

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету захисту рослин,
біотехнологій та екології

_____ **Юлія КОЛОМІЄЦЬ**
(підпис)
« ____ » _____ 20__ р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри екобіотехнології
та біорізноманіття

_____ **Олена КВАСКО**
(підпис)
« ____ » _____ 20__ р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Використання консорціумів мікроорганізмів для відновлення родючості деградованих ґрунтів»

Спеціальність 162 Біотехнології та біоінженерія
Освітньо-професійна програма “Біотехнології та біоінженерія”

Гарант освітньої програми
Кандидат біологічних наук,
доцент

_____ **Олена КВАСКО**
(підпис)

Керівник
бакалаврської роботи
Кандидат біологічних наук,
доцент

_____ **Олена КВАСКО**
(підпис)

Виконав

_____ **Владислав ОСАУЛЕНКО**
(підпис)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
екобіотехнології
та біорізнноманіття

к.б.н., доцент _____ Олена КВАСКО

«____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Осауленку Владиславу Юрійовичу

Спеціальність 162 Біотехнології та біоінженерія

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: «Використання консорціумів мікроорганізмів для відновлення родючості деградованих ґрунтів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від “30” жовтня 2025 р. № 2596 “С”.

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15 травня 2025 року.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: зразки деградованого ґрунту, консорціуми ґрунтових мікроорганізмів, поживні середовища для культивування мікроорганізмів, методики визначення чисельності мікроорганізмів у ґрунті, визначення рН ґрунту та вмісту органічної речовини, методики оцінки впливу мікроорганізмів на показники родючості ґрунту.

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Дослідити вплив консорціумів мікроорганізмів на показники родючості деградованих ґрунтів.
2. Визначити чисельність ґрунтових мікроорганізмів у дослідних зразках.
3. Визначити зміни рН та вмісту органічної речовини ґрунту під впливом мікробних консорціумів.
4. Провести порівняльний аналіз отриманих результатів та встановити ефективність використання консорціумів мікроорганізмів для відновлення родючості деградованих ґрунтів.

Дата видачі завдання 3 листопада 2025 року

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи

Олена КВАСКО

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

Владислав ОСАУЛЕНКО

(підпис)

РЕФЕРАТ

Загальний обсяг роботи 47 сторінок, кількість таблиць - 3, додатків - 1, використаних джерел - 28.

Ключові слова: ДЕГРАДОВАНІ ҐРУНТИ, РОДЮЧІСТЬ ҐРУНТУ, МІКРОБНІ КОНСОРЦІУМИ, ҐРУНТОВІ МІКРООРГАНІЗМИ, *AZOTOBACTER*, *BACILLUS*, *PSEUDOMONAS*.

Метою даної роботи було дослідити вплив консорціумів мікроорганізмів на показники родючості деградованих ґрунтів та оцінити ефективність їх використання для відновлення ґрунтових властивостей.

Об'єктом дослідження є процес відновлення родючості деградованих ґрунтів за використання консорціумів мікроорганізмів.

Предметом дослідження є вплив консорціумів ґрунтових мікроорганізмів на агрохімічні та біологічні показники деградованих ґрунтів.

В роботі застосовано такі **методи дослідження** як біотехнологічні, мікробіологічні, а також статистичні.

Результати досліджень показали, що застосування консорціумів мікроорганізмів (*Azotobacter*, *Bacillus* та *Pseudomonas*) сприяє підвищенню біологічної активності деградованого ґрунту, збільшуючи чисельність ґрунтової мікробіоти у 1,7–2,3 рази порівняно з контролем. Використання мікробних консорціумів забезпечує покращення агрохімічних властивостей ґрунту, що проявляється у підвищенні рН до 6,1–6,5 та збільшенні вмісту органічної речовини до 3,0–3,4 %. Найбільшу ефективність продемонстрував комплексний консорціум (*Azotobacter*+*Bacillus*+*Pseudomonas*), який забезпечив найкращі показники родючості ґрунту та може бути рекомендований для біологічного відновлення деградованих земель.

Практична значущість роботи полягає в обґрунтуванні ефективності використання консорціумів ґрунтових мікроорганізмів для відновлення

родючості деградованих ґрунтів. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення біотехнологій рекультивації порушених земель, підвищення ґрунтової родючості та впровадження екологічно безпечних підходів у сільськогосподарське виробництво.

ABSTRACT

The total length of the paper is 47 pages; it contains 3 tables, 1 appendix, and references to 28 sources.

Keywords: DEGRADED SOILS, SOIL FERTILITY, MICROBIAL CONSORTIUMS, SOIL MICROORGANISMS, *AZOTOBACTER*, *BACILLUS*, *PSEUDOMONAS*.

The aim of this study was to investigate the effect of microbial consortia on the fertility indicators of degraded soils and to evaluate the effectiveness of their use for restoring soil properties.

The object of the study is the process of restoring the fertility of degraded soils using microbial consortia.

The subject of the study is the effect of soil microorganism consortia on the agrochemical and biological indicators of degraded soils.

The study employed biotechnological, microbiological, and statistical research methods.

Research results have shown that the use of microbial consortia (*Azotobacter*, *Bacillus*, and *Pseudomonas*) helps increase the biological activity of degraded soil, increasing the abundance of the soil microbiota by 1.7–2.3 times compared to the control. The use of microbial consortia improves the soil's agrochemical properties, as evidenced by an increase in pH to 6.1–6.5 and an increase in organic matter content to 3.0–3.4%. The most effective consortium was the complex one (*Azotobacter* + *Bacillus* + *Pseudomonas*), which yielded the best soil fertility indicators and can be recommended for the biological restoration of degraded lands.

The practical significance of this work lies in providing a scientific basis for the application of soil microorganism consortia as an effective tool for the restoration of degraded soils and the enhancement of their fertility. The results obtained demonstrate the potential of beneficial microbial communities to

improve soil physicochemical and biological properties, stimulate nutrient availability, enhance soil enzymatic activity, and support the establishment and growth of plants under unfavorable environmental conditions. The developed microbial consortia may be utilized in the reclamation of disturbed lands, including areas affected by erosion, industrial pollution, mining activities, and military impacts. The findings can be incorporated into the development of sustainable agricultural practices and environmentally safe biotechnologies aimed at reducing the use of synthetic agrochemicals, improving soil health, and increasing agricultural productivity. Moreover, the proposed approaches contribute to the restoration of ecosystem services, maintenance of soil biodiversity, and long-term ecological sustainability, thereby supporting the implementation of nature-based solutions for land management and environmental protection.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	14
1.1. Причини деградації ґрунтів та їх вплив на родючість.	14
1.2. Роль мікроорганізмів у підтриманні родючості ґрунтів	20
1.3. Характеристика консорціумів ґрунтових мікроорганізмів.	23
1.4. Використання мікроорганізмів для відновлення деградованих ґрунтів	25
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ	30
2.1. Об'єкт та предмет дослідження	30
2.2. Відбір та підготовка зразків ґрунту	30
2.3. Культивування консорціумів мікроорганізмів	31
2.4. Визначення чисельності ґрунтових мікроорганізмів	32
2.5. Визначення рН та вмісту органічної речовини ґрунту	33
2.6. Статистична обробка результатів	34
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ	35
3.1. Вплив консорціумів мікроорганізмів на показники родючості деградованих ґрунтів	35
3.2. Аналіз чисельності ґрунтових мікроорганізмів	36
3.3. Зміни рН та вмісту органічної речовини ґрунту під впливом мікробних консорціумів	38
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44

ВСТУП

На сьогодні забруднення та деградація ґрунтів є однією з найбільш актуальних екологічних та аграрних проблем. Інтенсивне сільськогосподарське використання земель, ерозійні процеси, забруднення ґрунтів, надмірне застосування мінеральних добрив і пестицидів, тривалі військові дії призводять до зниження родючості, погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунту та порушення його мікробіологічної активності. За сучасних умов особливого значення набуває пошук екологічно безпечних методів відновлення деградованих ґрунтів та підтримання їх продуктивності.

Важливу роль у забезпеченні родючості ґрунту відіграють ґрунтові мікроорганізми, які беруть участь у процесах мінералізації органічних речовин, кругообігу елементів живлення, гумусоутворенні та підтриманні стабільності ґрунтових екосистем. Зниження чисельності та активності ґрунтової мікробіоти є одним із основних наслідків деградації ґрунтів. Тому використання консорціумів корисних мікроорганізмів розглядається як перспективний напрям біологічного відновлення ґрунтів [1].

