

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет водогосподарської інженерії та екології Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Зав. кафедри екології

к.с.-г.н, доц. _____ В.В. Кацевич

« ____ » _____ 20__ р.

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

освітнього ступеня «Магістр»

на тему: «Мікробне різноманіття ґрунту в Ботанічному саду Дніпровського
національного університету ім. Олеся Гончара та його роль у
ґрунтоутворенні»

Виконав: здобувач вищої освіти 2 курсу,
групи МГЕ-1-24 спеціальності 101 «Екологія»

_____ Дудник Д.А.

Керівник _____ доц., к.с.-г.н Зленко І.Б

Дніпро-2025

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Факультет водогосподарської інженерії та екології

Кафедра екології

Спеціальність 101 «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри екології

к.с.-г.н., доц. _____ В.В. Кацевич

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу для здобуття освітнього ступеня «Магістр»

здобувачу вищої освіти

Дуднику Денису Анатолійовичу

1. Тема проекту (роботи) Мікробне різноманіття ґрунту в Ботанічному саду Дніпровського національного університету ім. Олеса Гончара та його роль у ґрунтоутворенні

керівник роботи: к.с.-г.н, доц.. Зленко Ірина Борисівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом по ДДАЕУ від «___» _____ 202__ р. №__.

2. Термін здачі здобувачем вищої освіти закінченого проекту (роботи): «___» _____ 202__ р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи):

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Рисунків – 9 , Таблиць – 10, Використаної літератури – 59 , Розділів – 4 , Сторінок – 82.

Дата видачі завдання: «___» жовтня 2025 р.

Керівник проекту (роботи): _____ / Зленко І.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання: _____ / Дудник Д.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

- № п/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою дослідження	03.09.2025-18.09.2025	виконано
2	Фізико-географічна і кліматична характеристика об'єкта досліджень	18.09.2025-03.10.2025	виконано
3	Методи досліджень	04.10.2025-17.10.2025	виконано
4	Результати досліджень та їх аналіз	18.10.2025-29.10.2025	виконано
5	Охорона праці	14.11.2025-27.11.2025	виконано
6	Оформлення дипломної роботи	28.11.2025-08.12.2025	виконано

Студент-дипломник _____ / (Дудник Д.А.) /
(підпис)

Керівник проекту (роботи) _____ / (Зленко І.Б.) /
(підпис)

РЕФЕРАТ

Тема дипломної роботи: «Мікробне різноманіття ґрунту в Ботанічному саду Дніпровського національного університету ім. Олесея Гончара та його роль у ґрунтоутворенні».

Робота містить вступ, три розділи, висновки та список використаної літератури. Загальний обсяг становить 82 сторінок, включаючи 9 рисунків та 10 таблиць.

Мета дослідження - визначити особливості формування мікробного різноманіття ґрунтів під дубовими насадженнями та оцінити їхню стійкість за умов посушливого періоду.

Об'єкт дослідження - ґрунти ботанічного саду ДНУ.

Предмет дослідження - структура та динаміка ґрунтових мікроорганізмів під впливом рослинних насаджень.

Основні завдання:

- визначити чисельність основних груп мікроорганізмів;
- оцінити сезонні зміни їх активності;
- розрахувати індекс Шеннона для порівняння різних точок відбору;

Методи дослідження: мікробіологічний аналіз ґрунту, визначення біологічної активності, розрахунок індексів різноманіття, статистична обробка даних.

Результати роботи дозволяють оцінити стан ґрунтової екосистеми ботанічного саду, визначити найбільш стабільні мікробні угруповання та окреслити чинники, що впливають на формування мікробного різноманіття.

Ключові слова: ҐРУНТ, МІКРОБІОТА, БІОЛОГІЧНЕ РІЗНОМАНІТТЯ, РИЗОСФЕРА, ДУБ ЗВИЧАЙНИЙ, ЕКОСИСТЕМА.

ЗМІСТ

ВСТУП.	6
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОБНОГО РІЗНОМАНІТТЯ ҐРУНТУ.	8
1.1 Роль ґрунтових мікроорганізмів у функціонуванні екосистем.	8
1.2 Структура та функціональні групи мікроорганізмів ґрунту.	11
1.3 Поняття про мікробне різноманіття та показники його оцінки.	14
1.4 Взаємодії мікроорганізмів в ґрунтових екосистемах.	17
1.5 Роль ризосфери у формуванні мікробних угруповань.	19
1.6 Алелопатичні взаємовідносини між рослинами та мікроорганізмами.	22
1.7 Біологічна активність ґрунту та показники її оцінки.	24
1.8 Вплив антропогенних факторів на різноманіття мікроорганізмів у ботанічних садах.	27
1.9 Особливості впливу культури дуба на ґрунтову мікрофлору.	30
2 МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА УМОВ ДОСЛІДЖЕННЯ.	33
2.1 Об'єкт та місце проведення досліджень.	33
2.2 Кліматичні та ґрунтові умови території.	36
2.3 Відбір і підготовка ґрунтових проб.	39
2.4 Методи мікробіологічного аналізу ґрунту.	41
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.	44
3.1 Чисельність ґрунтових мікроорганізмів під культурою дуба.	44
3.2 Порівняння мікробних угруповань у точках відбору.	48
3.3 Сезонна динаміка мікробних угруповань.	51
3.4 Показники біологічної активності ґрунту.	55
3.5 Оцінка мікробного різноманіття.	63
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.	67
4.1 Організація безпечних умов роботи на території ботанічного саду. ...	67
4.2 Вимоги безпеки під час відбору та транспортування ґрунтових зразків.	69
4.3 Правила безпечної роботи з мікробіологічними матеріалами в лабораторії.	71
ВИСНОВКИ.	75
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.	77

ВСТУП

Ґрунтові мікроорганізми є фундаментальним компонентом будь-якої наземної екосистеми, адже саме вони забезпечують безперервність процесів трансформації речовин, підтримують родючість ґрунту та визначають його здатність до самовідновлення. Сучасні екологічні дослідження доводять, що мікробне різноманіття є одним із найчутливіших індикаторів стану довкілля, оскільки швидко реагує на зміни кліматичних умов, рівень антропогенного навантаження та особливості рослинного покриву. Вивчення структури й динаміки мікробних угруповань у ґрунті дозволяє глибше зрозуміти перебіг біогеохімічних процесів і виявити закономірності формування стійких екосистем.

Актуальність обраної теми зумовлена тим, що в умовах сучасної кліматичної нестабільності та посилення посушливих періодів значно зростає потреба у вивченні реакцій ґрунтових мікроорганізмів на змінені умови середовища. Дослідження, проведені останніми роками, свідчать, що тривалі посухи здатні суттєво перебудувати мікробні ценози, пригнічувати бактеріальні групи та стимулювати розвиток грибів, що впливає на швидкість мінералізації органічних речовин і перебіг трофічних ланцюгів. Одночасно важливим є вивчення впливу рослинних видів на ґрунтове біорізноманіття, адже кореневі виділення, хімічний склад опаду та особливості формування ризосфери визначають специфічність мікробних угруповань навколо кожного виду рослин. Це особливо актуально в умовах культурних та напівприродних насаджень, де поєднуються природні та антропогенні чинники.

Об'єктом дослідження обрано ґрунти Ботанічного саду ДНУ ім. Олесея Гончара, оскільки саме ботанічні сади створюють унікальні можливості для вивчення ґрунтових екосистем. На відміну від інтенсивно експлуатованих

агроландшафтів, де ґрунтові процеси часто порушені через обробіток, використання добрив і механічне втручання, ботанічні сади функціонують як напівприродні території зі збереженими біотичними зв'язками. Водночас вони представлені широким різноманіттям інтродуцентів, які сформували стабільні ґрунтово-рослинні комплекси, що дає можливість простежити специфіку впливу окремих видів рослин на мікробне різноманіття. Вибір дуба звичайного (*Quercus robur L.*) обумовлений його екологічною значущістю та виразним впливом на ґрунт через характерні таніни, поліфенольні сполуки та кореневі виділення, які створюють особливі умови для формування мікробних угруповань.

Важливість проведених досліджень полягає не лише у з'ясуванні структури мікробоценозу під дубовими насадженнями, але й у визначенні стійкості цих угруповань до кліматичних стресів, таких як посуха, що спостерігалася під час періоду відбору проб.

Дослідження мікробного різноманіття ґрунтів Ботанічного саду є актуальним і необхідним для розуміння функціонування ґрунтових екосистем, оцінки впливу рослин-інтродуцентів на мікробіоту та визначення факторів, що забезпечують стабільність і відновну здатність ґрунтів у сучасних кліматичних умовах.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОБНОГО РІЗНОМАНІТТЯ ҐРУНТУ

1.1 Роль ґрунтових мікроорганізмів у функціонуванні екосистем

Ґрунтові мікроорганізми є однією з найважливіших складових будь-якої екосистеми, адже саме вони забезпечують безперервність процесів трансформації речовин і енергії у ґрунтовому середовищі. Завдяки їхній діяльності відбувається розкладання органічних решток, мінералізація сполук вуглецю, азоту, фосфору та сірки, що робить поживні елементи доступними для рослин. Ґрунтова мікробіота є біохімічним «двигуном» екосистем, який підтримує трофічний баланс і родючість ґрунту. Саме мікроорганізми формують складний комплекс біохімічних перетворень, що визначають не лише хімічний склад ґрунту, але й його структуру, повітряно-водний режим і потенціал до самовідновлення [1].

