процесу приготування живильних середовищ.

Перед стерилізацією усе лабораторне обладнання ретельно промивалось. Цю процедуру проводили в кілька етапів

1. Посуд замочували у теплій воді, агар видаляли механічно
2. Промивали посуд у теплій воді по другому колу
3. Поступово промивали спочатку у водопровідній воді, потім у дистильованій.
4. Висушували

Перед заповненням агаром зі зразками колби, пробірки та чашки Петрі стерилізували сухим жаром у сухожаровій шафі протягом 2 годин при температурі 150-170°C.

ГОЛОДНИЙ АГАР

Агар-агар - 15-20 г

Дистильована вода - 1000 мл

Реактиви для корекції рН середовища до 6.5-7.0 діапазону для ґрунтової мікробіоти.

1. Наважку агару вносили у колбу з дистильованою водою підігрітою.
2. Обережно помішували до повного розчинення та просвітлення розчину.
3. Далі автоклаували при 121°C 15-20 хв (1 атм).
4. Після автоклаування середовище охолоджували до 45-50°C. Розливали агар в зоні пальника на чашки так, щоб агар рівномірно покривав поверхню чашок. Ту саму процедуру розливу використовували і в подальшому для всіх інших середовищ.

ЧАПЕКА

В 1 л водопровідної води внести при перемішуванні:

Глюкоза або гліцерин - 30,0 г;

NaNO₃ - 2,0 г;

K₂HPO₄ - 1,0 г;

MgSO₄·7H₂O - 0,5 г;

NaCl - 0,5 г;

FeSO₄·7H₂O - 0,01 г.

Агар - 15,0 г;

Крейда - 3,0 г;

Дистильована вода - 1000 мл.

ГРУНТОВИЙ АГАР (ГрА)

1. Просіяний ґрунт наважка;
2. Дистильована вода - 250 мл;
3. Пептон - 10 г;
4. Агар-агар - 15 гр;
5. Середовище стерилізували в автоклаві при 120°C протягом 1 год.

ЕШБІ

На 1 л водопровідної вод добавляли:

KH_2PO_4 - 0,2 г;

MgSO_4 - 0,2 г;

K_2HPO_4 - 0,1 г;

NaCl - 0,2 г;

CaCO_3 - 5,0 г;

сахароза, г - 20;

агар-агар, г - 20.

КРОХМАЛОАМІАЧНИЙ АГАР (КАА)

Розчинний крохмаль - 10,0 г;

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - 1,0 г;

K_2HPO_4 - 1,0 г;

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ - 1,0 г;

NaCl - 1,0 г;

CaCO_3 - 3,0 г;

Агар - 15,0 г;

Водопровідна вода - 1000 мл.

М'ЯСО-ПЕПТОННИЙ АГАР (МПА)

1. До охолодженого МПБ додавали 1,5-2,0% агар-агару, витримували 15-20 хв за кімнатної температури
2. Підігрівали суміш на водяній бані до розчинення агару
3. Розливали і стерилізували при 120°C (1 атм) 15-20 хв

ЕНДО

Поживне середовище Ендо випускається у вигляді сухого порошку і готували згідно пропису, вказаного на етикетці. Доводили до літра

2.4. Дослідження мікрофлори ґрунту. Метод серійних розведень

Метод серійних розведень є класичним підходом в мікробіології для кількісної оцінки чисельності культивованої мікрофлори ґрунту, що базується на принципі поступового зниження концентрації мікроорганізмів у досліджуваному зразку з подальшим висівом на поживні середовища та підрахунком колонієутворюючих одиниць (КУО). Дослідження починалося з відбору 1 г зразка ґрунту і переносять у стерильний розчин - отримують початкову суспензію. Ретельно гомогенізують та готують ряд десятикратних серійних розведень перенесенням 1 мл у пробірки з 9 мл стерильного розчину. Це забезпечує отримання розведень від 10^{-1} до 10^{-6} чисельності мікроорганізмів. З кожного розведення відбирають фіксований об'єм (0,1 мл) і здійснюють поверхневий або глибинний посів на середовище. Ґрунтові мікроорганізми інкубують за $25-30^{\circ}\text{C}$ протягом 24-72 год залежно від фізіологічних особливостей досліджуваних груп. Після інкубації здійснюють підрахунок колоній на чашках Петрі. Розраховують чисельність мікроорганізмів за формулою:

$$N = \frac{a \cdot 10^n}{V},$$

де N - чисельність мікроорганізмів (КУО/мл); a - середня кількість колоній на чашці Петрі; n - показник розведення; V - об'єм посівного матеріалу, внесеного на поживне середовище, мл.