Застосування мікробних консорціумів сприяє покращенню агрохімічних показників ґрунту, підвищенню вмісту органічної речовини та активізації ґрунтових біологічних процесів. Особливу увагу приділяють бактеріям родів *Azotobacter*, *Bacillus* та *Pseudomonas*, які мають азотфіксувальні, фосфатмобілізуючі та целюлозоруйнівні властивості. Комплексне використання таких мікроорганізмів забезпечує синергічний ефект та підвищує ефективність біоремедіації деградованих ґрунтів. Зміна фізико-хімічних властивостей ґрунту порушує структуру мікробних угруповань та пов'язані з ними екологічні функції. Однак навіть після значних порушень частина мікроорганізмів зберігається та відіграє важливу роль у процесах відновлення ґрунту. Бактерії забезпечують

розкладання органічних речовин і кругообіг поживних елементів, гриби беруть участь у деструкції складних органічних сполук та формують симбіотичні зв'язки з рослинами, а археї є важливими учасниками азотного циклу. Таким чином, ґрунтові мікроорганізми становлять основу природних процесів відновлення порушених територій. Тому вивчення їх функціональної ролі, структури угруповань та реакції на заходи рекультивації є важливим напрямом сучасних досліджень, спрямованих на розробку ефективних біотехнологій відновлення земель.

Відновлення якості деградованих ґрунтів може здійснюватися за допомогою фізичних, хімічних та біологічних методів. Для подолання несприятливих абіотичних факторів часто застосовують різноманітні меліоранти та механічні заходи, спрямовані на покращення структури ґрунту, його водного режиму та агрохімічних властивостей. Такі заходи не лише покращують фізико-хімічний стан ґрунту, але й створюють сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і рослин.

З метою зменшення витрат на рекультивацію та раціонального використання відходів дедалі ширше використовують нетоксичні побічні продукти промисловості та органічні відходи. До таких матеріалів належать деревні залишки, подрібнені гірські породи, вугільні відвали, зола-виносу, осади стічних вод, компости, солома та біочар. Ці матеріали містять значну кількість органічної речовини та поживних елементів, що сприяє підвищенню родючості ґрунту, покращенню мікрокліматичних умов і створенню додаткового субстрату для росту рослин та розвитку ґрунтових мікроорганізмів.

Поряд із органічними меліорантами широко застосовуються мінеральні та неорганічні добавки. До них належать мінеральні добрива, нейтралізуючі реагенти та окиснювачі, які використовують для коригування кислотності ґрунту та підвищення його забезпеченості елементами живлення. Наприклад, залишки після очищення питної води

завдяки здатності зв'язувати метали та нейтралізувати кислотність можуть ефективно використовуватися для відновлення ґрунтів, забруднених кислотним шахтним дренажем. Водночас застосування відходів вуглевидобувної промисловості та продуктів спалювання вугілля, зокрема золи-виносу, залишається дискусійним питанням, оскільки вони можуть містити підвищені концентрації важких металів та інших потенційно небезпечних елементів.

Фізичні та хімічні методи створюють сприятливі умови для формування рослинного покриву, проте важливу роль у процесах рекультивації відіграють і біологічні методи. Особливий інтерес становлять бобові рослини, які здатні накопичувати азот завдяки симбіозу з азотфіксувальними бактеріями. Встановлено, що вони сприяють підвищенню родючості ґрунту, накопиченню органічного вуглецю та азоту вже на початкових етапах рекультивації. Завдяки цьому бобові культури часто використовують як рослини-піонери для освоєння порушених територій або як так звані «рослини-няньки», які покращують фізико-хімічні властивості ґрунту та створюють умови для подальшого розвитку чагарникової та деревної рослинності.

Загалом відновлення рослинного покриву є одним із найбільш економічно доцільних і поширених способів рекультивації земель, порушених унаслідок видобутку корисних копалин. Численні дослідження підтверджують, що тривале відновлення рослинності сприяє покращенню функціонального стану ґрунту, підвищенню його родючості та збільшенню різноманіття ґрунтових мікроорганізмів.

Водночас успішна рекультивація деградованих земель залежить не лише від формування рослинного покриву, а й від відновлення ґрунтових мікробних угруповань. Саме мікроорганізми забезпечують мінералізацію органічних речовин, кругообіг поживних елементів, гумусоутворення та підтримання стабільності ґрунтової екосистеми. Тому сучасні програми

рекультивації зазвичай поєднують фізичні, хімічні та біологічні методи відновлення, що дозволяє скоротити тривалість сукцесійних процесів, прискорити відновлення ґрунтових функцій і забезпечити формування стійких мікробних угруповань. Це особливо актуально для деградованих земель, де використання консорціумів корисних мікроорганізмів розглядається як перспективний підхід до підвищення родючості та відновлення екологічної рівноваги ґрунтових екосистем [2].

Дослідження останніх років показують, що мікроорганізми здатні не лише покращувати агрохімічні властивості ґрунту, але й відновлювати його біологічну активність після техногенного навантаження та забруднення. Застосування біостимуляції та біоаугментації дозволяє підвищити активність природної мікробіоти, покращити структуру ґрунту та прискорити процеси його відновлення [3].

Актуальність даної роботи полягає у необхідності розробки екологічно безпечних методів відновлення деградованих ґрунтів із використанням консорціумів мікроорганізмів, здатних покращувати їх біологічні та агрохімічні властивості.

Враховуючи вище зазначене, **метою даної роботи** було дослідити вплив консорціумів мікроорганізмів на показники родючості деградованих ґрунтів та оцінити ефективність їх використання для відновлення ґрунтових властивостей.

Згідно поставленої мети було сформульовано наступні **завдання**:

1. Дослідити вплив консорціумів мікроорганізмів на показники родючості деградованих ґрунтів.
2. Визначити чисельність ґрунтових мікроорганізмів у дослідних зразках.
3. Визначити зміни рН та вмісту органічної речовини ґрунту під впливом мікробних консорціумів.

4. Провести порівняльний аналіз отриманих результатів та встановити ефективність використання консорціумів мікроорганізмів для відновлення родючості деградованих ґрунтів.

Об'єктом дослідження є процес відновлення родючості деградованих ґрунтів за використання консорціумів мікроорганізмів.

Предметом дослідження є вплив консорціумів ґрунтових мікроорганізмів на агрохімічні та біологічні показники деградованих ґрунтів.

В роботі застосовано такі методи дослідження як біотехнологічні, мікробіологічні, а також статистичні.

Практична значущість даної роботи полягає у вдослідженні можливості використання консорціумів мікроорганізмів для покращення агрохімічних та біологічних показників деградованих ґрунтів, що може бути використано у технологіях відновлення родючості ґрунтів та екологізації сільського господарства.

Робота виконувалась на кафедрі екобіотехнології та біорізноманіття факультету захисту рослин, біотехнологій та екології Національного університету біоресурсів і природокористування України.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Причини деградації ґрунтів та їх вплив на родючість

Деградація ґрунтів є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності, що безпосередньо впливає на продуктивність агроєкосистем та продовольчу безпеку. За даними сучасних досліджень, основними причинами деградації ґрунтів є інтенсивне сільськогосподарське використання земель, водна та вітрова ерозія, забруднення хімічними речовинами, ущільнення ґрунту, зниження вмісту органічної речовини та порушення структури ґрунтового мікробіому [4].

Одним із головних чинників деградації є ерозійні процеси, які призводять до втрати верхнього родючого шару ґрунту. Внаслідок ерозії зменшується вміст гумусу, погіршується структура ґрунту та знижується його здатність утримувати вологу й поживні речовини. Особливо інтенсивно ерозійні процеси розвиваються за умов надмірного обробітку ґрунту, відсутності рослинного покриву та порушення сівозмін [5].

Важливим фактором деградації ґрунтів є також надмірне застосування мінеральних добрив і пестицидів. Тривале використання агрохімікатів спричиняє порушення природного балансу ґрунтової мікробіоти, накопичення токсичних речовин та зниження біологічної активності ґрунту. Сучасні дослідження підтверджують, що інтенсивна хімізація сільського господарства негативно впливає на різноманіття та функціональну активність ґрунтових мікроорганізмів.

Суттєвим чинником деградації ґрунтів в Україні в останні роки стали військові дії, які призводять до масштабного порушення структури та функціонування ґрунтових екосистем. Внаслідок бойових дій відбувається механічне руйнування ґрунтового покриву через вибухи боєприпасів, переміщення важкої техніки, утворення вирв та ущільнення ґрунту. Такі

процеси спричиняють руйнування структури ґрунту, зниження його водопроникності та погіршення аерації.

Додатковою проблемою є хімічне забруднення ґрунтів залишками вибухових речовин, важкими металами, паливно-мастильними матеріалами та продуктами горіння. Накопичення токсичних сполук негативно впливає на ґрунтову мікробіоту, знижує біологічну активність ґрунту та порушує процеси кругообігу поживних елементів. За даними сучасних досліджень, на територіях, що зазнали військового впливу, спостерігається зменшення чисельності корисних ґрунтових мікроорганізмів, зниження вмісту органічної речовини та погіршення агрохімічних показників ґрунту.

Військові дії є одним із суттєвих чинників деградації ґрунтів, оскільки призводять до руйнування рослинного покриву та порушення природного функціонування екосистем. Знищення рослинності спричиняє активізацію процесів водної та вітрової ерозії, що супроводжується втратою родючого верхнього шару ґрунту, погіршенням його фізико-хімічних властивостей та зниженням продуктивності земель.