З позицій сучасної мікробіології, функціонування екосистеми неможливе без тісного взаємозв'язку між рослинами, мікроорганізмами та абіотичними компонентами середовища. Ризосферна зона — тобто простір навколо коренів рослин — є найбільш активною екологічною нішею, де відбувається інтенсивний обмін метаболітами між рослинами і ґрунтовими мікроорганізмами. Кореневі виділення, що включають амінокислоти, органічні кислоти, фенольні та вуглеводні сполуки, створюють специфічне середовище для розвитку певних мікробних угруповань. У результаті формується взаємозалежна система, у якій рослина регулює чисельність і активність мікроорганізмів, а ті, у свою чергу, стимулюють її ріст, підвищують біодоступність поживних елементів і сприяють стійкості до біотичних і абіотичних стресів. Таким чином, взаємодія «рослина —

грунт — мікроорганізм» виступає ключовим механізмом, що забезпечує стабільність екосистем і підтримує колообіг елементів живлення.

Одним із найважливіших проявів взаємодії рослин і мікроорганізмів є симбіоз із мікоризними грибами. Арбускулярні мікоризні гриби (АМГ), які належать до відділу *Glomeromycota*, утворюють облігатні симбіотичні зв'язки з кореневими системами більшості судинних рослин. Вони проникають у клітини кореневого епідермісу, формуючи структури — арбускули, що забезпечують ефективний обмін поживними речовинами між симбіонтами. Гриб отримує від рослини продукти фотосинтезу (вуглеводи), натомість передає їй сполуки фосфору, цинку, міді, заліза, кальцію та інших елементів, які в неасимільованій формі залишаються недоступними для коренів. Крім того, мікоризні асоціації підвищують толерантність рослин до стресових факторів середовища — дефіциту вологи, засолення, кислотності або токсичності важких металів [2].

У сучасних дослідженнях ботанічних садів як штучно створених, але стабільно функціонуючих екосистем, відзначено, що вони виступають своєрідними резервуарами ґрунтової мікробіоти та можуть бути джерелом цінних мікробних ресурсів для біотехнологічного використання. Зокрема, у праці José Alberto Gío-Trujillo і Carlos J. Alvarado-López (2024), проведеної у тропічному ботанічному саду Національного технологічного інституту Мексики, виявлено 379 спор арбускулярних мікоризних грибів, серед яких домінував таксон *Glomeraceae*. Дослідники зазначають, що представники цього таксона вирізняються високою частотою зустрічальності (100 %) та широкою екологічною амплітудою, здатністю ефективно колонізувати кореневі системи деревних порід навіть за умов антропогенного впливу. Це свідчить про високу адаптивність *Glomeraceae* до змін середовища і про їхню ключову роль у підтриманні мікробно-рослинних зв'язків у різних типах ґрунтів

Подібні результати наведено й у роботах інших авторів (Polo-Marcial et al., 2021; Manrique-Saamal et al., 2024), які доводять, що мікоризні асоціації мають визначальний вплив на стабілізацію ґрунтових процесів у природних і відновлюваних екосистемах. Арбускулярні гриби сприяють відновленню

структури ґрунту, збільшують утримання вологи, стимулюють утворення агрегатів і, відповідно, покращують фізичні властивості ґрунту. У таких умовах мікроорганізми виступають не лише каталізаторами біогеохімічних реакцій, але й архітекторами екологічної рівноваги, що забезпечує стійкість рослинних угруповань до коливань кліматичних та антропогенних чинників [3].

Ґрунти ботанічних садів поєднують риси агро- та урбанізованих систем і характеризуються підвищеним рівнем органічної речовини, складною структурою та значною мікробною активністю. Вони є перехідною формою між природними та культурними ґрунтами, де формуються особливі мікробні угруповання, здатні адаптуватися до змішаного рослинного покриву та неоднорідних умов середовища. Такі екосистеми мають велике наукове значення, адже дозволяють вивчати вплив фіторізноманіття на склад і функції ґрунтової мікробіоти, а також визначати роль рослинних видів-інтродуцентів у зміні структури мікробного співтовариства.

Взаємодія між рослинністю і ґрунтовими мікроорганізмами виявляється також у тому, що різні види рослин створюють специфічні біохімічні мікросередовища через виділення вторинних метаболітів. Наприклад, рослини родів *Quercus*, *Betula* чи *Pinus* формують під собою особливий тип ґрунтових умов, у яких переважають певні групи бактерій, грибів або актиноміцетів, пристосованих до розкладання поліфенольних сполук і танінів. Зміна рослинного покриву неминує призводить до перебудови мікробних угруповань, що підтверджує тісну залежність між структурою рослинності та функціонуванням мікробного комплексу ґрунту [4].

Крім того, рівень антропогенного навантаження істотно впливає на різноманіття мікроорганізмів. Інтенсивне використання добрив, рихлення та порушення ґрунтової структури веде до зниження кількості видів, втрати симбіотичних форм і спрощення мікробного ценозу. Натомість у природних або мінімально порушених екосистемах мікробне різноманіття значно вище, що забезпечує наявність так званих функціональних «дублерів» — видів, які виконують схожі екологічні функції, компенсуючи втрату інших у разі стресу.

Саме це різноманіття є основою стійкості ґрунтових екосистем, адже воно дозволяє підтримувати безперервність процесів кругообігу речовин навіть за несприятливих умов.

Ґрунтові мікроорганізми виступають центральним елементом екологічного функціонування екосистем. Вони забезпечують не лише трансформацію речовин і підтримання ґрунтової родючості, але й опосередковують складні симбіотичні взаємодії, від яких залежить продуктивність, біостійкість і відновна здатність природних і штучних біоценозів. Вивчення цих процесів, особливо в умовах ботанічних садів, має важливе теоретичне й практичне значення для розуміння механізмів підтримання ґрунтового біорізноманіття та розроблення екологічно сталих підходів до управління ґрунтовими системами [5].

1.2. Структура та функціональні групи мікроорганізмів ґрунту

Мікробне населення ґрунту є надзвичайно складною, багаторівневою системою, яка складається з різноманітних за морфологічними, фізіолого-біохімічними та екологічними характеристиками груп мікроорганізмів. Як зазначає Г.О. Іутинська (2006), мікробна система ґрунту є відкритою, саморегульованою та ієрархічною структурою, у межах якої формуються складні взаємозв'язки між бактеріями, актиноміцетами, грибами, водоростями, найпростішими й вірусами. Її функціонування забезпечує сталість біогеохімічних процесів, трансформацію речовин і енергії, а також підтримання родючості ґрунтів [6].

Таксономічна структура мікробних угруповань відзначається високою різноманітністю. Основу бактеріального населення становлять представники родів *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Clostridium*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Actinomyces*, *Rhizobium* тощо. Серед грибів переважають види родів *Penicillium*,

Aspergillus, Trichoderma, Mucor, Fusarium, а серед актиноміцетів — *Streptomyces*, які відіграють провідну роль у розкладанні складних органічних сполук і синтезі біологічно активних речовин (антибіотиків, ферментів, вітамінів). Присутність фототрофних мікроорганізмів — ціанобактерій і зелених водоростей — збагачує ґрунт органічною речовиною, тоді як найпростіші та мікрометазої виконують функцію біологічних регуляторів чисельності бактерій і грибів [7].

За функціональними ознаками ґрунтові мікроорганізми поділяються на кілька основних екологічних груп, кожна з яких виконує специфічну роль у колообігу речовин. До гетеротрофних належать організми, що використовують органічні сполуки як джерело енергії та вуглецю. Вони є головними деструкторами органічної речовини — здійснюють розклад залишків рослин і тварин, гумусових сполук, полімерів та синтетичних органічних речовин. Серед них виділяють амоніфікаторів, які розкладають білкові сполуки з утворенням аміаку, нітрифікаторів, що окиснюють амоній до нітратів, та денітрифікаторів, котрі переводять сполуки азоту у газоподібний стан, завершуючи азотний цикл.

Автотрофні мікроорганізми, навпаки, здатні синтезувати органічну речовину з неорганічних сполук. Серед них виділяють фототрофи (наприклад, ціанобактерії), які отримують енергію від світла, та хемолітотрофи, що використовують енергію окиснення неорганічних речовин (сірки, заліза, аміаку). Ці мікроорганізми беруть участь у процесах хемосинтезу та мінералізації, тим самим підтримуючи трофічну рівновагу у ґрунтовій екосистемі.