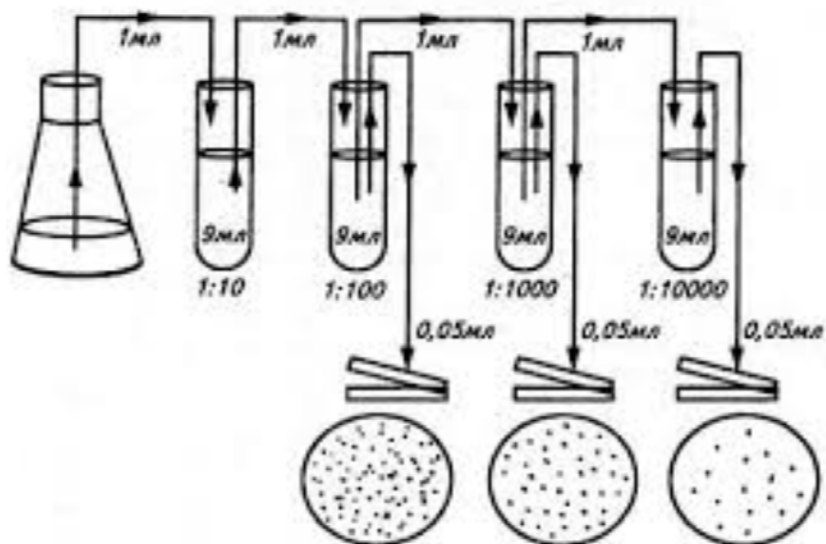


Рис 2.2. Метод серійних розведень [20].

Дозволяє оцінити екологічний стан мікробіоти ґрунту, але даний метод є обмеженим у виявленні некультивованих форм мікроорганізмів і може супроводжуватися похибками, пов'язаними з агрегацією клітин та нерівномірністю розподілу мікробних клітин у суспензії.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Чисельність еколого-трофічних груп мікроорганізмів у дослідних зразках ґрунту.

Отримали результати, що свідчать про виражену перебудову структури ґрунтового мікробіоценозу під впливом бойового забруднення. Дані демонструють чітку залежність між відстанню від епіцентру ураження та чисельністю мікроорганізмів. Найбільш істотне пригнічення мікробіологічної активності спостерігається у зразках, відібраних на відстані 5-10м, а на 20м у більшості груп відзначається часткове або повне відновлення чисельності.

Таблиця 3.1. Чисельність еколого-трофічних груп мікроорганізмів у дослідних зразках ґрунту.

		Контроль	5м	10м	20м
Педотрофи (ГрА10³)	<i>Бактерії</i>	144,5±8,2	32,1±2,3	124,7±6,7	164,3±9,1
	<i>Гриби</i>	0	3,3±0,5	0	3,2±0,3
Азотфіксатори (Ешбі 10⁵)	<i>Бактерії</i>	10,8±1,1	1,5±0,2	1,4±0,1	14,2±1,3
	<i>Гриби</i>	0	0	1,9±0,4	0
Гриби (Сабуро 10³)	<i>Гриби</i>	60,5±3,5	40,7±2,8	12,3±0,9	51,7±3,3
Бактерії (МПА 10⁵)	<i>Бактерії</i>	124,2±9,3	19,4±1,5	13,9±1,2	84,8±4,8
Оліготрофи (ГА10⁵)	<i>Бактерії</i>	92,1±4,2	28,9±1,9	10,6±0,9	56,7±3,1
	<i>Гриби</i>	0	1,2±0,3	1,2±0,1	2,4±0,6
Актиноміцети (КАА 10⁵)	<i>Бактерії</i>	17,5±1,4	43,5±2,6	38,3±2,3	120,6±8,9
	<i>Гриби</i>	21,7±1,7	1,3±0,2	0	5,6±0,9

У контрольному зразку чисельність педотрофів становила $144,5 \times 10^5$ КУО/г, а на відстані 5 м спостерігалось різке зниження до $32,1 \times 10^5$ КУО/г. Це

свідчить про сильний токсичний вплив бойового забруднення. На відстані 10м чисельність зростала до $124,7 \times 10^5$ КУО/г, а на 20м досягала $164,3 \times 10^5$ КУО/г, перевищуючи контрольні показники. Така тенденція може пояснюватися поступовим зменшенням концентрації токсикантів із віддаленням від місця ураження. Педотрофні мікроорганізми активно залучені до процесів розкладання органічної речовини та трансформації складних субстратів, тому гостро реагують на порушення структури ґрунту, зміну доступності органічного матеріалу та накопичення важких металів. Водночас їх активне відновлення на 20м може бути пов'язане з адаптаційними процесами та надходженням додаткового органічного субстрату внаслідок руйнування рослинного покриву.

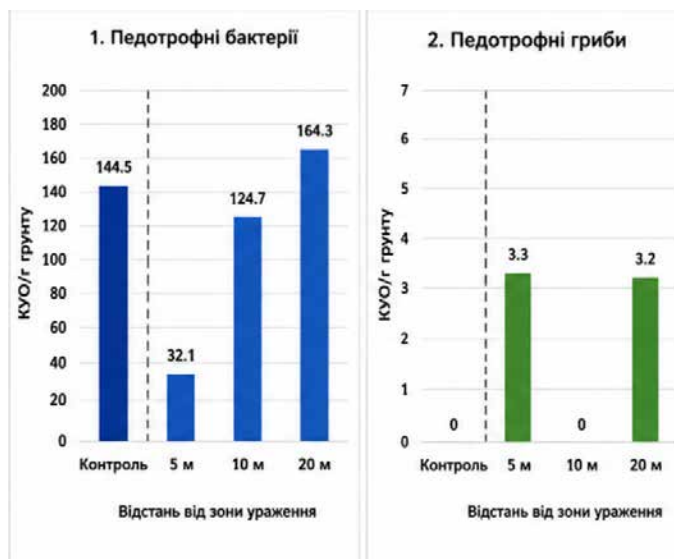


Рис 3.1. Зміна чисельності педотрофів в залежності від місця ушкодження ґрунту.