Дослідження впливу військових дій на агрохімічний і екологічний стан ґрунтів на ділянках, забруднені внаслідок вибухів та горіння військової техніки, зокрема танків Т-72В3, Т-80 та важкої вогнеметної системи ТОС-1 «Солнцепьок», показали значні зміни агрохімічних показників ґрунту в місцях ураження. Зокрема, було встановлено підвищення вмісту органічного вуглецю та гумусу порівняно з фоновими значеннями. Найвищі показники спостерігалися на ділянках, що зазнали впливу ТОС-1 «Солнцепьок», де вміст органічної речовини досягав 8,28 %. Крім того, автори виявили істотне накопичення рухомих форм сірки, концентрація яких перевищувала контрольні значення у 16,5–65 разів.

Такі зміни пов'язані з надходженням до ґрунту продуктів згоряння пального, мастильних матеріалів, вибухових речовин та металевих компонентів військової техніки. Накопичення цих сполук може призводити

до порушення мікробіологічної активності ґрунту, зміни біогеохімічних циклів та погіршення умов для розвитку рослин. Отримані результати підтверджують необхідність розроблення ефективних технологій рекультивації та біологічного відновлення ґрунтів, пошкоджених унаслідок воєнних дій.

Дослідження важких металів показало значне перевищення гранично допустимих концентрацій. У ґрунтах поблизу уламків танка Т-72В3 вміст свинцю перевищував норму у 38,9 раза, кадмію - у 8,5 раза, цинку - у 7,4 раза, а міді - у 4 рази. Найвищий рівень забруднення спостерігався саме для Pb, Zn та Cd.

Внаслідок вибухів відбуваються суттєві зміни співвідношення механічних фракцій: частка піщаних частинок збільшувалася у 1,2–1,8 раза, тоді як вміст глинистої фракції зменшувався. Такі зміни пов'язують із надходженням до ґрунту паливно-мастильних матеріалів та продуктів горіння, які сприяють агрегації й цементації ґрунтових частинок, що негативно впливає на його структуру та водно-фізичні властивості.

Вибухи боєприпасів та процеси піролізу органічних речовин спричиняють суттєву перебудову мікробних угруповань. Зокрема, чисельність амоніфікувальних бактерій у забруднених ґрунтах зростала в середньому у 10,3 рази порівняно з контрольними ділянками. Це може свідчити про адаптацію окремих груп мікроорганізмів до екстремальних умов середовища та активізацію процесів розкладання органічних сполук. Разом з тим, також може бути скорочення чисельності мікроорганізмів, які використовують мінеральні форми азоту, особливо в безпосередній близькості до епіцентру вибуху. Такі зміни пояснюються погіршенням фізико-хімічних властивостей ґрунту та накопиченням токсичних сполук, що негативно впливають на розвиток чутливих представників ґрунтової мікробіоти.

Крім того, може відмічатись значне зростання чисельності мікроскопічних грибів. У зоні найбільшого впливу вибуху їх кількість може сягати 206,3 тис. КУО/г ґрунту, тоді як на контрольних ділянках цей показник становив лише 5,6–10,3 тис. КУО/г. Подібна тенденція може свідчити про підвищення ролі грибного компоненту мікробіоценозу в умовах техногенного стресу та забруднення.

Незважаючи на загальне збільшення чисельності окремих груп мікроорганізмів, є дані, що підтверджують істотне зниження біорізноманіття ґрунтових мікробних угруповань. Значення індексу Шеннона в забруднених ґрунтах становило лише 1,9–2,5, тоді як у природних екосистемах цей показник може сягати 5,45. Отримані результати свідчать про спрощення структури мікробіому, зменшення видового різноманіття та домінування окремих стійких до забруднення таксонів.

Важливим результатом дослідження стало встановлення високого рівня фітотоксичності ґрунтів, пошкоджених унаслідок вибухів. У межах 1,5 м від епіцентру вибуху було зафіксовано повну (100 %) токсичність ґрунту для рослин. Навіть через шість місяців після вибуху на відстані 1,6–4,5 м від осередку ураження рівень фітотоксичності залишався надзвичайно високим і становив 81,5–96,2 %. Лише на ділянках, розташованих на відстані понад 5 м від епіцентру, спостерігалися ознаки поступового відновлення рослинного покриву та зниження токсичного впливу ґрунту на рослини.

Отже, військові дії спричиняють комплексні зміни фізичних, хімічних і біологічних властивостей ґрунту, які можуть зберігатися протягом тривалого часу. Це підкреслює необхідність розроблення ефективних технологій рекультивації та біологічного відновлення ґрунтів, зокрема із застосуванням консорціумів корисних мікроорганізмів, здатних

прискорювати відновлення мікробіологічної активності та родючості порушених земель.

Отже, військові дії спричиняють комплексну деградацію ґрунтів, яка охоплює фізичні, хімічні та біологічні порушення. Для відновлення таких територій необхідний комплексний підхід, що включає екологічний моніторинг, очищення ґрунтів від токсичних речовин, застосування біоре mediaції та використання консорціумів мікроорганізмів для відновлення біологічної активності ґрунту [6].

Існує також проблема хімічної деградації ґрунтів, спричиненої військовими діями. Дослідження ґрунтів із зони бойових дій у Сумській області України, які зазнали впливу вибухів боєприпасів та військової техніки, показали, що військові дії спричиняють комплексну деградацію ґрунтів: механічну, фізичну, хімічну, фізико-хімічну та біологічну. Вибухи боєприпасів призводять до руйнування структури ґрунту, утворення вирв, посилення ерозії та зменшення запасів гумусу й органічного карбону. Ударна хвиля вибуху руйнує силікатні мінерали та сприяє винесенню дрібнодисперсних частинок із поверхневого шару ґрунту. Основну увагу приділяється в таких дослідженнях оцінці забруднення важкими металами та вибуховими речовинами, зокрема гексогеном, а також можливостям біоре mediaції таких ґрунтів.

Аналіз вмісту важких металів у ґрунті на різній відстані від епіцентру вибуху показує перевищення гранично допустимих концентрацій для Cr, Sr, Cu, Zn та Mn. Найбільший екологічний ризик, за результатами оцінки, створювали мідь і хром. Розподіл екологічного ризику для важких металів має вигляд: $Cu > Cr > Sr > Zn > Mn$. Автори підкреслюють, що рівень ризику залежить не лише від концентрації металів, а й від їх токсичності та здатності до накопичення у ґрунті.

Особлива увага приділяється забрудненню ґрунтів вибуховими речовинами. У зразках виявляють залишки гексогену у концентраціях від

1,38 до 2,34 мг/кг ґрунту. Гексоген характеризується високою токсичністю та здатністю переходити з ґрунту до рослин. За наведеними даними, 75–95 % гексогену може накопичуватися у рослинній масі, що створює ризик потрапляння токсичних речовин у харчові ланцюги.

На сьогодні сучасними методами очищення ґрунтів, забруднених вибуховими речовинами та важкими металами, вважаються фізичні, хімічні та біологічні технології ремедіації. Серед хімічних методів описано використання модифікованої реакції Фентона та кальцій пероксиду (CaO_2) для деградації гексогену. Однак зазначається, що хімічні методи можуть спричиняти вторинне забруднення та утворення токсичних побічних продуктів.

Найбільш перспективним напрямом вважають біоремедіацію. Зокрема, бактерії родин *Sphingomonadaceae*, *Actinobacteriota*, а також родів *Pseudomonas*, *Rhodanobacter* і *Granulicella* показують високу ефективність у деградації таких токсичних речовин як гексоген. Встановлено, що бактерії *Klebsiella asachharohila* здатні видаляти до 75,7 % гексогену із забрудненого середовища протягом 240 годин.

Перспективним є використання консорціумів мікроорганізмів у поєднанні з фіторемедіацією. Застосування біопрепаратів та рослин-ремедіаторів сприяє підвищенню біологічної активності ґрунту, прискорює детоксикацію забруднювачів та покращує фізико-хімічні властивості ґрунту. Додатково розглядається використання біочару як сорбенту для іммобілізації важких металів та вибухових речовин.

Одним із найважливіших показників деградації ґрунту є зменшення вмісту органічної речовини. Органічна речовина відіграє ключову роль у формуванні структури ґрунту, забезпеченні рослин елементами живлення та підтриманні активності ґрунтової мікробіоти. Зниження вмісту гумусу призводить до погіршення водно-фізичних властивостей ґрунту, зменшення його буферної здатності та втрати родючості [8].

Суттєвий вплив на стан ґрунтів має деградація ґрунтового мікробіому. Ґрунтові мікроорганізми забезпечують процеси мінералізації органічних речовин, фіксації азоту, мобілізації фосфору та підтримання кругообігу поживних елементів. Порушення структури мікробних угруповань призводить до зниження біологічної активності ґрунту та погіршення його екологічних функцій [4].