Важливе місце у структурі мікробного ценозу займають азотфіксувальні мікроорганізми. Вони здатні зв'язувати атмосферний азот і переводити його у сполуки, доступні для рослин. До вільноживучих азотфіксаторів належать *Azotobacter, Clostridium pasteurianum*, а до симбіотичних — бульбочкові бактерії родів *Rhizobium, Bradyrhizobium, Sinorhizobium*, які утворюють симбіотичні асоціації з бобовими рослинами. Процес біологічної азотфіксації є одним із найважливіших для забезпечення природної родючості ґрунту, оскільки саме він компенсує втрати азоту внаслідок денітрифікації [8].

Іншу значущу групу становлять фосфатмобілізувальні мікроорганізми, що переводять малорозчинні фосфати у форми, доступні для рослин. До них належать бактерії родів *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Flavobacterium* та деякі гриби (*Aspergillus niger*, *Penicillium spp.*). Їхня діяльність підвищує ефективність фосфорного живлення рослин, особливо на ґрунтах із низькою біодоступністю фосфатів. Поряд із ними важливу екологічну роль відіграють сірко- і залізоокиснювальні бактерії, зокрема *Thiobacillus* і *Gallionella*, які беруть участь у біогеохімічному кругообігу сірки та заліза, сприяють процесам вивітрювання мінералів і ґрунтоутворення.

З екологічної точки зору, функціональна структура ґрунтової мікробіоти характеризується співіснуванням двох основних стратегічних груп — зимогенних і автохтонних мікроорганізмів. Перші швидко розмножуються у присутності легкодоступних органічних сполук, виконуючи роль первинних деструкторів, тоді як автохтонні мікроорганізми характеризуються повільним ростом і здатністю використовувати стійкі полімерні сполуки гумусу. Таке розмежування забезпечує стабільність і динамічну рівновагу мікробних процесів у ґрунті [9].

Функціональні взаємозв'язки між різними групами мікроорганізмів формують цілісну екосистему, у якій спостерігається постійний обмін речовинами, енергією та інформацією. Кожна група мікроорганізмів виконує свою роль у ланцюгу трансформації елементів: деструктори органічної речовини забезпечують мінералізацію та звільнення поживних елементів; автотрофи й азотфіксатори відновлюють запас біологічно активного азоту; фосфатмобілізатори, нітрифікатори й денітрифікатори регулюють біодоступність макроелементів. Завдяки цьому ґрунтовий мікробіоценоз функціонує як саморегульована система, здатна підтримувати стабільність навіть за умов природних або антропогенних змін.

Структура та функціональна організація мікроорганізмів ґрунту є основою його екологічної рівноваги. Кожна група мікроорганізмів виконує унікальну роль у забезпеченні трофічного циклу, формуванні гумусу,

трансформації елементів живлення і стабілізації екосистем. Баланс між різними екологічними та трофічними групами визначає рівень біологічної активності ґрунту та його родючість як ключовий компонент біосфери [10].

1.3. Поняття про мікробне різноманіття та показники його оцінки

Мікробне різноманіття ґрунту є одним із найважливіших показників його екологічного стану, родючості та стійкості до зовнішніх впливів. Під цим поняттям розуміють сукупність усіх видів мікроорганізмів, що населяють ґрунт, а також їхню генетичну, таксономічну та функціональну різноманітність. Воно охоплює не лише видовий склад мікробного співтовариства, але й різноманіття метаболічних процесів, які мікроорганізми виконують у межах екосистеми [12].

Мікробне різноманіття є динамічним показником, який змінюється під впливом різних чинників середовища: типу ґрунту, його фізико-хімічних властивостей, вологості, вмісту органічної речовини, кліматичних умов, рослинного покриву та антропогенного навантаження. За даними Mosali & Benedetti (2010), ґрунтові мікроорганізми є найчутливішими індикаторами змін стану екосистем, оскільки їхнє різноманіття та функціональна активність безпосередньо відображають екологічну рівновагу ґрунту. Автори підкреслюють, що саме мікробна різноманітність забезпечує здатність ґрунту підтримувати біогеохімічні цикли, стабільність продукційних процесів і саморегуляцію біосистем [13].

У структурі мікробного різноманіття зазвичай виділяють три рівні: генетичний, видовий та функціональний. Генетичний рівень характеризує сукупність генів, що визначають потенціал мікробного угруповання до виконання певних функцій; видовий рівень — кількісний і якісний склад мікроорганізмів; а функціональний — різноманіття біохімічних процесів, які вони здійснюють у ґрунті. Високе мікробне різноманіття вказує на наявність

багатьох екологічних ніш і складну структуру взаємозв'язків між організмами, що є ознакою стабільності екосистеми.

Для оцінки мікробного різноманіття використовують низку математичних показників, які дають змогу кількісно описати структуру мікробного співтовариства. Найпоширенішим є індекс Шеннона (H'), який враховує як кількість видів, так і рівномірність їхнього розподілу. Чим вищим є значення цього індексу, тим більш збалансованою та стійкою вважається мікробна система. Інший показник — індекс Сімпсона (D) — визначає імовірність того, що дві випадково вибрані особини належать до одного виду; низькі значення цього показника вказують на високу різноманітність. Для оцінки загального багатства видів застосовується індекс Маргалєфа (d), який описує співвідношення кількості видів до загальної чисельності організмів у пробі [14].

У сучасній мікробіології дедалі більшого значення набувають молекулярно-біологічні методи оцінки різноманіття, що дозволяють аналізувати структуру мікробних спільнот без необхідності культивування мікроорганізмів. Серед них найпоширенішими є аналіз генів 16S rRNA, високопродуктивне секвенування нового покоління (NGS) та метагеномне профілювання. Як зазначають Mocali & Benedetti (2010), ці підходи відкрили нові можливості у вивченні таксономічної та функціональної різноманітності мікробіомів, оскільки дають змогу виявити навіть ті групи мікроорганізмів, які не ростуть на традиційних живильних середовищах [15].

Важливим аспектом у вивченні мікробного різноманіття є поняття функціональної надлишковості (*redundancy*) — наявності кількох видів, здатних виконувати однакові екологічні функції. Цей феномен забезпечує стабільність ґрунтових систем, оскільки втрата окремих таксонів не призводить до порушення основних процесів, таких як мінералізація органічних сполук або фіксація азоту. Саме тому високий рівень мікробного різноманіття є запорукою екологічної стійкості, продуктивності й саморегуляції ґрунтових екосистем.

Дослідження Sharma A. та співавт. (2016) підтверджують практичну важливість оцінки мікробного складу ґрунту. Вчені проаналізували популяційну структуру ґрунтових мікроорганізмів у Ботанічному саду міста Уті (Індія) та встановили, що в 1 г сухого ґрунту міститься від $0,1 \times 10^5$ до $22,9 \times 10^5$ колонієутворювальних одиниць (CFU) різних груп мікроорганізмів. Найбільш чисельними виявилися денітрифікуючі бактерії ($22,9 \times 10^5$ CFU/г), грамнегативні бактерії ($20,1 \times 10^5$ CFU/г) та асимбіотичні азотфіксатори ($18,2 \times 10^5$ CFU/г). Популяції гетеротрофних бактерій становили $6,8 \times 10^5$ CFU/г, нітрифікуючих — $6,8 \times 10^5$ CFU/г, спороутворюючих — $6,0 \times 10^5$ CFU/г, а актиноміцетів і грибів — лише $0,5 \times 10^5$ і $0,1 \times 10^5$ CFU/г відповідно [16].

Автори пов'язують високу мікробну активність із високим вмістом органічної речовини в ґрунті ботанічного саду. Вони також зазначають, що мікробні спільноти різного функціонального спрямування — нітрифікатори, денітрифікатори, азотфіксатори, фосфатмобілізатори та сіркоокислювальні бактерії — формують цілісну систему, яка забезпечує колообіг основних біогенних елементів (C, N, P, S) та підтримує трофічну рівновагу екосистеми. Мікробне різноманіття є ключовим фактором підтримання ґрунтової родючості та екологічної стабільності навіть у контрольованих умовах, як-от ботанічний сад.

На рівні ландшафтів і агроекосистем спостерігається тісний зв'язок між рівнем мікробного різноманіття та ступенем антропогенного впливу. У природних або слабо порушених екосистемах мікробна різноманітність є максимальною, оскільки забезпечується широкий спектр трофічних ніш і відсутність стресових факторів. У деградованих або інтенсивно оброблюваних ґрунтах, навпаки, спостерігається зменшення кількості видів, спрощення структури угруповань і втрата функціональної надлишковості, що веде до зниження біологічної активності ґрунту та його екологічної стійкості [17].

1.4 Взаємодії мікроорганізмів в ґрунтових екосистемах

Ґрунтові мікроорганізми формують надзвичайно складну, високоорганізовану систему взаємодій, яка забезпечує сталість функціонування наземних екосистем і підтримує їхню біологічну продуктивність. Вони виступають головними регуляторами біогеохімічних процесів, беручи участь у трансформації сполук вуглецю, азоту, фосфору, сірки, калію, заліза та інших елементів. Через свою діяльність мікроорганізми забезпечують розкладання органічних решток, утворення гумусу, мобілізацію мінеральних сполук і формування трофічних ланцюгів у ґрунті. Саме завдяки мікробним спільнотам відбувається кругообіг речовин і енергії, що лежить в основі екологічної рівноваги [18].