Азотфіксуючі бактерії виявилися однією з найбільш чутливих груп мікроорганізмів. Їх чисельність у контролі становила $10,8 \times 10^5$ КУО/г, тоді як на відстанях 5м та 10м показники різко знижувалися до $1,58 \times 10^5$ КУО/г та $1,48 \times 10^5$ КУО/г відповідно. Лише на 20м спостерігалось відновлення до $14,28 \times 10^5$ КУО/г. Їхня висока чутливість пов'язана із функціонуванням ферментного комплексу нітрогенази, який забезпечує біологічну фіксацію атмосферного азоту. Важкі метали, характерні для зон бойового впливу (Pb, Cd, Cu, Zn), здатні зв'язувати активні центри ферменту, пригнічуючи його роботу. Також негативний вплив

чинять оксидативний стрес, зміни кислотності середовища та порушення азотного циклу ґрунту.

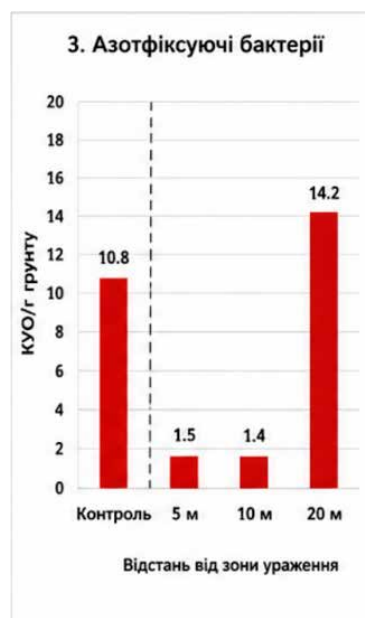


Рис 3.2. Зміна чисельності азотфіксаторів в залежності від місця ушкодження ґрунту.

Чисельність мікроскопічних грибів на середовищі Сабуро також показувала суттєві зміни. У контрольному ґрунті показник становив $60,58 \times 10^5$ КУО/г, на 5м – $40,78 \times 10^5$ КУО/г, на 10м – лише $12,38 \times 10^5$ КУО/г, після чого на 20м відбувалося відновлення до $51,78 \times 10^5$ КУО/г. Зниження кількості грибів може бути пов'язане з токсичною дією важких металів на міцелій та ферментативні системи мікроміцетів. Висока площа поверхні грибних гіф сприяє інтенсивному накопиченню токсикантів, що викликає інгібування росту, порушення мембранного транспорту та пригнічення синтезу ферментів.

В окремих чашках спостерігалось домінування міцеліальних форм над дріжджоподібними або компактними колоніями, що може свідчити про селективний вплив забруднення на структуру грибного комплексу ґрунту. Поява колоній із добре розвиненим повітряним міцелієм та змінами пігментації може бути пов'язана з адаптаційними механізмами мікроміцетів до токсичного навантаження, зокрема присутності важких металів, продуктів горіння та органічних забруднювачів. Отримані результати узгоджуються з літературними

даними щодо підвищеної стійкості окремих груп ґрунтових грибів до умов техногенно порушених середовищ.

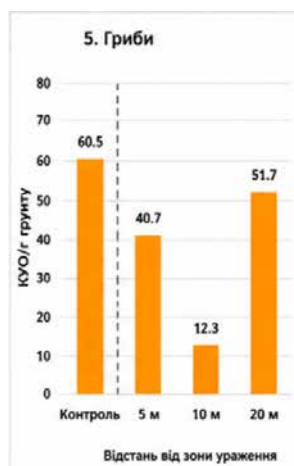


Рис 3.3. Зміна чисельності грибів в залежності від місця ушкодження ґрунту на середовищі Сабура.

Бактерії на МПА характеризувалися значним пригніченням у забруднених зразках. Якщо у контролі чисельність становила $124,28 \times 10^4$ КУО/г, то на 5м та 10м вона зменшувалася до $19,4 \times 10^4$ КУО/г та $13,9 \times 10^4$ КУО/г, відповідно. На 20м спостерігалася часткове відновлення до $84,8 \times 10^4$ КУО/г. Ця реакція є характерною для гетеротрофної мікрофлори, чутливої до порушення поживного режиму ґрунту, накопичення продуктів згоряння та токсичних металів. Зменшення чисельності цієї групи може свідчити про пригнічення загальної біологічної активності ґрунту.

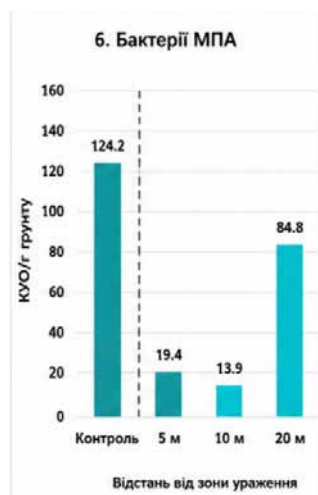


Рис 3.4. Зміна чисельності бактерій в залежності від місця ушкодження ґрунту на м'ясо-пептонному агарі.