За сучасними оцінками, значна частина світових земель уже зазнала різних форм деградації. За даними міжнародних організацій, близько 75 % земель світу мають ознаки деградації, а до 2050 року цей показник може зрости до 90 %. Це створює серйозну загрозу для сільського господарства, біорізноманіття та стабільності екосистем.

У зв'язку з цим особливого значення набуває розробка екологічно безпечних методів відновлення родючості ґрунтів. Одним із перспективних напрямів є використання консорціумів корисних мікроорганізмів, здатних активізувати ґрунтові біологічні процеси, покращувати структуру ґрунту та сприяти відновленню його агрохімічних властивостей [9].

Отже, надзвичайно важливо розробляти комплексні підходи до відновлення земель, деградованих унаслідок військових дій, зокрема схема рекультивації повинна включати розмінування територій, очищення ґрунту, інженерне відновлення ландшафтів, фіторе mediaцію, біологічне відновлення екосистем та подальший екологічний моніторинг [7].

1.2. Роль мікроорганізмів у підтриманні родючості ґрунтів

Мікроорганізми є невід'ємним компонентом ґрунтових екосистем і відіграють ключову роль у підтриманні родючості ґрунтів. Вони забезпечують перебіг основних біогеохімічних процесів, беруть участь у кругообігу поживних елементів, формуванні структури ґрунту, розкладанні органічних решток та утворенні гумусу. Саме мікробіологічна активність

значною мірою визначає здатність ґрунту забезпечувати рослини доступними формами поживних речовин та підтримувати стабільність агроєкосистем. Згідно із сучасними дослідженнями, ґрунтовий мікробіом є одним із найважливіших факторів, що визначають продуктивність і стійкість ґрунтових екосистем до антропогенних навантажень [10].

Однією з найважливіших функцій ґрунтових мікроорганізмів є участь у процесах трансформації органічної речовини. Бактерії, актиноміцети та мікроскопічні гриби розкладають рослинні та тваринні рештки до простих сполук, які можуть бути використані рослинами як джерело живлення. У процесі мінералізації органічних речовин відбувається вивільнення азоту, фосфору, сірки та інших елементів, необхідних для росту рослин. Одночасно частина органічних сполук перетворюється на гумус, що є основою родючості ґрунту та забезпечує його водоутримувальну здатність і структурну стабільність [11].

Особливе значення мають азотфіксувальні мікроорганізми, здатні засвоювати атмосферний азот і переводити його у форми, доступні для рослин. До таких бактерій належать представники родів *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium* та *Bradyrhizobium*. За оцінками дослідників, біологічна фіксація азоту забезпечує надходження до ґрунту від 50 до 200 кг азоту на гектар щорічно, що дозволяє зменшити використання мінеральних азотних добрив та знизити антропогенне навантаження на довкілля [12].

Важливу роль у підвищенні родючості ґрунту відіграють фосфатмобілізувальні бактерії. Значна частина фосфору в ґрунті перебуває у важкодоступних для рослин формах. Бактерії родів *Pseudomonas*, *Bacillus* та *Enterobacter* здатні синтезувати органічні кислоти й ферменти, які переводять нерозчинні фосфати у доступні форми. Унаслідок цього покращується фосфорне живлення рослин і підвищується їх продуктивність [13].

Не менш важливою є роль мікроорганізмів у формуванні структури ґрунту. У процесі життєдіяльності бактерії та гриби виділяють полісахариди, білки та інші біополімери, які сприяють агрегації ґрунтових частинок. Завдяки цьому утворюються водостійкі агрегати, що покращують водно-повітряний режим ґрунту, підвищують його стійкість до ерозії та сприяють накопиченню органічної речовини. Особливо важливу роль у формуванні стабільної структури ґрунту відіграють арбускулярні мікоризні гриби, які продукують білок гломалін, що бере участь у цементації ґрунтових агрегатів [14].

Сучасні дослідження також свідчать про важливу роль мікроорганізмів у захисті рослин від фітопатогенів. Представники родів *Bacillus*, *Pseudomonas* та *Streptomyces* здатні продукувати антибіотичні речовини, ферменти та інші метаболіти, які пригнічують розвиток патогенних мікроорганізмів. Крім того, вони стимулюють ріст рослин шляхом синтезу фітогормонів, зокрема індоліл-3-оцтової кислоти, гіберелінів та цитокінінів, що сприяє підвищенню врожайності сільськогосподарських культур [15].

В умовах деградації ґрунтів роль мікроорганізмів набуває особливого значення. Втрата біорізноманіття ґрунтової мікробіоти призводить до зниження інтенсивності біогеохімічних процесів, погіршення структури ґрунту та зменшення його родючості. Саме тому одним із перспективних напрямів відновлення деградованих земель є застосування мікробних препаратів і консорціумів корисних мікроорганізмів. Використання таких біопрепаратів сприяє відновленню чисельності та функціональної активності ґрунтової мікробіоти, покращенню агрохімічних властивостей ґрунту та підвищенню продуктивності агроценозів [16].

Таким чином, ґрунтові мікроорганізми виконують комплекс життєво важливих функцій, що забезпечують підтримання та відновлення родючості ґрунтів. Їх участь у процесах мінералізації органічної речовини,

азотфіксації, мобілізації фосфору, структуроутворенні та біологічному захисті рослин визначає ключову роль мікробіому у функціонуванні сучасних агроєкосистем.

1.3. Характеристика консорціумів ґрунтових мікроорганізмів

Консорціуми ґрунтових мікроорганізмів являють собою стійкі асоціації різних видів мікроорганізмів, які взаємодіють між собою та спільно виконують певні функції у ґрунтовій екосистемі. На відміну від монокультур, мікробні консорціуми характеризуються вищою стабільністю, адаптивністю до несприятливих умов середовища та ефективністю у процесах трансформації органічних речовин і відновлення родючості ґрунтів. Завдяки синергічній взаємодії окремих компонентів консорціуму забезпечується комплексний вплив на фізичні, хімічні та біологічні властивості ґрунту [16].

Основу більшості біопрепаратів для відновлення родючості ґрунтів становлять бактерії родів *Azotobacter*, *Bacillus* та *Pseudomonas*. Представники роду *Azotobacter* належать до вільноживучих азотфіксувальних бактерій, здатних засвоювати атмосферний азот і переводити його у форми, доступні для рослин. Крім того, вони синтезують біологічно активні речовини, зокрема ауксини, гібереліни та вітаміни, які стимулюють ріст кореневої системи рослин. За даними сучасних досліджень, використання *Azotobacter* сприяє підвищенню доступності азоту в ґрунті та покращенню його мікробіологічної активності [17].

Бактерії роду *Bacillus* є одними з найбільш поширених представників ґрунтової мікробіоти. Їхньою важливою особливістю є здатність утворювати ендоспори, що забезпечує високу стійкість до несприятливих умов навколишнього середовища. Представники цього роду продукують

широкий спектр ферментів (амілази, целюлази, протеази), які беруть участь у розкладанні органічних речовин та мінералізації рослинних залишків. Крім того, багато штамів *Bacillus* характеризуються фосфатмобілізувальною активністю та здатністю пригнічувати розвиток фітопатогенних мікроорганізмів завдяки синтезу антибіотиків і бактеріоцинів [18].

Представники роду *Pseudomonas* відіграють важливу роль у мобілізації поживних елементів та біологічному захисті рослин. Ці бактерії здатні синтезувати органічні кислоти, які переводять нерозчинні фосфати у доступні для рослин форми. Крім того, *Pseudomonas* продукують сидерофори - низькомолекулярні сполуки, що зв'язують залізо та підвищують його доступність для рослин. Багато штамів цього роду характеризуються високою антагоністичною активністю щодо фітопатогенних грибів і бактерій, що робить їх важливими компонентами біопрепаратів для сталого землеробства [13].

Синергічний ефект консорціумів проявляється у взаємодоповнюваності функцій окремих мікроорганізмів. Наприклад, *Azotobacter* забезпечує накопичення біологічного азоту, *Bacillus* прискорює розкладання органічних решток та гумусоутворення, а *Pseudomonas* покращує фосфорне живлення рослин і пригнічує розвиток патогенів. У результаті підвищується біологічна активність ґрунту, покращується його структура та збільшується вміст доступних елементів живлення. Саме тому консорціуми демонструють вищу ефективність порівняно з використанням окремих штамів мікроорганізмів [19].

Останніми роками значна увага приділяється застосуванню мікробних консорціумів для біоремедіації деградованих і забруднених ґрунтів. Доведено, що комплексні мікробні асоціації здатні прискорювати розкладання органічних забруднювачів, знижувати токсичність важких металів та відновлювати біологічну активність ґрунтів після техногенного

впливу. Завдяки широкому спектру метаболічних можливостей консорціуми мікроорганізмів є перспективним інструментом екологічно безпечного відновлення родючості ґрунтів та забезпечення сталого розвитку аграрного виробництва [16].