Хімічна взаємодія мікроорганізмів із середовищем змінює не лише його склад, а й властивості: від окисно-відновного потенціалу та кислотності до структури і водопроникності. Саме ґрунтові мікроорганізми стали основними агентами, які колись створили окисну атмосферу Землі, сформували сучасний біогеохімічний цикл вуглецю й азоту та забезпечують стабільність глобальних екологічних процесів донині.

У ґрунті мікробні взаємодії відбуваються на різних рівнях організації — від молекулярних сигналів і метаболічного обміну до тісних симбіотичних зв'язків між представниками різних таксономічних груп. Серед основних типів таких зв'язків розрізняють симбіоз, мутуалізм, коменсалізм, антагонізм і конкуренцію. Їхня динаміка визначає структуру мікробних угруповань, їхній видовий склад, трофічну спеціалізацію та стійкість ґрунтової екосистеми. Наприклад, антагоністичні взаємодії між бактеріями та грибами часто регулюють чисельність патогенних форм, тоді як мутуалістичні — сприяють формуванню стабільних консорціумів, що покращують живлення рослин [19].

Особливо важливу роль у мікробній екології ґрунту відіграє ризосфера — зона безпосереднього впливу коренів, у межах якої відбувається інтенсивний обмін енергією та речовинами між рослиною і мікробіотою. Кореневі виділення (екзудати, слиз, відмерлі клітини, вторинні метаболіти) є головним джерелом вуглецю для мікроорганізмів і визначають склад мікробних консорціумів. Тут підтримується тонкий баланс між процесами мінералізації й іммобілізації азоту, який безпосередньо впливає на біодоступність поживних речовин для рослин.

Мікроорганізми активно взаємодіють з іншими ґрунтовими мешканцями — грибами, водоростями, дощовими черв'яками, кліщами, нематодами. Так, у межах дрилосфери, тобто зони, яку формують дощові черв'яки, спостерігається підвищена концентрація азоту, фосфору, полісахаридів і гуміфікованих речовин. Тут фіксується висока чисельність азотфіксувальних, амоніфікувальних і денітрифікувальних бактерій, що свідчить про надзвичайну інтенсивність біохімічних процесів. Діяльність макрофауни, зокрема черв'яків, сприяє рівномірному розподілу мікроорганізмів у профілі ґрунту, формуванню агрегатів та аерації [20].

Одним із найважливіших симбіотичних зв'язків є мікоризний симбіоз — взаємодія коренів рослин із грибами, що забезпечує більш ефективне засвоєння поживних елементів, підвищує стійкість рослин до посухи, засолення та фітопатогенів. Мікориза особливо характерна для деревних видів, таких як дуб (*Quercus robur* L.), який формує ектомікоризу з грибами родів *Boletus*, *Laccaria*, *Tuber* тощо. Ці взаємодії не лише поліпшують мінеральне живлення дуба, але й впливають на структурно-функціональну організацію мікробіоти його ризосфери.

Крім біотичних взаємодій, мікроорганізми активно впливають на фізико-хімічні властивості ґрунту. Вони продукують полісахариди та білково-вуглеводні комплекси, які цементують мінеральні частинки, утворюючи агрегати. Грибний міцелій формує структурну "сітку", що зміцнює ґрунтову структуру, підвищує її водопроникність і стійкість до ерозії. Такі процеси створюють агрегатосферу — мікросередовище, де відбуваються інтенсивні

обміни речовин, газообмін і циркуляція вологи, що є основою стабільності ґрунтової структури [21].

Мікроорганізми також утворюють складні біоплівки в межах поросфери — простору ґрунтових пор, де концентрується найбільша частка активної мікробної біомаси. Біоплівки складаються з бактерій, грибів і органічних полімерів, які утворюють мікроекосистеми зі стабільним внутрішнім середовищем. Це своєрідні “мікроорганічні міста”, де відбуваються обмін генетичним матеріалом, кооперація в метаболізмі та колективна адаптація до змін середовища.

Таким чином, мікроорганізми є біоархітекторами ґрунтового середовища. Вони визначають його просторову, трофічну та функціональну організацію, формуючи основу ґрунтового життя. Їхня взаємодія з рослинами, грибами, тваринами та абіотичними факторами створює єдину, саморегульовану систему, що забезпечує екологічну стійкість, родючість і відновлювальний потенціал ґрунтових екосистем [22].

1.5. Роль ризосфери у формуванні мікробних угруповань

Ризосфера — це вузька, високоактивна зона ґрунту, що безпосередньо прилягає до кореневої системи рослин і характеризується високою щільністю та метаболічною активністю мікроорганізмів. У цій зоні реалізується більшість процесів біологічної трансформації елементів живлення, які визначають функціонування ґрунтової екосистеми загалом. Мікроорганізми ризосфери формують складну метаболічно інтегровану систему, де переплітаються трофічні, сигнальні, симбіотичні та конкурентні взаємодії [23].

Ключовим чинником, що визначає кількісний і якісний склад ризосферного мікробіому, є кореневі ексудати — комплекс низькомолекулярних органічних речовин (цукрів, органічних кислот, амінокислот, фенолів, вітамінів,

полімерів), які виділяються клітинами кореня. Вони виступають головним джерелом вуглецю та енергії для мікроорганізмів, формуючи специфічні мікроекологічні ніші. Залежно від складу ексудатів відбувається селекція мікробних консорціумів, адаптованих до певного типу рослин і умов середовища.

Ризосферні угруповання мають вищу таксономічну різноманітність і функціональну складність, ніж мікробіом ґрунтової маси. Їм притаманна щільна мережа ко-асоціацій між бактеріями, грибами, актиноміцетами та археями, що забезпечує стійкість до стресів і здатність до саморегуляції. Рослина виступає “екологічним інженером” ризосферного простору, контролюючи активність мікроорганізмів через хімічні сигнали [24].

Мікробні угруповання ризосфери дуба включають бактерії, актиноміцети, гриби, археї та водорості, які утворюють складну метаболічну мережу. Основним регулятором структури й активності цього мікробіому є кореневі ексудати — органічні кислоти, цукри, амінокислоти, фенольні сполуки й полімери, що виділяються клітинами кореня. Вони створюють сприятливі умови для розвитку симбіотичних мікроорганізмів, зокрема мікоризних грибів, азотфіксаторів і фосфатмобілізуючих бактерій, які відіграють ключову роль у забезпеченні дуба елементами живлення та підвищенні його стійкості до стресів.

Для умов ботанічних садів, де екосистеми часто мають штучне походження та зазнають антропогенного впливу (ущільнення ґрунту, зміна гідрологічного режиму, доглядові заходи), саме ризосферна мікробіота визначає здатність дубових насаджень до саморегуляції. Дослідження показують, що структура мікробних угруповань у ризосфері дуба значно відрізняється від ґрунтової мікробіоти прилеглих ділянок і характеризується вищим рівнем функціональної різноманітності [25].

Особливо важливою є роль азотфіксувальних мікроорганізмів (діазотрофів), які здатні збагачувати ризосферу біологічним азотом. У ботанічних садах, де часто обмежене застосування мінеральних добрив, ці мікроорганізми виступають природним джерелом азоту, сприяючи росту дуба та

збереженню родючості ґрунту. За даними Чучваги І.Г. та співавт. (2021), помірні дози мінерального азоту (до 60 кг/га) стимулюють розвиток діазотрофів, тоді як надлишок азоту пригнічує їх активність і сприяє розвитку денітрифікувальних бактерій, що знижують вміст доступного азоту. Тому при догляді за дубовими насадженнями ботанічних садів доцільно уникати надмірного удобрення, зберігаючи природну рівновагу між процесами фіксації та денітрифікації азоту.

Інокуляція садивного матеріалу або ґрунту препаратами на основі *Azospirillum brasilense* (Діазобактерин) може бути ефективним біотехнологічним прийомом у ботанічних садах. Застосування таких препаратів сприяє збільшенню чисельності агрономічно корисних мікроорганізмів у ризосфері дуба, покращенню засвоєння елементів живлення та підвищенню стійкості молодих рослин до абіотичних стресів. Як показано у дослідженнях Волкогона В.В. та співавт. (2021), інокуляція мікробним препаратом сприяє активізації процесів асоціативної азотфіксації, покращенню трофічного режиму рослин і формуванню більш стійких мікробних консорціумів [26].

Мікроорганізми ризосфери дуба виконують низку екологічно значущих функцій:

- беруть участь у мінералізації органічних решток, забезпечуючи надходження доступних форм азоту, фосфору та калію;
- підвищують стійкість дерев до стресів і фітопатогенів шляхом синтезу фітогормонів, антибіотичних речовин і летких метаболітів;
- детоксикують ґрунт від важких металів і пестицидів, що є актуальним для міських ботанічних садів;
- стабілізують структуру ґрунту за рахунок утворення екзополісахаридів, які покращують аерацію та водопроникність кореневої зони.