Оліготрофи також демонстрували негативну реакцію на бойове забруднення. У контрольному варіанті їх чисельність становила $92,1 \times 10^4$ КУО/г, на 5м - $28,9 \times 10^4$ КУО/г, на 10м - $10,6 \times 10^4$ КУО/г, а на 20м - $56,7 \times 10^4$ КУО/г. Хоча вони пристосовані до існування в умовах низької забезпеченості поживними речовинами, вони мають менш розвинені системи детоксикації. Унаслідок цього навіть помірне накопичення токсичних металів може спричиняти суттєве пригнічення їх життєдіяльності.

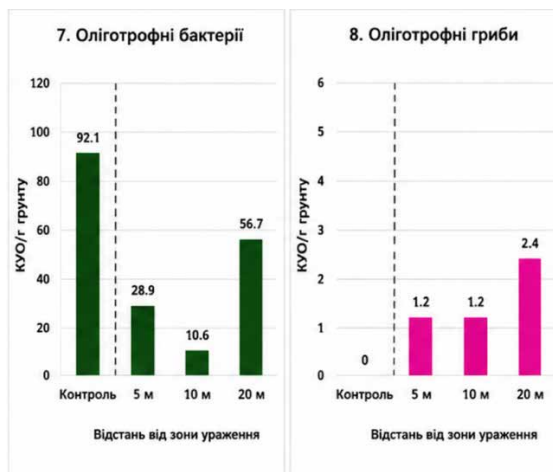


Рис 3.5. Зміна чисельності оліготрофів в залежності від місця ушкодження ґрунту.

Поведінка актиноміцетів є адаптивною в даному варіанті. У контрольному зразку чисельність актиноміцетних бактерій становила $17,5 \times 10^5$ КУО/г, тоді як на 5 м та 10 м вона зростала до $43,5 \times 10^5$ КУО/г та $38,3 \times 10^5$ КУО/г відповідно, а на 20 м досягала $120,6 \times 10^5$ КУО/г. Представники цієї групи характеризуються розвиненими механізмами детоксикації, здатні синтезувати антибіотичні сполуки, ефективно колонізують деградовані субстрати та розкладають складні органічні речовини. Їх інтенсивне зростання на більших відстанях може бути пов'язане зі зменшенням токсичного навантаження та появою великої кількості важкодоступної органічної речовини, що утворюється внаслідок бойових руйнувань.

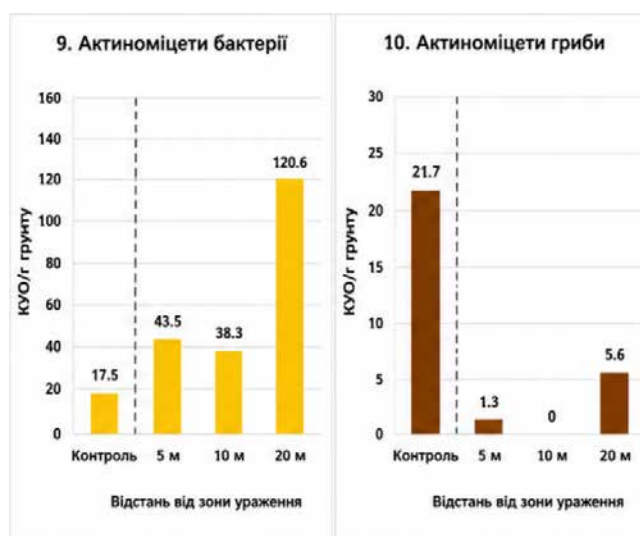


Рис 3.6. Зміна чисельності актиноміцетів в залежності від місця ушкодження ґрунту.

Зокрема крохмаль та продукти розкладу органічної речовини, як джерело живлення. Відомо, що актиноміцети відіграють важливу роль у процесах мінералізації органічних субстратів, трансформації складних полімерів та підтриманні біогеохімічних процесів у ґрунті. Їхня присутність у зразках із територій, уражених бойовими діями, може свідчити про формування стійких мікробних угруповань, здатних функціонувати в умовах підвищеного техногенного та хімічного навантаження.

Виявлені морфологічні особливості росту актиноміцетів можуть також вказувати на потенційну участь цієї групи мікроорганізмів у процесах природної біоремедіації забруднених ґрунтів, оскільки багато представників актиноміцетів характеризуються високою ферментативною активністю, здатністю синтезувати біологічно активні речовини та проявляти стійкість до токсичних компонентів середовища.

3.2. Морфологічна характеристика колоній мікроорганізмів на різних поживних середовищах.

У контрольних зразках - переважання рівномірно розподілених, морфологічно стабільних колоній із типовими ознаками ґрунтової мікрофлори (правильна округла форма, гладка або слабо зморшкувата поверхня, однорідна пігментація та відносно повільний ріст). Такі характеристики свідчать про збалансований стан мікробіоценозу та відсутність вираженого стресового впливу.