Таким чином, консорціуми ґрунтових мікроорганізмів являють собою ефективні біологічні системи, які забезпечують комплексний вплив на ґрунтові процеси. Поєднання азотфіксувальних, фосфатмобілізувальних та целюлозоруйнівних бактерій сприяє покращенню агрохімічних властивостей ґрунту, підвищенню його біологічної активності та відновленню родючості деградованих земель.

1.4. Використання мікроорганізмів для відновлення деградованих ґрунтів

Відновлення деградованих ґрунтів є одним із пріоритетних напрямів сучасного сільського господарства та екології. Традиційні методи рекультивації часто потребують значних матеріальних витрат і можуть супроводжуватися додатковим антропогенним навантаженням на довкілля. У зв'язку з цим особливого значення набувають біологічні методи відновлення ґрунтів, засновані на використанні корисних мікроорганізмів. Завдяки здатності брати участь у процесах мінералізації органічної речовини, азотфіксації, мобілізації фосфору та детоксикації забруднювачів, мікроорганізми є ефективним інструментом відновлення родючості деградованих земель [16].

Ґрунтові мікроорганізми є ключовими компонентами наземних екосистем, оскільки саме вони забезпечують перебіг більшості біогеохімічних процесів. Вони беруть участь у трансформації органічних залишків, формуванні гумусу, мінералізації поживних речовин та підтриманні структури ґрунту. Порушення чисельності та видового складу

мікробіоти внаслідок деградації ґрунтів призводить до зниження інтенсивності цих процесів, що негативно позначається на продуктивності агроєкосистем. Тому відновлення мікробного різноманіття розглядається як одна з основних передумов повернення деградованим ґрунтам їх функціональної активності.

Одним із найпоширеніших напрямів використання мікроорганізмів є застосування біодобрих на основі азотфіксувальних бактерій. Представники родів *Azotobacter*, *Azospirillum* та *Rhizobium* здатні засвоювати атмосферний азот і накопичувати його у ґрунті у формі сполук, доступних для рослин. Унаслідок цього покращується азотне живлення культурних рослин, підвищується врожайність та зменшується потреба у внесенні мінеральних азотних добрив. Дослідження останніх років показують, що використання азотфіксувальних бактерій може забезпечити додаткове надходження до ґрунту від 40 до 150 кг азоту на гектар залежно від умов вирощування та складу мікробного препарату [17].

Крім азотфіксації, бактерії роду *Azotobacter* здатні синтезувати біологічно активні речовини, зокрема ауксини, гібереліни та вітаміни групи В, які стимулюють ріст кореневої системи рослин. Це забезпечує краще засвоєння води та поживних елементів із ґрунту, підвищує стійкість рослин до несприятливих факторів навколишнього середовища та сприяє збільшенню врожайності сільськогосподарських культур.

Важливе значення для відновлення родючості ґрунтів мають фосфатмобілізувальні мікроорганізми. Значна частина фосфору в ґрунті перебуває у нерозчинних формах, недоступних для рослин. Бактерії родів *Pseudomonas*, *Bacillus* та *Enterobacter* здатні синтезувати органічні кислоти та фосфатази, які переводять фосфор у легкодоступні сполуки. У результаті підвищується ефективність використання фосфорних ресурсів ґрунту та покращується мінеральне живлення рослин [13].

Відомо, що коефіцієнт використання фосфору з мінеральних добрив часто не перевищує 20–30 %, оскільки значна його частина переходить у малодоступні форми. Застосування фосфатмобілізувальних бактерій дозволяє активізувати природні механізми вивільнення фосфору та підвищити ефективність його використання рослинами без збільшення норм внесення добрив. Це має важливе економічне та екологічне значення для сучасного землеробства.

Перспективним напрямом є використання мікроорганізмів для відновлення ґрунтів, деградованих унаслідок ерозії та виснаження запасів органічної речовини. Бактерії роду *Bacillus*, актиноміцети та целюлозоруйнівні гриби беруть активну участь у розкладанні рослинних решток та утворенні гумусових речовин. Це сприяє накопиченню органічної речовини, покращенню структури ґрунту, підвищенню його вологостійкості та активізації біологічних процесів. Встановлено, що застосування мікробних препаратів може збільшувати вміст органічного вуглецю у ґрунті на 10–25 % протягом кількох років використання [20, 21].

Особливо важливою є роль бактерій роду *Bacillus* у процесах ґрунтоутворення. Представники цього роду характеризуються високою ферментативною активністю та здатністю продукувати широкий спектр гідролітичних ферментів, які забезпечують розкладання складних органічних сполук. Крім того, завдяки утворенню спор вони добре пристосовані до несприятливих умов середовища та можуть тривалий час зберігати життєздатність у деградованих ґрунтах.

Останніми роками особливу увагу приділяють використанню мікроорганізмів для біоремедіації забруднених ґрунтів. Доведено, що деякі бактерії та гриби здатні трансформувати або акумулювати токсичні речовини, зокрема нафтопродукти, пестициди, важкі метали та залишки вибухових речовин. Представники родів *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus* та *Arthrobacter* ефективно руйнують складні органічні

забруднювачі та сприяють відновленню екологічного стану ґрунтів. Особливо актуальним цей напрям є для територій, які зазнали техногенного впливу або постраждали внаслідок військових дій [7].

Для України проблема біоремедіації ґрунтів набуває особливої актуальності у зв'язку з масштабними пошкодженнями земельних ресурсів внаслідок воєнних дій. Вибухи боєприпасів, потрапляння паливно-мастильних матеріалів та уламків військової техніки призводять до накопичення у ґрунті токсичних сполук і важких металів. Використання спеціалізованих мікроорганізмів дозволяє прискорити процеси детоксикації та зменшити негативний вплив забруднювачів на довкілля.

Високу ефективність демонструє використання консорціумів мікроорганізмів. На відміну від окремих штамів, консорціуми поєднують декілька функціональних груп мікроорганізмів, які взаємодіють між собою та забезпечують комплексний вплив на ґрунтову екосистему. Наприклад, поєднання азотфіксувальних бактерій (*Azotobacter*), фосфатмобілізувальних бактерій (*Pseudomonas*) та целюлозоруйнівних бактерій (*Bacillus*) сприяє одночасному покращенню азотного та фосфорного живлення рослин, активізації гумусоутворення та відновленню біологічної активності ґрунту. За даними сучасних досліджень, використання таких консорціумів дозволяє підвищити мікробіологічну активність ґрунту на 30–70 % та суттєво покращити його агрохімічні показники [19].

Ефективність консорціумів пояснюється синергетичною взаємодією між окремими групами мікроорганізмів. У таких асоціаціях продукти життєдіяльності одних видів можуть використовуватися іншими, що забезпечує стабільність мікробного угруповання та підвищує ефективність біохімічних процесів. Завдяки цьому консорціуми часто демонструють значно кращі результати порівняно з монокультурами мікроорганізмів.

Важливим напрямом сучасних досліджень є поєднання мікробних препаратів із фіторемедіаційними технологіями. Встановлено, що асоціації

рослин і корисних мікроорганізмів забезпечують більш ефективне відновлення деградованих земель завдяки взаємному стимулюванню росту рослин і розвитку ґрунтової мікробіоти. Такі комплексні технології дозволяють прискорити процеси відновлення структури ґрунту, накопичення органічної речовини та детоксикації забруднювачів [16].

Ризосферні мікроорганізми здатні колонізувати кореневу систему рослин, стимулювати її розвиток та підвищувати стійкість до посухи, засолення й токсичного впливу забруднювачів. У свою чергу рослини забезпечують мікроорганізми органічними сполуками, що виділяються коренями. Така взаємодія формує стабільну систему, здатну ефективно функціонувати навіть за умов значного антропогенного навантаження.

Таким чином, використання мікроорганізмів є одним із найбільш перспективних та екологічно безпечних способів відновлення деградованих ґрунтів. Завдяки участі у процесах азотфіксації, мобілізації поживних речовин, гумусоутворення та біоремедіації забруднених територій мікроорганізми забезпечують підвищення родючості ґрунтів і сприяють сталому розвитку аграрного виробництва.

З огляду на сучасні екологічні виклики, пов'язані з деградацією земель, зміною клімату та зростанням антропогенного навантаження, біотехнологічні підходи із використанням корисних мікроорганізмів розглядаються як один із найперспективніших напрямів сталого землекористування. Їх впровадження дозволяє не лише відновлювати продуктивність деградованих ґрунтів, але й сприяти збереженню біорізноманіття, зменшенню використання агрохімікатів та покращенню екологічного стану агроландшафтів [22-25].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкт та предмет дослідження

Об'єктом дослідження у даній роботі є процес відновлення родючості деградованих ґрунтів за використання консорціумів мікроорганізмів.

Предметом дослідження є вплив консорціумів ґрунтових мікроорганізмів на агрохімічні та біологічні показники деградованих ґрунтів.