Таким чином, ризосфера дуба є центральною екологічною ланкою у функціонуванні лісових і паркових біоценозів ботанічних садів. Вона визначає архітектоніку мікробних угруповань, їхню функціональну спеціалізацію та рівень екологічної стійкості насаджень. Збереження біологічної рівноваги ризосферного простору — важлива умова для сталого розвитку дендропаркових

екосистем, підтримання здоров'я дубових деревостанів і відновлення родючості ґрунтів [27].

1.6. Алелопатичні взаємовідносини між рослинами та мікроорганізмами

Хімічний склад корневих виділень є одним із ключових чинників, що визначають характер взаємовідносин між рослинами та специфічною ризосферною мікробіотою, яка формується навколо їх корневих систем. Ці взаємовідносини, зумовлені обміном біологічно активними речовинами, називають алелопатичними. Під алелопатією розуміють хімічну взаємодію рослин між собою або з мікроорганізмами через прижиттєві виділення (ексудати) та продукти розкладу рослинних решток. У сучасному трактуванні цей термін охоплює не лише взаємодію між рослинами, а й між рослинами та мікробними угрупованнями ризосфери [28].

Ще у 1832 р. О. Декандоль відзначав, що деякі види рослин чинять взаємний вплив через ґрунт: наприклад, буряк пригнічує овес, тоді як жито та пшениця або квасоля та бавовник взаємно стимулюють ріст один одного. Подальші ґрунтовні дослідження цього явища проводив Я.М. Гродзинський, який започаткував в Україні системне вивчення алелопатії та розробив класифікацію рослинних виділень. Згідно з його класифікацією, виділення поділяються на активні (гутаційні рідини, леткі сполуки, кореневі екзометаболіти) і пасивні (речовини, що змиваються з поверхні листків або виділяються при механічних пошкодженнях). Крім того, до алелопатично активних речовин належать сполуки, які утворюються під час розкладу відмерлих рослинних решток — вони формують алелопатичний потенціал ґрунтового середовища [29].

До хімічно активних сполук алелопатичної дії належать фітогормони, органічні кислоти, амінокислоти, фенольні сполуки, терпеноїди, кумарини,

алкалоїди, дубильні речовини, фітонциди, пурини, нуклеозиди, нафтохінони та інші. Особливе значення мають інгібуючі сполуки — коліни, що можуть як пригнічувати, так і стимулювати розвиток рослин і мікроорганізмів. Їхня концентрація та тривалість дії залежать від типу рослини, складу ґрунту та умов середовища.

У природних і культурних фітоценозах ботанічних садів, зокрема в дубових насадженнях (*Quercus robur*), алелопатичні процеси мають важливе значення для підтримання екологічної рівноваги. Дубові види виділяють у ґрунт широкий спектр фенольних сполук і дубильних речовин, які впливають на склад ризосферної мікробіоти. Частина цих речовин чинить антибактеріальну дію, обмежуючи розвиток патогенних мікроорганізмів, тоді як інші — стимулюють ріст мікоризних грибів і азотфіксаторів, що сприяють підвищенню стійкості дуба до стресових факторів. Таким чином, у ботанічних садах алелопатичні зв'язки визначають не лише життєздатність дубових насаджень, а й формування мікробних консорціумів, які підтримують біологічну активність ґрунту [30].

Разом із тим, тривале вирощування одних і тих самих видів рослин на одному місці може призводити до накопичення токсичних метаболітів і розвитку явища ґрунтовтоми. Воно проявляється у зниженні схожості насіння, пригніченні росту рослин, зменшенні врожайності й деградації мікробіоти. У дубових насадженнях ботанічних садів ґрунтовтому можуть спричиняти фенольні кислоти та продукти неповного розкладу органічної речовини, які, потрапляючи в ґрунт, частково полімеризуються, але в олігомерній формі залишаються токсичними для мікроорганізмів і рослин.

Важливу роль у формуванні алелопатичних ефектів відіграють і ґрунтові мікроорганізми. За певних умов (перезволоження, нестача кисню) процеси трансформації рослинних решток відбуваються шляхом анаеробного бродіння, що супроводжується накопиченням спиртів і органічних кислот, токсичних для рослин. Деякі види грибів (*Aspergillus terreus*, *Penicillium patulum*, *Trichoderma viride* тощо) синтезують фітотоксичні метаболіти — пеніцилову кислоту, патулін, цитринін, афлатоксини, стахіоботріотоксини, які пригнічують розвиток

азотфіксуючих і нітрифікуючих бактерій, водночас активізуючи денітрифікаторів. Це призводить до втрати зв'язаних форм азоту та загального збіднення ґрунту [31].

У ботанічних садах, де ґрунт часто експлуатується десятиліттями без зміни культур, такі процеси особливо актуальні. Вони можуть спричиняти зниження стійкості насаджень дуба до хвороб і уповільнення росту молодих дерев. Тому при створенні або реконструкції експозиційних ділянок доцільно враховувати алелопатичну сумісність видів, чергувати деревні та трав'янисті рослини, використовувати мікоризні інокулянти і біопрепарати, що відновлюють мікробіологічну рівновагу ризосфери.

Отже, алелопатичні взаємовідносини між рослинами та мікроорганізмами є важливим механізмом регуляції функціонування ґрунтових екосистем ботанічних садів. Вони визначають спрямованість мікробних процесів у ризосфері дуба, впливають на кругообіг речовин, життєздатність рослин і формування здорового ґрунтового мікробіому. Контроль цих взаємодій через біологічні та агротехнічні заходи (введення бобових видів, застосування сидератів, періодичне парування ділянок) є ефективним засобом попередження ґрунтової та збереження екологічної стійкості дубових насаджень у ботанічних садах [32].

1.7. Біологічна активність ґрунту та показники її оцінки

Біологічна активність ґрунту — це сукупність процесів, зумовлених життєдіяльністю ґрунтових мікроорганізмів, грибів, актиноміцетів, водоростей і мезофауни, які беруть участь у трансформації органічних і мінеральних речовин, формуванні структури та родючості ґрунту. Цей показник є комплексною характеристикою екологічного стану ґрунту й визначає його здатність до

саморегуляції та підтримання стійкого біогеохімічного циклу елементів живлення.

У природних умовах ботанічних садів, де зосереджено велику кількість видів деревних, кущових і трав'янистих рослин, біологічна активність ґрунту відображає інтенсивність мікробіологічних процесів, які забезпечують функціонування фітоценозів. Зокрема, у ризосфері дуба звичайного (*Quercus robur L.*) спостерігається висока щільність мікробної біомаси, що пов'язано з наявністю багатого комплексу корневих ексудатів — органічних кислот, амінокислот, цукрів і фенольних сполук, які стимулюють розвиток сапротрофної та симбіотрофної мікрофлори [33].

Біологічна активність ґрунту визначається рядом параметрів, серед яких провідними є:

- інтенсивність дихання ґрунту (СО₂-продукція) — показник сумарної активності мікроорганізмів, що відображає швидкість мінералізації органічної речовини;
- азотфіксувальна активність — здатність ґрунтової біоти перетворювати атмосферний азот у зв'язані форми, доступні для рослин;
- нітрифікаційна та денітрифікаційна активність — свідчать про рівень азотного циклу в екосистемі;
- активність ферментів (каталазна, уреазна, фосфатазна, дегідрогеназна) — біохімічні індикатори, які характеризують напрям і швидкість ґрунтових процесів;
- чисельність і структурний склад мікроорганізмів — відображають співвідношення основних трофічних груп (мінералізаторів, амоніфікаторів, нітрифікаторів, целюлозолітичних бактерій тощо).

У дослідженнях Волкогона В.В. показано, що на біологічну активність ґрунту істотно впливає агрохімічне навантаження. При внесенні помірних доз мінеральних добрив (до 60 кг/га азоту) активність мікробіоти підвищується, однак надлишкові концентрації азоту спричиняють пригнічення азотфіксаторів і стимулюють розвиток денітрифікувальних мікроорганізмів, що веде до втрат

зв'язаного азоту. Використання біопрепаратів на основі *Azospirillum brasilense* (Діазобактерин) сприяє підвищенню чисельності агрономічно цінних мікроорганізмів, покращує азотне живлення рослин і збільшує загальний рівень біологічної активності ризосфери

У насадженнях ботанічного саду біологічна активність ґрунту є показником стану мікробіоценозу і стабільності екосистеми. З віком дубових дерев спостерігається перерозподіл активності між різними трофічними групами: зростає роль мікоризних грибів і актиноміцетів, зменшується частка швидкоростучих бактеріальних форм. Така зміна структури мікробіому сприяє стабілізації біогеохімічних циклів і формуванню сталої екологічної рівноваги.