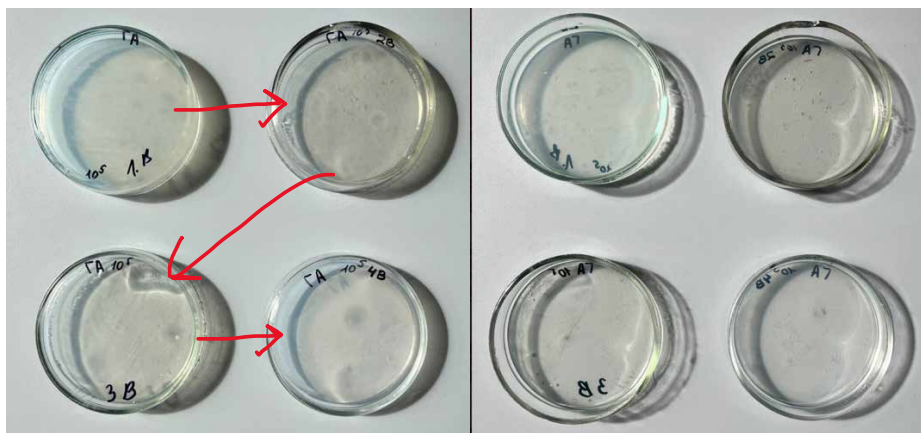


Рис 3.7. Ріст оліготрофів на середовищі Голодному агарі (ГА).

У зразках відібраних у зоні впливу бойових факторів, відмічено суттєве збільшення частки колоній із зміненою морфологією: неправильна форма, нерівні краї, підвищена зморшкуватість, зміна пігментації (від світлих до інтенсивно забарвлених форм), а також неоднорідність структури поверхні. Такі ознаки є типовими маркерами адаптаційних реакцій мікроорганізмів на токсичний стрес.

Є збільшення частки швидкорослих та конкурентно стійких форм, що здатні витримувати підвищені концентрації важких металів і продуктів вибухового забруднення. У чашках спостерігалися колонії з ознаками активного спороутворення, що є захисною реакцією бактерій (зокрема *Bacillus*-подібних форм) на несприятливі умови середовища. Спостерігали появу домінування морфотипів, характерних для актиноміцетів, які формували щільні, шкірясті або порошкоподібні колонії з вираженим субстратним міцелієм. Це свідчить про

підвищену екологічну пластичність та здатність до колонізації деградованих ґрунтів.



Рис 3.8. Ріст грибів на середовищі Сабуру.

На середовищі Сабуру спостерігався виражений ріст мікроміцетів, що відрізнявся залежно від дослідного варіанта. У контрольних зразках відзначалися численні колонії різної морфології: гладкі кремові, жовтуваті та пігментовані колонії округлої форми з рівними або слабо хвилястими краями. У дослідних зразках виявлявся активний розвиток пухкого повітряного міцелію білого та сіруватого кольору. Частина колоній характеризувалася ватоподібною структурою, концентричністю росту та нерівномірною пігментацією. У деяких чашках спостерігалось домінування міцеліальних форм, що може свідчити про адаптацію грибної мікрофлори до умов стресового або токсичного середовища (рис 3.8.).



Рис 3.9. Ріст бактерій на М'ясо-пептонному середовищі (МПА).

На середовищі МПА спостерігався розвиток бактеріальних колоній різної морфології та інтенсивності росту. Колонії були переважно округлої форми, гладкі, блискучі, кремового, білого та жовтуватого забарвлення. У контрольних зразках ріст характеризувався більшою різноманітністю морфотипів та вищою щільністю заселення чашок. У варіантах із дослідних ділянок відзначалося зниження чисельності колоній та менш виражена морфологічна різноманітність. Окремі колонії мали слизисту консистенцію та опуклий профіль, що є характерним для окремих ґрунтових бактеріальних форм (рис. 3.9.).

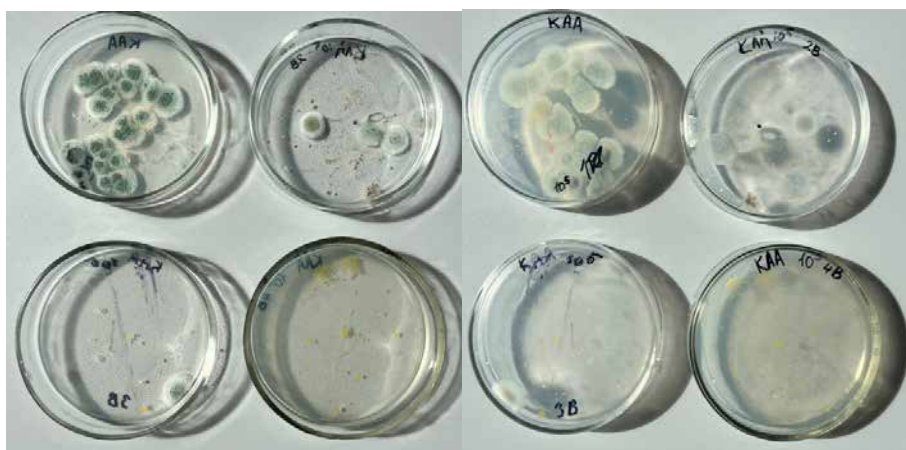


Рис 3.10. Ріст актиноміцетів на Крохмало-аміачному агарі (КАА).