Для проведення досліджень використовували зразки деградованого ґрунту та консорціуми ґрунтових мікроорганізмів. Оцінку ефективності впливу мікроорганізмів проводили за показниками рН ґрунту, вмісту органічної речовини та чисельності ґрунтової мікробіоти. Дослідження виконували в лабораторних умовах із застосуванням стандартних мікробіологічних та агрохімічних методів аналізу.

2.2. Відбір та підготовка зразків ґрунту

Для проведення досліджень використовували зразки деградованого ґрунту, відібрані з ділянок із порушеними показниками родючості. Відбір проб здійснювали відповідно до загальноприйнятих методик ґрунтових досліджень. Зразки відбирали з верхнього орного шару ґрунту на глибині 0–20 см, оскільки саме цей шар характеризується найбільшою біологічною активністю та містить основну кількість ґрунтових мікроорганізмів. Для отримання середньої проби відбір проводили у кількох точках дослідної ділянки методом «конверта». Із кожної точки відбирали приблизно однакову кількість ґрунту, після чого окремі проби об'єднували у спільний зразок та ретельно перемішували. Маса середньої проби становила близько 1 кг.

Після транспортування до лабораторії зразки ґрунту очищували від рослинних решток, коренів, камінців та інших механічних домішок. Далі ґрунт висушували до повітряно-сухого стану за кімнатної температури у добре вентиляваному приміщенні без потрапляння прямих сонячних променів. Висушування проводили з метою стабілізації властивостей ґрунту та забезпечення точності подальших аналізів.

Після висушування зразки подрібнювали та просіювали через сито з діаметром отворів 1–2 мм для отримання однорідної структури. Підготовлені зразки зберігали у чистих сухих контейнерах при кімнатній температурі до моменту проведення досліджень. Підготовлені зразки використовували для визначення чисельності ґрунтових мікроорганізмів, показника рН та вмісту органічної речовини у ґрунті.

2.3. Культивування консорціумів мікроорганізмів

Для проведення досліджень використовували консорціуми ґрунтових мікроорганізмів, до складу яких входили бактерії родів *Azotobacter*, *Bacillus* та *Pseudomonas*. Дані мікроорганізми характеризуються здатністю до азотфіксації, мобілізації фосфатів та стимулювання біологічної активності ґрунту.

Культивування мікроорганізмів проводили в лабораторних умовах із використанням стандартних поживних середовищ. Для культивування бактерій роду *Azotobacter* використовували безазотне середовище Ешбі [26], для бактерій роду *Bacillus* - м'ясо-пептонний агар (МПА) та м'ясо-пептонний бульйон (МПБ) [27], а для бактерій роду *Pseudomonas* — середовище Кінга В [28]. Поживні середовища готували відповідно до стандартних мікробіологічних методик та стерилізували в автоклаві при температурі 121 °C упродовж 20 хвилин. Після охолодження середовищ проводили інокуляцію мікроорганізмів у стерильних умовах ламінарного боксу.

Культивування здійснювали у колбах об'ємом 250 мл, які містили 100 мл рідкого поживного середовища. Мікроорганізми вирощували у термостаті при температурі 28–30 °С протягом 24–72 годин. Для забезпечення аерації та рівномірного росту культур колби культивували на лабораторному шейкері зі швидкістю 180 об/хв.

Ріст мікроорганізмів контролювали візуально за ступенем помутніння середовища та методом серійних розведень із подальшим висівом на тверді поживні середовища для визначення кількості колонієутворюючих одиниць (КУО). Після завершення культивування отримані мікробні суспензії використовували для обробки зразків деградованого ґрунту та подальшої оцінки їх впливу на показники родючості ґрунту.

2.4. Визначення чисельності ґрунтових мікроорганізмів

Чисельність ґрунтових мікроорганізмів визначали методом серійних розведень із подальшим висівом на тверді поживні середовища. Для дослідження використовували підготовлені зразки ґрунту після обробки консорціумами мікроорганізмів. Для приготування вихідної суспензії 10 г ґрунту поміщали у колбу, що містила 90 мл стерильного фізіологічного розчину, та ретельно перемішували на лабораторному шейкері протягом 15–20 хвилин. Отриману суспензію використовували для приготування серійних десяткових розведень.

Із кожного розведення відбирали по 0,1 мл суспензії та наносили на поверхню твердих поживних середовищ стерильним шпателем. Для визначення чисельності бактерій роду *Azotobacter* використовували середовище Ешбі, для бактерій роду *Bacillus* - м'ясо-пептонний агар (МПА), а для бактерій роду *Pseudomonas* - середовище Кінга В. Посіви інкубували у термостаті при температурі 28–30 °С протягом 24–72 годин.

Після завершення культивування підраховували кількість колонієутворюючих одиниць (КУО), які вирости на поживних середовищах.

Чисельність мікроорганізмів визначали за формулою:

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

де:

N — чисельність мікроорганізмів у ґрунті (КУО/г);

a — кількість колоній на чашці Петрі;

n — ступінь розведення;

m — маса ґрунту, взята для аналізу, г.

Отримані результати використовували для оцінки впливу консорціумів мікроорганізмів на біологічну активність деградованого ґрунту.

2.5. Визначення рН та вмісту органічної речовини ґрунту

Визначення показника рН ґрунту проводили потенціометричним методом із використанням рН-метра. Для приготування ґрунтової суспензії 10 г повітряно-сухого ґрунту змішували з 25 мл дистильованої води у співвідношенні 1:2,5. Отриману суміш ретельно перемішували та залишали на 30 хвилин для відстоювання. Після цього проводили вимірювання рН за допомогою лабораторного рН-метра.

Кожен зразок аналізували у трьох повторностях, а отримані результати використовували для оцінки змін кислотності ґрунту під впливом консорціумів мікроорганізмів.

Вміст органічної речовини у ґрунті визначали методом втрати маси при прожарюванні. Для цього попередньо висушені зразки ґрунту масою 5 г поміщали у фарфорові тиглі та висушували при температурі 105 °С до сталої маси.

Після охолодження у ексикаторі тиглі повторно зважували та визначали втрату маси, яка відповідала вмісту органічної речовини у ґрунті. Розрахунок проводили за формулою:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%$$

де

X – вміст органічної речовини, %;

m₁ – маса сухого ґрунту до прожарювання, г;

m₂ – маса ґрунту після прожарювання, г.

Отримані результати використовували для оцінки впливу консорціумів мікроорганізмів на агрохімічні показники деградованого ґрунту.

2.6. Статистична обробка результатів

Усі дослідження проводили у трикратній повторності. Отримані експериментальні дані обробляли методами варіаційної статистики. Для кожного показника визначали середнє арифметичне значення та стандартне відхилення. Результати досліджень представляли у вигляді середнього значення та похибки. Графічну та табличну обробку даних виконували за допомогою програм Microsoft Excel.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Аналіз чисельності ґрунтових мікроорганізмів

Чисельність ґрунтових мікроорганізмів є важливим показником біологічної активності та родючості ґрунту. У процесі дослідження було проведено аналіз змін кількості мікроорганізмів у деградованому ґрунті після внесення різних видів бактерій та їх консорціумів.

Результати досліджень показали, що застосування мікробних препаратів сприяло суттєвому збільшенню чисельності ґрунтової мікробіоти порівняно з контрольним варіантом. У контрольному зразку без внесення мікроорганізмів чисельність бактерій становила $2,1 \times 10^6$ КУО/г ґрунту. Після застосування бактерій роду *Azotobacter* цей показник зріс до $3,6 \times 10^6$ КУО/г, що на 71,4 % перевищувало контроль.

Таблиця 3.1.1.

Чисельність мікроорганізмів у деградованому ґрунті після внесення різних видів бактерій та їх консорціумів.

Варіант досліджу	Вид бактерій	Чисельність мікроорганізмів, КУО/г ґрунту
Контроль	Без обробки	$2,1 \times 10^6$
Варіант 1	<i>Azotobacter sp.</i>	$3,6 \times 10^6$
Варіант 2	<i>Bacillus sp.</i>	$4,1 \times 10^6$
Варіант 3	<i>Pseudomonas sp.</i>	$3,8 \times 10^6$
Варіант 4	Консорціум (<i>Azotobacter</i> + <i>Bacillus</i> + <i>Pseudomonas</i>)	$4,8 \times 10^6$

У варіанті з використанням бактерій роду *Bacillus* чисельність мікроорганізмів становила $4,1 \times 10^6$ КУО/г ґрунту, що було у 1,95 рази більше порівняно з контролем. Це може пояснюватися високою

адаптивністю бактерій даного роду та їх здатністю активно розкладати органічні речовини у ґрунті.

При застосуванні бактерій роду *Pseudomonas* кількість мікроорганізмів досягала $3,8 \times 10^6$ КУО/г ґрунту. Дані бактерії активно колонізують ризосферу та сприяють мобілізації важкодоступних поживних сполук, що позитивно впливає на розвиток ґрунтової мікробіоти.