Для оцінки біологічної активності ґрунту в ботанічних садах використовують низку лабораторних та польових методів:

- Біохімічні тести: визначення активності ферментів (каталази, уреазы, фосфатази, пероксидази) за допомогою субстратно-індикаторних реакцій.
- Мікробіологічні методи: підрахунок колонієутворюючих одиниць (КУО) різних груп мікроорганізмів; вивчення їхнього морфологічного та функціонального складу.
- Газообмінні вимірювання: оцінка інтенсивності ґрунтового дихання як інтегрального показника метаболічної активності.
- Біоіндикаторні методи: спостереження за швидкістю розкладання органічних субстратів (літмус-тести, деградація целюлози, соломи, тирси тощо).

Збалансоване співвідношення різних мікробних груп, висока ферментативна активність та стабільний газообмін свідчать про сприятливий біологічний стан ґрунту під дубовими насадженнями. Натомість зниження активності ферментів, накопичення токсичних метаболітів або переважання денітрифікаторів можуть сигналізувати про погіршення екологічних умов та розвиток явищ ґрунтової [34].

Біологічна активність ґрунту є важливим інтегральним показником функціонування ризосферних екосистем у ботанічних садах. Вона визначає

інтенсивність кругообігу речовин, рівень родючості ґрунту та здатність насаджень дуба до стійкого розвитку. Моніторинг цього показника має бути обов'язковою складовою системи екологічного контролю стану ґрунтів і біорізноманіття ботанічних садів [35].

1.8. Вплив антропогенних факторів на різноманіття мікроорганізмів у ботанічних садах

Антропогенні чинники, такі як урбанізація, забруднення повітря й ґрунту, техногенне навантаження, зміна клімату, а також інтенсивна рекреаційна діяльність, істотно впливають на структуру, функціонування та динаміку мікробних угруповань у ботанічних садах. Ці штучно створені екосистеми, які поєднують природні та культурні елементи, є особливо чутливими до впливу людини, оскільки знаходяться в безпосередньому контакті з урбанізованим середовищем. Водночас вони виступають своєрідними моделями для дослідження впливу антропогенних факторів на біорізноманіття, екологічну стійкість і процеси саморегуляції екосистем [36].

Зміни клімату, деградація середовища та урбанізаційний тиск призводять до втрати не лише флористичного, а й мікробного різноманіття, яке часто залишається “невидимою” складовою біорізноманіття. У ґрунтах ботанічних садів відбуваються значні зміни у складі мікробних консорціумів, зокрема в ризосфері різних видів рослин. Навіть незначне підвищення температури або коливання вологості змінюють співвідношення основних трофічних груп мікроорганізмів, знижуючи частку симбіотрофних форм (азотфіксаторів, мікоризоутворювачів) і сприяючи росту умовно-патогенних або сапрофітних бактерій. Порушення балансу між цими групами веде до дестабілізації біогеохімічних циклів, зокрема колообігу азоту та вуглецю, що проявляється у зниженні родючості ґрунту й стійкості рослин.

Забруднення важкими металами, нафтопродуктами, пестицидами та побутовими відходами, характерне для територій міських ботанічних садів, має токсичний вплив на ґрунтові мікроорганізми. Високі концентрації цинку, свинцю, кадмію, міді чи нікелю пригнічують активність ферментів (каталази, уреаз, фосфатази), зменшують чисельність азотфіксуючих і целюлозолітичних бактерій, а також порушують співвідношення між бактеріальною та грибною біомасою. Особливо негативно ці фактори позначаються на симбіотичних зв'язках рослин з мікроорганізмами — наприклад, на утворенні мікоризи у дубових насадженнях або бульбочкових симбіозів у бобових культур [37].

Під впливом ущільнення ґрунту внаслідок рекреаційного навантаження знижується його пористість і аерація, що обмежує розвиток аеробної мікрофлори й активізує анаеробні процеси бродіння. Це сприяє накопиченню токсичних органічних кислот, спиртів і летких сполук, які негативно впливають на кореневу систему рослин. Подібні процеси часто спостерігаються в старих ділянках ботанічних садів, де проводяться масові екскурсії чи заходи, і особливо відчутні у зонах навколо старих дубів — біоценотичних центрів, де ризосферні зв'язки мають ключове значення для екологічної стійкості.

Підкислення ґрунтів внаслідок атмосферних викидів, кислотних опадів або надмірного внесення мінеральних добрив порушує рівновагу між бактеріями та грибами, зменшує активність нітрифікаційних процесів і знижує доступність фосфору для рослин. При цьому зростає роль кислотостійких мікроорганізмів, зокрема актиноміцетів і мікроскопічних грибів, що може зумовити зміщення метаболічних процесів у бік уповільненої мінералізації органічної речовини.

Водночас ботанічні сади, як центри біорізноманіття і наукових досліджень, мають великі можливості для пом'якшення негативних ефектів антропогенного впливу. Застосування біоорганічних технологій — компостування, сидерації, мульчування, інтродукції симбіотичних штамів мікроорганізмів (*Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas*) — сприяє відновленню біологічної активності ґрунту. Розвиток практики екологічного

землекористування у ботанічних садах дозволяє підтримувати високий рівень мікробного різноманіття навіть в умовах урбанізованого середовища.

Особливої уваги потребують старі дубові насадження, які створюють стабільні мікроекологічні ніші з унікальними ризосферними мікробіомами. Дуб звичайний (*Quercus robur L.*) формує ектомікоризу з грибами родів *Boletus*, *Tuber*, *Laccaria*, які забезпечують надходження поживних речовин і захист від ґрунтових патогенів. Проте антропогенний тиск може руйнувати ці симбіотичні системи, знижуючи біохімічну активність ґрунту та сприяючи деградації мікробного різноманіття.

У сучасному розумінні ботанічні сади повинні розглядатись не лише як осередки збереження рослинного генофонду, а й як резервуари мікробного різноманіття, що забезпечує екологічну стабільність та здатність екосистем до самовідновлення. Для цього необхідно впроваджувати програми моніторингу стану ґрунтів, оцінки біологічної активності, вивчення структури мікробних угруповань і створення банків культур корисних мікроорганізмів.

Збереження мікробного різноманіття є складовою глобальної стратегії біокультурної консервації, яка об'єднує наукову, освітню та природоохоронну діяльність. Такий підхід дозволяє ботанічним садам не лише компенсувати негативний вплив урбанізації, а й виконувати роль “міських біоцентрів”, де зберігаються унікальні комплекси мікроорганізмів, адаптовані до змінених екологічних умов [38].

Таким чином, антропогенні фактори багатогранно впливають на різноманіття мікроорганізмів у ботанічних садах — від прямих токсичних ефектів до зміни трофічних і симбіотичних зв'язків. Проте саме ці установи мають потенціал стати осередками екологічної стабільності, що забезпечують збереження як флористичного, так і мікробного різноманіття через впровадження принципів біокультурної консервації та сталого природокористування.

1.9 Особливості впливу культури дуба на ґрунтову мікрофлору

Дуб звичайний (*Quercus robur L.*) є однією з домінантних деревних порід у лісових екосистемах помірної зони та основним формоутворюючим видом у багатьох ботанічних садах України. Його біологічні особливості — глибока коренева система, тривале життя, велика біомаса листя та інтенсивне опадоутворення — створюють у ґрунті специфічні умови, які визначають склад, активність і функціональну структуру мікробних угруповань.

Ризосфера дуба є важливим осередком біологічної активності, де формується високоспеціалізований мікробіом. Кореневі екsudати дуба містять органічні кислоти, амінокислоти, фенольні сполуки, дубильні речовини та фітонциди, які чинять вибірковий вплив на розвиток різних груп мікроорганізмів. У результаті цього під насадженнями дуба переважають гриби, актиноміцети та бактерії, здатні до стійкого існування у середовищі з підвищеною кислотністю та вмістом фенолів.

Серед мікроорганізмів, асоційованих із дубом, важливе місце посідають мікоризні гриби, які утворюють з коренями симбіотичні зв'язки, покращуючи поглинання фосфору, азоту та мікроелементів. Мікориза дуба є як ектотрофною (характерною для старих дерев), так і ендотрофною (для молодих сіянців). Її розвиток забезпечує стабільність ґрунтової структури, покращує вологоутримання та захищає кореневу систему від патогенних мікроорганізмів.

Дубова підстилка відіграє важливу роль у формуванні мікробних комплексів. Листя дуба містить значну кількість дубильних речовин, лігніну та целюлози, тому його розклад відбувається повільно і супроводжується активним розвитком целюлозолітичних грибів (*Trichoderma*, *Penicillium*, *Aspergillus*) та актиноміцетів. Ці мікроорганізми беруть участь у гуміфікації органічної

речовини, утворюючи стабільні гумінові сполуки, що підвищують родючість ґрунту.