На крохмало-аміачному агарі відзначався розвиток колоній актиноміцетів, які характеризувалися сухою, матовою або порошкоподібною поверхнею. Частина колоній мала променисту або концентричну структуру росту, світло-біле, кремове та сірувате забарвлення. У деяких зразках спостерігалось формування щільного міцелієподібного нальоту, характерного для представників актиноміцетної мікрофлори. Морфологія колоній свідчить про здатність даної групи активно розвиватися в умовах використання складних органічних субстратів та потенційно підвищеної стійкості до несприятливих умов середовища (рис. 3.10.).

На ґрунтовому агарі спостерігався розвиток педотрофної мікрофлори у вигляді дрібних і середніх колоній переважно білого, кремового та жовтуватого

кольору. Колонії були округлими, з гладкою або слабко зернистою поверхнею, окремі варіанти характеризувалися дифузним ростом по поверхні середовища. У контрольних зразках ріст був більш рівномірним та інтенсивним, тоді як у дослідних варіантах відзначалася варіабельність щільності колонізації та зміна морфологічної структури колоній. Отримані результати можуть свідчити про перебудову педотрофного комплексу ґрунтової мікробіоти під впливом забруднення, спричиненого бойовими діями (рис. 3.11.).

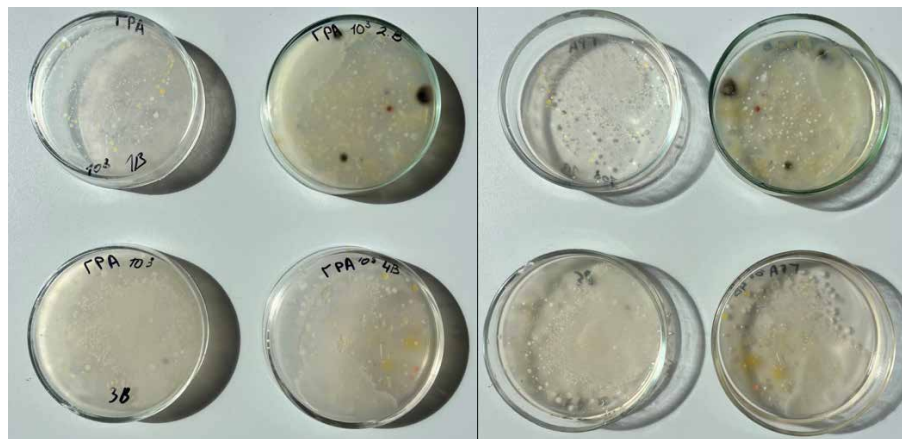


Рис 3.11. Ріст педотрофів на Ґрунтовому агарі (ҐрА).

Наявність педотрофної мікрофлори у всіх дослідних варіантах свідчить про збереження у ґрунті мікроорганізмів, здатних брати участь у процесах розкладу органічних речовин, трансформації складних субстратів та підтриманні біогеохімічних процесів. Водночас відмінності у щільності росту, чисельності та морфологічних характеристиках колоній між контрольними та дослідними зразками можуть вказувати на перебудову структури педотрофного комплексу під впливом забруднення, спричиненого бойовими діями.

Зміни характеру росту колоній, поява окремих домінуючих морфотипів або зниження морфологічного різноманіття можуть бути пов'язані з дією токсичних компонентів, зокрема важких металів, продуктів горіння, залишків вибухових речовин та інших ксенобіотиків, характерних для техногенно порушених територій. У таких умовах відбувається селекційний відбір більш стійких мікроорганізмів, здатних адаптуватися до підвищеного хімічного навантаження та дефіциту доступних поживних речовин.

Таблиця 3.2 - Морфологічна характеристика колоній мікроорганізмів на різних поживних середовищах.

Поживне середовище	Морфологія колоній	Ймовірні представники мікроорганізмів	Морфолого-біологічна характеристика	Екологічне значення / зв'язок із забрудненням
МПА	Жовті гладкі, округлі, блискучі , опуклі	<i>Micrococcus luteus</i> , <i>Staphylococcus spp.</i>	Колонії щільні, пігментовані, з рівними краями; грампозитивні коки	Свідчать про розвиток сапротрофної мікрофлори; підвищення чисельності може бути реакцією на органічне забруднення
	Кремові гладкі, середнього розміру	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus megaterium</i>	Спороутворюючі палички; часто утворюють матову поверхню	Висока стійкість до стресових факторів, характерна для забруднених ґрунтів
	Жовті зморшкуваті, сухі	<i>Bacillus spp.</i>	Шорстка поверхня через спороутворення та синтез екзополісахаридів	Маркер адаптації до токсичного впливу металів і продуктів горіння
Ешбі	Напівпрозорі, слизові, гладкі	<i>Azotobacter chroococcum</i>	Великі слизові колонії, округлі, блискучі	Азотфіксатори; зменшення чисельності свідчить про пригнічення

				біологічної фіксації азоту через забруднення
	Коричнюваті або темні слизові	Старі культури <i>Azotobacter</i>	Пігментація пов'язана зі старінням культури	Зниження активності вказує на порушення азотного циклу
Сабуро	Рожеві гладкі, блискучі	Дріжджоподібні гриби (<i>Rhodotorula spp.</i>)	Пігментовані колонії, гладкі, вологі	Можуть бути індикаторами змін органічного складу ґрунту
	Білі пухнасті	Плісняві гриби (<i>Penicillium, Aspergillus</i>)	Повітряний міцелій, спороношення	Активно реагують на техногенне навантаження
	Кремові гладкі	<i>Candida spp.</i>	Дріжджова морфологія	Поширюються при порушенні мікробного балансу
Голодний агар	Дуже дрібні, прозорі, плоскі	Оліготрофні бактерії	Повільний ріст, низька біомаса	Відображають природний стан ґрунту; їх зменшення свідчить про деградацію екосистеми