Найвищі показники чисельності мікроорганізмів спостерігалися у варіанті з комплексним консорціумом (*Azotobacter*+*Bacillus*+*Pseudomonas*), де кількість мікроорганізмів становила $4,8 \times 10^6$ КУО/г ґрунту. Порівняно з контролем цей показник збільшився у 2,3 рази. Такий результат свідчить про синергічний ефект взаємодії різних груп мікроорганізмів у складі консорціуму.

Отримані результати підтверджують, що використання консорціумів мікроорганізмів сприяє активізації мікробіологічних процесів у деградованому ґрунті та може бути ефективним методом підвищення його біологічної активності й родючості.

3.2. Зміни рН та вмісту органічної речовини ґрунту під впливом мікробних консорціумів

Одними з основних показників родючості ґрунту є рівень кислотності (рН) та вміст органічної речовини. Дані показники суттєво впливають на інтенсивність мікробіологічних процесів, доступність поживних речовин для рослин та загальний стан ґрунтової екосистеми. У ході дослідження було проаналізовано вплив різних видів бактерій та їх консорціумів на зміну зазначених показників у деградованому ґрунті.

Результати досліджень показали, що застосування мікробних консорціумів сприяло покращенню кислотності ґрунту. У контрольному варіанті значення рН становило 5,4, що свідчить про кислу реакцію

середовища. Після внесення бактерій роду *Azotobacter* показник рН підвищився до 6,1, у варіанті з *Bacillus* - до 6,3, а при використанні *Pseudomonas* - до 6,2. Найбільш наближеним до нейтрального середовища було значення рН у варіанті з комплексним консорціумом мікроорганізмів, де воно становило 6,5.

Таблиця 3.2.1.

Зміни рН та вмісту органічної речовини ґрунту під впливом мікробних консорціумів

Варіант досліджу	Вид бактерій	рН ґрунту	Вміст органічної речовини, %	Вміст мінерального азоту, мг/кг	Вміст рухомого фосфору, мг/кг
Контроль	Без обробки	5,4	2,3	18,5	12,4
Варіант 1	<i>Azotobacter sp.</i>	6,1	2,8	22,9	13,7
Варіант 2	<i>Bacillus sp.</i>	6,3	3,4	21,4	14,2
Варіант 3	<i>Pseudomonas sp.</i>	6,2	3,0	20,1	15,1
Варіант 4	Консорціум (<i>Azotobacter</i> + <i>Bacillus</i> + <i>Pseudomonas</i>)	6,5	3,4	23,7	16,3

Підвищення рН можна пояснити активізацією процесів мінералізації органічних речовин та накопиченням продуктів метаболізму мікроорганізмів, які сприяють зниженню кислотності ґрунту. Оптимізація кислотності створює сприятливі умови для розвитку корисної ґрунтової мікробіоти та підвищує доступність елементів живлення для рослин.

Аналіз вмісту органічної речовини показав, що використання мікробних консорціумів також позитивно впливало на накопичення органічних сполук у ґрунті. У контрольному варіанті вміст органічної речовини становив 2,3 %, тоді як після застосування бактерій роду *Azotobacter* він збільшувався до 2,8 %, при використанні *Pseudomonas* - до 3,0 %, а у варіантах із *Bacillus* та комплексним консорціумом - до 3,4 %.

Найбільше зростання вмісту органічної речовини спостерігалось у варіантах із бактеріями роду *Bacillus*, що може бути пов'язано з їх високою здатністю до розкладання органічних залишків та участі у процесах гумусоутворення. Комплексний консорціум мікроорганізмів забезпечував найкращий результат завдяки поєднанню азотфіксувальних, фосфатмобілізувальних та целюлозоруйнівних властивостей різних груп бактерій.

Отримані результати свідчать про позитивний вплив мікробних консорціумів на агрохімічні властивості деградованого ґрунту. Застосування консорціумів мікроорганізмів сприяло зниженню кислотності ґрунту та збільшенню вмісту органічної речовини, що є важливими показниками відновлення його родючості.

3.3. Вплив консорціумів мікроорганізмів на показники родючості деградованих ґрунтів

Одним із перспективних напрямів відновлення деградованих ґрунтів є застосування консорціумів ґрунтових мікроорганізмів, здатних активізувати біологічні процеси та покращувати агрохімічні властивості ґрунту. У даній роботі досліджували вплив консорціумів бактерій родів *Azotobacter*, *Bacillus* та *Pseudomonas* на основні показники родючості деградованого ґрунту.

У результаті проведених досліджень встановлено, що застосування мікробних консорціумів позитивно впливало на біологічну активність ґрунту. Чисельність мікроорганізмів у контрольному варіанті становила $2,1 \times 10^6$ КУО/г ґрунту, тоді як після внесення консорціумів цей показник зростав до $4,8 \times 10^6$ КУО/г ґрунту, що майже у 2,3 раза перевищувало контроль. Найвищі показники чисельності мікробіоти спостерігали у

варіанті з комплексним використанням усіх досліджуваних мікроорганізмів.

Аналіз показників кислотності ґрунту показав, що під впливом мікробних консорціумів значення рН змінювалося у бік нейтральної реакції середовища. У контрольному зразку рН ґрунту становив 5,4, тоді як після обробки консорціумами мікроорганізмів показник підвищувався до 6,2–6,5. Отримані результати свідчать про покращення умов для розвитку корисної ґрунтової мікробіоти та рослин.

Встановлено також збільшення вмісту органічної речовини у дослідних зразках. У контрольному варіанті вміст органічної речовини становив 2,3 %, тоді як після застосування консорціумів мікроорганізмів він зростав до 3,1–3,4 %. Найбільш ефективними виявилися бактерії роду *Bacillus*, які активно брали участь у розкладанні органічних залишків та мінералізації органічних сполук.

Бактерії роду *Azotobacter* сприяли накопиченню доступних форм азоту у ґрунті. Вміст мінерального азоту після обробки ґрунту зростав у середньому на 18–25 % порівняно з контролем. Бактерії роду *Pseudomonas* забезпечували мобілізацію важкодоступних сполук фосфору, унаслідок чого вміст рухомого фосфору у ґрунті підвищувався приблизно на 15–20 %.

Отримані результати свідчать про ефективність використання консорціумів мікроорганізмів для покращення агрохімічних та біологічних показників деградованих ґрунтів. Застосування мікробних консорціумів сприяло підвищенню біологічної активності, збільшенню вмісту органічної речовини та покращенню кислотності ґрунту, що є важливими показниками відновлення його родючості.

Таблиця 3.3.1.

**Вплив консорціумів мікроорганізмів на показники родючості
деградованого ґрунту**

Варіант досліджу	Вид бактерій	Чисельність мікроорганізмів, КУО/г ґрунту	pH ґрунту	Вміст органічної речовини, %	Вміст мінерального азоту, мг/кг	Вміст рухомого фосфору, мг/кг
Контроль	Без обробки	(2,1 x 10 ⁶)	5,4	2,3	18,5	12,4
Варіант 1	<i>Azotobacter sp.</i>	(3,6 x 10 ⁶)	6,1	2,8	22,9	13,7
Варіант 2	<i>Bacillus sp.</i>	(4,1 x 10 ⁶)	6,3	3,4	21,4	14,2
Варіант 3	<i>Pseudomonas sp.</i>	(3,8 x 10 ⁶)	6,2	3,0	20,1	15,1
Варіант 4	Консорціум (<i>Azotobacter</i> + <i>Bacillus</i> + <i>Pseudomonas</i>)	(4,8 x 10 ⁶)	6,5	3,4	23,7	16,3

Згідно з отриманими результатами, найбільший позитивний вплив на показники родючості деградованого ґрунту спостерігався при застосуванні комплексного консорціуму мікроорганізмів. У даному варіанті чисельність мікроорганізмів зросла у 2,3 раза порівняно з контролем, а також відзначалися найвищі показники вмісту органічної речовини, мінерального азоту та рухомого фосфору.

Отримані результати узгоджуються з даними сучасних досліджень щодо використання мікробних консорціумів для відновлення деградованих ґрунтів. Зокрема, визначено, що комплексне застосування азотфіксувальних і фосфатмобілізувальних бактерій сприяє збільшенню мікробної біомаси ґрунту на 30–70 % та покращує доступність основних елементів живлення для рослин [19]. У проведеному дослідженні приріст

чисельності мікроорганізмів становив понад 128 %, що свідчить про високу ефективність використаного консорціуму.

Підвищення показника рН ґрунту до значень, близьких до нейтральних, також підтверджується результатами інших авторів. Інтродукція корисних бактерій у деградовані ґрунти сприяє активізації процесів мінералізації органічних сполук та стабілізації кислотно-лужного балансу, що створює сприятливі умови для розвитку рослин і ґрунтової мікробіоти [16].

Отримані результати щодо збільшення вмісту органічної речовини узгоджуються з іншими дослідженнями, які відзначали, що застосування мікробних препаратів і органічних меліорантів здатне підвищувати вміст органічного вуглецю в деградованих ґрунтах на 10–25 %. У нашому досліді збільшення вмісту органічної речовини становило до 47,8 % порівняно з контролем, що може бути пов'язано з активною участю бактерій роду *Bacillus* у процесах деструкції рослинних решток та гумусоутворення [11].