Під насадженнями дуба спостерігається підвищена ферментативна активність ґрунту, зокрема активність каталази, уреаз та фосфатази, що свідчить про високий рівень мікробного метаболізму. Водночас дубові насадження характеризуються підвищеним вмістом фенольних кислот (галової, протокатехової, ферулової), які можуть пригнічувати активність окремих груп мікроорганізмів, особливо нітрифікаторів. Це зумовлює більш повільний цикл азоту, характерний для старих лісів і природних біоценозів [39].

Дослідження вітчизняних мікробіологів підтверджують, що у ризосфері деревних культур, зокрема дуба, спостерігається тісний взаємозв'язок між азотфіксувальними, денітрифікувальними й целюлозолітичними мікроорганізмами. Оптимальні умови розвитку дуба — помірне зволоження, нейтрально-кислотний рН і наявність органічних залишків — сприяють підтриманню рівноваги між цими групами. Надмірне антропогенне навантаження (ущільнення ґрунту, внесення високих доз мінеральних добрив або забруднення важкими металами) може порушувати цю рівновагу, спричиняючи зниження чисельності симбіотичних форм і переважання сапрофітних або патогенних видів.

Особливістю дубових екосистем є формування специфічного мікробного «підпису» — стабільного складу мікроорганізмів, характерного лише для цього виду. До таких належать роди *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Arthrobacter*, а серед грибів — *Tuber*, *Boletus*, *Laccaria* та *Cenococcum*, які формують мікоризні асоціації. Їхнє існування підтримується завдяки постійному надходженню органічних субстратів і взаємообміну метаболітами з кореневою системою дуба.

У ботанічних садах культури дуба виконують не лише естетичну, а й екологічну функцію — вони є “біоцентрами” мікробного різноманіття, які стабілізують біогеохімічні процеси в ґрунті. Завдяки потужній кореневій системі дуб забезпечує глибоке проникнення кисню в ґрунт, стимулюючи аеробні

процеси мінералізації, а також сприяє формуванню мікроклімату, сприятливого для розвитку мікробіоти.

Культура дуба чинить багатосторонній вплив на ґрунтову мікрофлору: створює сприятливі умови для розвитку симбіотичних мікроорганізмів, сприяє накопиченню гумусу, стабілізує екологічну рівновагу ризосфери, але при цьому формує специфічні обмеження для розвитку окремих мікробних груп через виділення фенольних сполук. Розуміння цих процесів є основою для підтримання біологічної активності ґрунтів ботанічних садів і забезпечення сталого функціонування дубових насаджень [40].

2 МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА УМОВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Об'єкт та місце проведення досліджень

Місцем проведення дослідження є Ботанічний сад ДНУ ім. О. Гончара, розташований у центральній частині міста Дніпра на правобережному схилі Дніпра. Він був заснований у 1930–1931 роках як науково-дослідна база університету та згодом перетворений на заповідну територію загальнодержавного значення. Загальна площа саду становить близько 30 га, частина з яких відведена під відкриті експозиції, а решта — під науково-дослідні ділянки з обмеженим антропогенним впливом. На території саду представлені насадження дерев і чагарників різного віку, зокрема старовікові дуби, які формують стабільні напівприродні екосистеми з власними ґрунтовими процесами, циклом органічної речовини та мікробною динамікою [41].

Ботанічний сад поєднує наукову, освітню та природоохоронну діяльність, виступає центром інтродукції рослин з різних географічних зон і збереження рідкісних та зникаючих видів. Колекційний фонд налічує кілька тисяч видів, сортів і форм рослин, серед яких трапляються унікальні дендрологічні та флористичні таксони. Значну частину території займають дендрологічні насадження, представлені широким різноманіттям листяних і хвойних порід, у тому числі екзотичними та реліктовими видами. У науковій зоні збережено умови, максимально наближені до природних, що дає змогу вивчати екологічні та мікробіологічні процеси в ґрунтах із мінімальним втручанням людини [42].

На рисунку 2.1 зображено територію Ботанічний сад ДНУ ім. О. Гончара

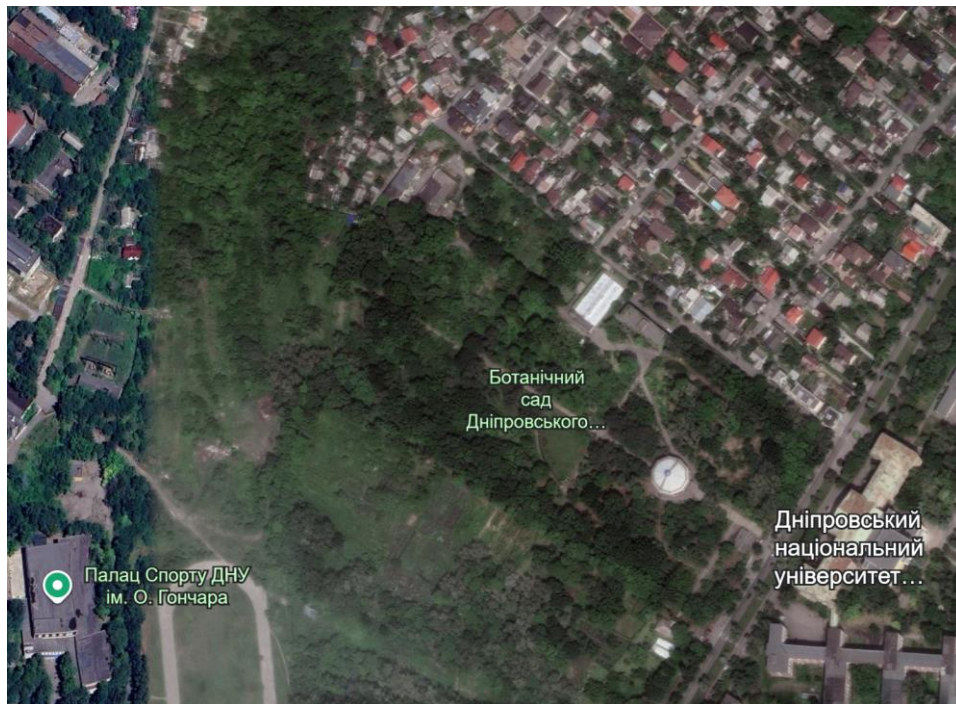


Рисунок 2.1 - Територія Ботанічного саду ДНУ ім. О. Гончара

Дослідження мікробного різноманіття ґрунту проводилися під дубовими насадженнями, оскільки ця рослина створює стабільний мікроклімат, значну кількість органічного опаду та має виражений вплив на ґрунтові мікробіоценози. Зразки відбиралися кілька разів протягом сезону, що дозволило простежити динаміку мікробних угруповань та їхню реакцію на літню посуху, характерну для року досліджень. Відомо, що в посушливих умовах процеси розкладання органічної речовини уповільнюються, що призводить до нерівномірного надходження поживних речовин і формування специфічної структури мікробного різноманіття.

Об'єктом дослідження є ґрунтове мікробне різноманіття, що формується в зоні кореневої системи деревної культури *Quercus robur* (син. *Quercus pedunculata*) у межах ботанічного саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Мікроорганізми ґрунту під дубом перебувають у постійній взаємодії з корневими виділеннями, листовим опадом, мікрофауною та фізико-хімічними характеристиками ґрунту, які визначають структуру, чисельність і функціональну активність мікробних угруповань.

Специфіка рослини формує унікальний мікробіологічний простір: окремі мікроорганізми отримують сприятливі умови для розвитку, інші — пригнічуються. Кореневі виділення дуба, продукти розкладу листя та вторинні метаболіти визначають особливості живлення мікробів і спрямованість мікробних процесів, зокрема амоніфікації, нітрифікації та мінералізації органічних речовин. У свою чергу, мікроорганізми забезпечують рослину доступними формами мінерального живлення, формуючи стійку систему взаємодії у якій кожна ланка є критично важливою для підтримання екосистемної рівноваги.

У межах дослідження проби ґрунту були відібрані у п'яти точках під дубовими насадженнями, що розташовані в різних секторах ботанічного саду. Такий вибір точок дозволив охопити ділянки з різними умовами зволоження, затіненості, щільності рослинного покриву та рівнем антропогенного впливу. Загалом територія ботанічного саду поділена на 37 секторів, згрупованих у 4 групи та 6 підгруп залежно від типу рослинності та особливостей ґрунтового покриву.

На рисунку 2.2 зображено точки відбору зразків ґрунту на території Ботанічного саду ДНУ ім. О. Гончара.