	Безбарвні матові	Автохтонна мікрофлора	Адаптована до дефіциту поживних речовин	Чутлива до нафтового та хімічного забруднення
Ґрунтовий агар	Світло-жовті, гладкі	Ґрунтові сапротрофи	Середня швидкість росту, типова ґрунтова морфологія	Відображають загальну біологічну активність ґрунту
	Шорсткі, нерівні, сухі	Актиноміцети	Формують розгалужений міцелій	Їх зниження характерне для деградації ґрунту внаслідок бойових дій
КАА	Великі матові, сухуваті	Амілолітичні <i>Bacillus spp.</i>	Продукують амілазу, часто зморшкуваті	Вказують на активність мінералізації органічних речовин
	Сірі, шорсткі, порошкоподібні	<i>Streptomyces spp.</i>	Променисті бактерії з міцеліальною структурою	Дуже важливі для гумусоутворення; чутливі до токсикантів військового походження

Фіторе mediaція у поєднанні з мікробною біоре mediaцією є одним з найбільш перспективних напрямків очищення ґрунтів [6, 7].

Рослини-гіперакумулятори разом із адаптованими мікроорганізмами здатні знижувати токсичність середовища шляхом накопичення, іммобілізації та трансформації токсичних сполук. Багато статей вказували що основними механізмами детоксикації є біоаккумуляція, біосорбція, біотрансформація та преципітація металів [9, 23].

ВИСНОВКИ

1. У ході проведених досліджень встановлено, що ґрунти, які зазнали впливу бойових дій, характеризуються значними мікробіологічними змінами, що негативно впливає на їх екологічний стан і функціональну активність.

2. Під час мікробіологічного дослідження виявили, що найбільш чутливими до токсичного навантаження є азотфіксуючі бактерії, амілолітичні мікроорганізми, оліготрофи та мікроскопічні гриби. Унаслідок цього відбувається зниження біогенності ґрунту та його загальної біологічної активності.

3. Спостерігали збільшення частки стійких форм мікроорганізмів, зокрема спорових бактерій і міцеліальних організмів, які проявляють вищу адаптаційну здатність до екстремальних умов середовища.

4. Окремі представники родів *Bacillus* та актиноміцети характеризуються підвищеною стійкістю до токсикантів. Ці мікроорганізми здатні здійснювати біосорбцію, біоаккумуляцію та трансформацію важких металів, завдяки чому можуть бути перспективними агентами біоремедіації деградованих ґрунтів.

5. Природне самовідновлення ґрунтів в умовах інтенсивного техногенного навантаження є недостатньо ефективним через високий рівень токсичності та зниження біорізноманіття мікробного ценозу. Перспективним використання комплексних біотехнологічних підходів, які поєднують застосування рослин, адаптованих автохтонних мікроорганізмів і методів покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту. Виділення та культивування резистентних штамів мікроорганізмів із забруднених територій може стати основою для створення ефективних селективних біопрепаратів для відновлення ґрунтів у післявоєнний період.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Деградація ґрунтів. *Latifundist.com*. 2023. URL: <https://latifundist.com/reportazhy/171-degradatsiya-gruntiv-yak-dolayut-problemu-v-agrokompaniyah-ta-yaki-ye-varianti-vidnovlennya-zdorovya-gruntiv-na-teritoriyah-shcho-postrazhdali-vnaslidok-voyennih-dij> (дата звернення: 08.04.2026).
2. Харченко О. Вплив військових дій на стан ґрунтів України. Вінниця: КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти», 2023, 5.
3. Галкін М. Б., Страшнова І. В., Андрющенко А. В. Використання мікроорганізмів у біоремедіації ґрунтів, забруднених внаслідок бойових дій. Одеса: ОНУ імені І. І. Мечникова, 2023.
4. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L. et al. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, no. 10. URL: <https://doi.org/10.3390/land13101614> (дата звернення: 05.04.2026).
5. Бобрик Н. Ю., Кривцова М. В., Ніколайчук В. І., Волощук І. Реакція мікробіоти ґрунту на дію важких металів у зоні впливу залізничного транспорту. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Біологія*. 2018. Вип. 44. С. 18–24.
6. Меліорація ґрунтів та рекультивація порушених земель. *LibreTexts*. URL: <https://ukrayinska.libretexts.org/> (дата звернення: 16.04.2026).
7. Як біотехнологи БТУ-ЦЕНТР розробляли способи відновлення ґрунтів, порушених воєнними діями. *Latifundist.com*. 2023. URL: <https://latifundist.com/blog/read/3060-shcho-kriyetsya-za-modnim-slovom-bioremediatsiya-abo-yak-biotehnologi-btu-tsentr-rozroblyali-sposobi-vidnovlennya-gruntiv-porushenih-voyennimi-diyami> (дата звернення: 10.04.2026).
8. Особливості міграції та акумуляції важких металів в системі ґрунт–рослина на прикладі заповідника «Зачарований край», Закарпаття. Ужгород: ДВНЗ «Ужгородський національний університет», 2022. URL:

<https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ae09f72a-b0da-4453-9f85-0ef4a4627ce9/content> (дата звернення: 16.04.2026).