Виявлене збільшення вмісту мінерального азоту після внесення *Azotobacter* sp. відповідає результатам досліджень, які підтверджують здатність азотфіксуювальних бактерій забезпечувати додаткове надходження до ґрунту біологічно доступного азоту та підвищувати його вміст на 15–30 % [17]. Отримані нами значення знаходяться в межах цього діапазону, що підтверджує ефективність використаного штаму.

Аналогічно результати щодо мобілізації фосфору під впливом бактерій роду *Pseudomonas* узгоджуються з даними Sharma та співавт. (2023), які встановили, що фосфатмобілізуювальні бактерії здатні підвищувати концентрацію рухомих форм фосфору в ґрунті на 10–25 % завдяки синтезу органічних кислот та ферментів-фосфатаз [13]. У проведеному дослідженні вміст рухомого фосфору збільшився на 21,8 %, що підтверджує високу активність даної групи мікроорганізмів.

Особливо важливим є той факт, що найкращі результати були отримані при сумісному використанні бактерій *Azotobacter*, *Bacillus* та *Pseudomonas*. Це свідчить про наявність синергетичного ефекту між окремими компонентами консорціуму. Багатокомпонентні консорціуми мікроорганізмів є більш ефективними для відновлення деградованих земель порівняно з використанням окремих штамів, оскільки забезпечують комплексний вплив на процеси азотфіксації, мобілізації фосфору та трансформації органічної речовини [19].

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що застосування консорціумів мікроорганізмів (*Azotobacter*, *Bacillus* та *Pseudomonas*) позитивно впливає на біологічну активність деградованого ґрунту. Чисельність ґрунтових мікроорганізмів у дослідних варіантах збільшувалася у 1,7–2,3 раза порівняно з контролем.

2. Доведено, що використання мікробних консорціумів сприяє покращенню кислотності ґрунту. Значення рН у дослідних зразках підвищувалося з 5,4 у контролі до 6,1–6,5 після внесення мікроорганізмів, що свідчить про зниження кислотності деградованого ґрунту.

3. Встановлено збільшення вмісту органічної речовини у ґрунті під впливом мікробних консорціумів. У дослідних варіантах цей показник зростав з 2,3 % у контролі до 3,0–3,4 %, що підтверджує активізацію процесів мінералізації та гумусоутворення.

4. Найвищу ефективність щодо покращення показників родючості деградованого ґрунту продемонстрував комплексний консорціум бактерій (*Azotobacter*+*Bacillus*+*Pseudomonas*), який забезпечував найбільше підвищення чисельності мікроорганізмів, вмісту органічної речовини та оптимізацію показника рН ґрунту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang Q., Liu K., Shao X., Li H., He Y., Sirimuji, Wang B. Microbes require a relatively long time to recover in natural succession restoration of degraded grassland ecosystems // *Ecological Indicators*. – 2021. – Vol. 129. – Article 107881. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107881.
2. Mao Z., Harris J., Zhang Z. Responses of natural microorganisms to land reclamation and applications of functional microorganisms in bioremediation of coal mining area // *Diversity*. – 2024. – Vol. 16, № 2. – Article 86. DOI: 10.3390/d16020086.
3. Myazin V. A., Korneykova M. V., Chaporgina A. A., Fokina N. V., Vasilyeva G. K. The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic // *Microorganisms*. – 2021. – Vol. 9, № 8. – Article 1722. DOI: 10.3390/microorganisms9081722.
4. Philippot L., Chenu C., Kappler A. et al. The interplay between microbial communities and soil properties // *Nature Reviews Microbiology*. – 2024. – Vol. 22. – P. 226–239. DOI: 10.1038/s41579-023-00980-5.
5. Filchev L., Kolev V. Assessing of soil erosion risk through geoinformation sciences and remote sensing – a review // In: Rai P. K., Singh P., Mishra V. N. (eds.). *Recent Technologies for Disaster Management and Risk Reduction*. – Cham : Springer, 2021. – P. 415–436. DOI: 10.1007/978-3-030-76116-5_21.
6. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., Mazur S., Vynokurova N., Sementsova K., Mariychuk R. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine // *Land*. – 2024. – Vol. 13, № 10. – Article 1614. DOI: 10.3390/land13101614.
7. Kuzomenska K., Ablicieva I., Tischenko S., Lysytska A. Chemical soil degradation from military activities: An integrated approach to land

reclamation // *Environmental Problems*. – 2025. – Vol. 10, № 4. – P. 344–354. DOI: 10.23939/ep2025.04.344.

8. Hartmann M., Six J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2023. – Vol. 4. – P. 4–18. DOI: 10.1038/s43017-022-00366-w.

9. Bhattacharyya S. S., Furtak K. Soil–plant–microbe interactions determine soil biological fertility by altering rhizospheric nutrient cycling and biocrust formation // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, № 1. – Article 625. DOI: 10.3390/su15010625.

10. Trivedi P., Delgado-Baquerizo M., Trivedi C. et al. Microbial regulation of the soil carbon cycle: Evidence from global studies // *Nature Reviews Microbiology*. – 2023. – Vol. 21, № 11. – P. 705–721.

11. Lehmann J., Bossio D. A., Kögel-Knabner I., Rillig M. C. The concept and future prospects of soil health // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2020. – Vol. 1, № 10. – P. 544–553.

12. Canarini A., Kaiser C., Merchant A., Richter A., Wanek W. Root exudation of primary metabolites: Mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli // *Frontiers in Plant Science*. – 2021. – Vol. 12. – Article 638010.

13. Sharma S. B., Sayyed R. Z., Trivedi M. H., Gobi T. A. Phosphate-solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils // *Microbiological Research*. – 2023. – Vol. 270. – Article 127343. DOI: 10.1016/j.micres.2023.127343.

14. Rillig M. C., Lehmann A., Aguilar-Trigueros C. A. et al. Soil biodiversity effects from field to fork // *Trends in Plant Science*. – 2021. – Vol. 26, № 1. – P. 17–24.

15. Backer R., Rokem J. S., Ilangumaran G. et al. Plant growth-promoting rhizobacteria: Mechanisms and applications in sustainable agriculture // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12, № 4. – Article 921.

16. Compant S., Samad A., Faist H., Sessitsch A. Beneficial microorganisms for sustainable agriculture and soil restoration // *Microbiological Research*. – 2024. – Vol. 279. – Article 127610.
17. Kour D., Rana K. L., Yadav A. N. et al. Microbial biofertilizers: Biodiversity, mechanisms of plant growth promotion and sustainable agriculture // *Environmental Research*. – 2022. – Vol. 212. – Article 113290.
18. Fira D., Dimkić I., Berić T., Lozo J., Stanković S. Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species // *Journal of Biotechnology*. – 2023. – Vol. 371. – P. 1–14.
19. Woo S. L., Pepe O. Microbial consortia: Promising tools for sustainable agriculture and soil restoration // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 13, № 5. – Article 1254.
20. Banerjee S., Schlaeppi K., van der Heijden M. G. A. Keystone taxa as drivers of microbiome structure and functioning // *Nature Reviews Microbiology*. – 2018. – Vol. 16, № 9. – P. 567–576. DOI: 10.1038/s41579-018-0024-1.
21. Röttjers L., Faust K. Can we predict keystones? // *Nature Reviews Microbiology*. – 2018. – Vol. 17. – P. 193. – DOI: 10.1038/s41579-018-0132-y.
22. Mouquet N., Devictor V., Meynard C. N., et al. Extending the concept of keystone species to communities and ecosystems // *Ecology Letters*. – 2013. – Vol. 16, № 1. – P. 1–8. – DOI: 10.1111/ele.12014.
23. Fisher C. K., Mehta P. Identifying keystone species in the human gut microbiome from metagenomic time series using sparse linear regression // *PLoS ONE*. – 2014. – Vol. 9, № 1. – e102451. – DOI: 10.1371/journal.pone.0102451.
24. Faust K., Raes J. Microbial interactions: from networks to models // *Nature Reviews Microbiology*. – 2012. – Vol. 10. – P. 538–550. – DOI: 10.1038/nrmicro2832.

25. Banerjee S., Schlaepi K., van der Heijden M. G. A. Network analysis reveals functional redundancy and keystone taxa amongst bacterial and fungal communities during organic matter decomposition in an arable soil // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2016. – Vol. 97. – P. 188–198. – DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.03.008.
26. Білявська Л. О., Іутинська Г. О. *Ґрунтова мікробіологія : практикум*. – Київ : НУБіП України, 2020. – 180 с.
27. Holt J. G., Krieg N. R., Sneath P. H. A., Staley J. T., Williams S. T. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. – 9th ed. – Baltimore : Williams & Wilkins, 1994. – 787 p.
28. King E. O., Ward M. K., Raney D. E. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein // *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*. – 1954. – Vol. 44, № 2. – P. 301–307.