9. Comprehensive heavy metal remediation mechanisms with insights into CRISPR-Cas9 and biochar innovations. *ResearchGate*. 2024. URL: DOI:10.1007/s10532-025-10165-x (дата звернення: 16.04.2026).

10. Інноваційні біоорганічні технології відновлення ґрунтів. Innovative Bioorganic Technologies for Soil Restoration. *ResearchGate*. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/391345120_Innovacijni_bioorganichni_tehnologii_vidnovlenna_gruntiv_Innovative_Bioorganic_Technologies_for_Soil_Restoration (дата звернення: 12.04.2026).

11. Якість ґрунту: цінність та типи ґрунтових бактерій [Електронний ресурс] // Agrotest. - Режим доступу: <https://agrotest.com/article/zdorov-ya-gruntu-tsinnist-ta-tipi-gruntovih-bakterij> (дата звернення: 12.05.2026).
ДСТУ ISO 10381-4:2005.

12. Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 4. Настанови щодо процедури дослідження природних, майже природних та оброблюваних ділянок (ISO 10381-4:2003, IDT) [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_1038.pdf (дата звернення: 12.05.2026).

13. Palchykov, V. A., Malaniia, M. M., Tymoshenko, K. I., & Brygadyrenko, V. V. Organic soil pollutants resulting from military activities. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. DOI: <https://doi.org/10.15421/012561>

14. Krainiuk, O. V., Buts, Y. V., Ponomarenko, R. V., Asotskyi, V. V., Darmofal, E. A., Kalynovskyi, A. Y., & Maniuk, V. V.. Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2025, 34, 304-317, <https://doi.org/10.15421/112526>

15. Datsko, O. M., Kovalenko, I. M., Melnyk, O. S., Bakumenko, O. M., & Yatsenko, V. M. (2025). Effect of military actions on the quality of forest soils: the content of heavy metals in the sites of detonation and burning of ammunition as a

factor of forest ecosystem degradation. Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Agronomy and Biology, 61(3), 75–81. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2025.3.9>

16. Samilyk, M., & Synenko, T. (2025). Assessment of the impact of military actions on the safety of soil and agricultural products. EUREKA: Life Sciences, (2), 60–67. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2025.003879>

17. Popsuy, A. O. (2025). Methodological basis for systematic analysis of military soil degradation. Man and Environment. Issues of Neoecology, (44), 108–119. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-08>

18. Kucher, A. (2025). Ukrainian black soils in war: assessing the impact of hostilities on violations of the guidelines for sustainable soil management. Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal, 11(2), 341–369. <https://doi.org/10.51599/are.2025.11.02.12>

19. Beddoe, N., & Rintoul-Hynes, N. (2026). Soil organisms in military-impacted environments: A systematic review of microbial community studies, contamination types, and methodological gaps. <https://doi.org/10.64898/2026.03.13.711562>

20. Кількісний облік мікроорганізмів шляхом підрахунку колоній [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/1582556/page:10/> (дата звернення: 23.05.2026).

21. Lawrence M. J., Stemberger H. L. J., Zolderdo A. J., Struthers D. P., Cooke S. J. The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment // Environmental Reviews. 2015. Vol. 23, № 4. P. 443–460 <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/er-2015-0039>

22. Solomon H., Birhane E. Environmental impacts and causes of conflict in the Horn of Africa: A review // Earth-Science Reviews. 2018. Vol. 177. P. 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.016>

23. Zhang Y., Liu J., Wang Y. Study on environmental pollution behavior/fate of ammunition soil and microbial remediation of TNT and its intermediates // Journal of Cleaner Production. 2024.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623038738?via%3Dihub>

24. Sens C., Scheidemann P., Werner D. Species dependent uptake and tolerance of nitroaromatic compounds by higher plants // *Journal of Plant Physiology*. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(98\)80139-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(98)80139-9)

25. Sharma B., Singh S., Siddiqi T. O. Heavy metal toxicity in earthworms and its environmental implications: A review // *Environmental Advances*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100374>

26. Dubois M., Rughöft S., Winding A. Right on target: using plants and microbes to remediate explosives // *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2019. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1606783>

27. Li J., Wang H., Zhao Y. Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130290>

28. Wang C., Liu D., Bai E. Understanding the effects of fire and nitrogen addition on soil respiration of a field study by combining observations with a meta-analysis // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108106>

29. Esteve-Núñez A., Caballero A., Ramos J. L. Biodegradation and biotransformation of explosives // *Current Opinion in Biotechnology*. 2011. Vol. 22, № 3. P. 347–352. DOI: 10.1016/j.copbio.2010.10.014

30. Pereira, P.; Zhao, W.; Symochko, L.; Inacio, M.; Bogunovic, I.; Barcelo, D. The Russian-Ukrainian Armed Conflict Will Push Back the Sustainable Development Goals. *Geogr. Sustain.* 2022, 3, 277–287 <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.09.003>

31. Pichtel, J. Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2012, 2012, . <https://doi.org/10.1155/2012/617236>