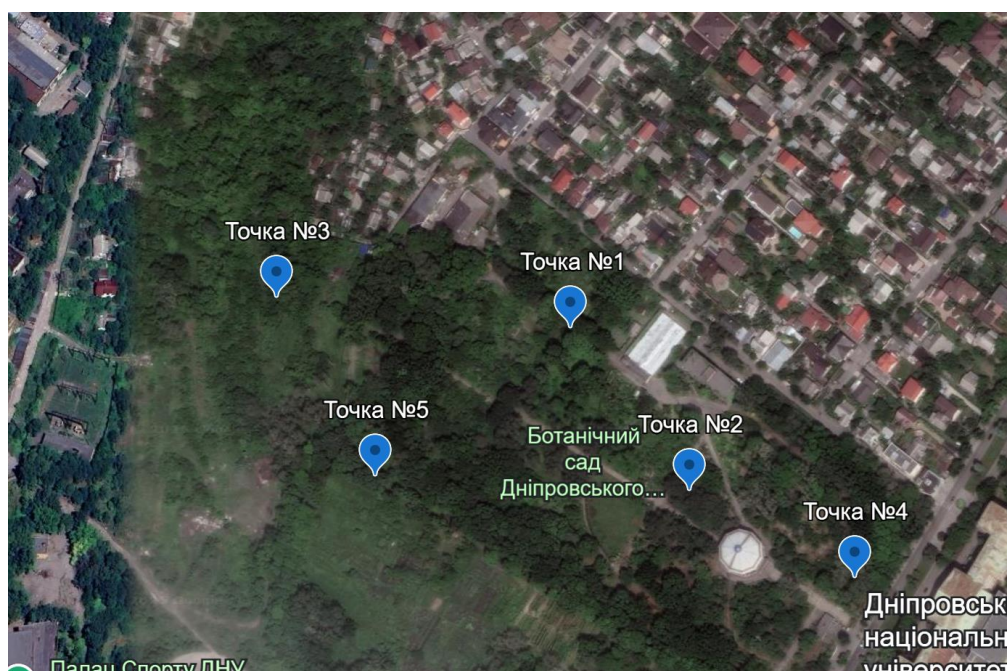


Рисунок 2.2 - Точки відбору зразків ґрунту на території Ботанічного саду ДНУ ім. О. Гончара.

Стандартизований відбір ґрунту з п'яти секторів забезпечив можливість порівняти мікробне різноманіття, визначити його динаміку та оцінити, як екологічні умови кожної ділянки впливають на формування мікробних спільнот під дубом.

2.2 Кліматичні та ґрунтові умови території

Територія ботанічного саду Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара розташована в зоні степового Придніпров'я, яке характеризується помірно континентальним кліматом із чітко вираженими сезонами та значними контрастами температур. Кліматичні умови безпосередньо впливають на інтенсивність ґрунтових процесів, динаміку мікробіологічної активності та сезонний розвиток рослинності, що є важливим з огляду на дослідження мікробного різноманіття.

Клімат регіону відзначається спекотним і тривалим літом, під час якого середньомісячна температура сягає $+22\dots+24$ °С, а максимальні температури часто перевищують $+30$ °С. Літній період супроводжується зниженим рівнем атмосферних опадів та тривалими посушливими інтервалами, що призводить до пересихання верхнього шару ґрунту та зниження активності частини мезофільних ґрунтових мікроорганізмів. У рік дослідження посуха була особливо вираженою, що вплинуло на темпи розкладання органічних залишків, сповільнило мінералізацію та, відповідно, змінило динаміку доступності поживних речовин для рослин та мікробіоти.

Зима у регіоні м'яка, середньомісячні температури січня коливаються у межах $-4\dots-6$ °С, проте характерною є нестійкість погодних умов: часті відлиги, короткочасні заморозки та невелика кількість снігового покриву. Нестійкий сніговий покрив знижує можливість природної ізоляції ґрунту від промерзання, що впливає на стан ґрунтової біоти. Перехідні сезони — весна і осінь —

характеризуються значними температурними коливаннями та зміною вологості, що визначає активізацію мікробіологічних процесів, особливо навесні.

В таблиці 2.1 наведені дані про середньомісячну температуру повітря метеостанцією «Дніпро».

Таблиця 2.1 – Середньодекадна температура повітря в Дніпровському районі за 2025 рік

Місяць	Температура повітря по декадам, С°		
	I	II	III
Січень	-2,0	-1,4	-2,3
Лютий	-1,9	0,2	1,1
Березень	2,7	4,3	6,8
Квітень	8,5	9,8	12,0
Травень	14,1	16,7	19,2
Червень	22,4	24,1	25,0
Липень	27,8	29,3	30,1
Серпень	28,6	29,0	27,4
Вересень	18,5	17,1	16,4
Жовтень	11,8	9,7	8,9

Річна кількість опадів становить 400–500 мм, із чіткою перевагою літніх зливових дощів. Однак значна частина цих опадів швидко випаровується через високі температури та проникні ґрунти.

Вологість ґрунту є одним із найважливіших факторів формування мікробних угруповань, адже водний режим визначає доступність кисню, швидкість розкладання органічних речовин і можливість функціонування різних екологотрофічних груп мікроорганізмів [43].

У таблиці 2.2 наведено дані про середньодекадну кількість опадів за метеостанцією «Дніпро»

Таблиця 2.2 – Середньодекадна кількість опадів в Дніпровському районі за метеостанцією «Дніпро» за 2025 рік

Місяць	Кількість опадів, мм		
	I	II	III
Січень	7	12	5
Лютий	6	9	14
Березень	10	18	12
Квітень	22	28	40
Травень	15	32	48
Червень	25	36	55
Липень	18	42	60
Серпень	20	30	18
Вересень	12	22	15
Жовтень	30	35	28

Грунтовий покрив території ботанічного саду представлений переважно чорноземами звичайними та слабковилуженими, сформованими на лесових породах. Ці ґрунти відзначаються високим вмістом гумусу, сприятливою структурою, доброю аерацією та водопроникністю. Завдяки цьому вони створюють оптимальні умови для розвитку як корневих систем деревних рослин, так і численних мікроорганізмів, які беруть участь у кругообігу речовин. Високий вміст органічної речовини визначає значну активність процесів гуміфікації та мінералізації — ключових для формування поживного середовища під дубовими насадженнями [44].

Проте у межах саду існує значна мозаїчність ґрунтових характеристик, обумовлена мікрорельєфом, різною щільністю деревостанів, тіньовим режимом та інтенсивністю антропогенного догляду. На верхніх частинах схилу ґрунти швидше пересихають, що знижує сумарну чисельність частини мікробних груп, тоді як у нижніх частинах схилів утримується більше вологи та органічного опаду, що сприяє розвитку більш різноманітних мікробних спільнот. Значний

вплив мають і самі деревні рослини: дубові насадження формують товстий шар листової підстилки, яка повільно розкладається та є довготривалим джерелом органічної речовини для ґрунтової мікрофлори [45].

Також важливим чинником є антропогенний вплив, пов'язаний із доглядом за територією: у деяких секторах саду ґрунт періодично розпушується, в окремих випадках удобрюється, або зазнає навантаження від відвідувачів. Ці чинники можуть зменшувати різноманіття мікробних угруповань, сприяючи домінуванню видів, здатних витримувати стресові умови та конкуренцію у збідненому біоценозі. Навпаки, ділянки з мінімальним втручанням людини характеризуються більш багатим видом складом, що забезпечує стійкість ґрунтової екосистеми до факторів стресу [46].

Кліматичні та ґрунтові умови території ботанічного саду формують комплекс природних і антропогенних факторів, які визначають особливості розвитку мікробної спільноти під дубовими насадженнями. Поєднання родючих чорноземів, континентального клімату з періодичними посухами та мозаїчної структури рослинного покриву створює унікальні умови для дослідження взаємодії «рослина — ґрунт — мікроби» та дозволяє виявити закономірності формування мікробного різноманіття в різних екологічних нішах ботанічного саду.

2.3 Відбір і підготовка ґрунтових проб

Відбір ґрунтових проб на території Ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара здійснювали відповідно до вимог національних стандартів ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбір проб», ДСТУ ISO 10381-6:2004 «Якість ґрунту [47]. Відбір проб. Частина 6. Настанови щодо відбору проб для біологічних досліджень» та ДСТУ ISO 11464:2007 «Якість ґрунту. [48]. Попередня підготовка проб», які регламентують порядок, глибину, кратність і умови

відбору зразків для проведення подальших мікробіологічних аналізів. Дотримання визначених стандартами процедур дозволило отримати репрезентативний ґрунтовий матеріал, що точно відображає структурно-функціональні особливості мікробних угруповань, характерних для місця відбору. Зразки ґрунту відбирали в межах прикореневої зони дуба (*Quercus robur* L.), оскільки саме ризосфера є найбільш біологічно активною частиною ґрунтового профілю, де формуються мікробні ценози, безпосередньо пов'язані з корневими виділеннями рослини.

Кореневі екsudати визначають характер мікробних асоціацій, впливають на їхню чисельність, домінування окремих видів та загальну структуру мікробіоценозу. Відомо, що рослина через кореневі виділення створює специфічне середовище, яке може стимулювати або пригнічувати певні групи мікроорганізмів, формуючи таким чином стабільний мікробний комплекс, що забезпечує мінералізацію органічних речовин і доступність поживних елементів. Тому дослідження ґрунту саме в межах ризосфери дуба дозволяє найбільш точно оцінити мікробне різноманіття та з'ясувати особливості взаємодії в системі «ґрунт–мікроорганізм–рослина».

Відбір ґрунту проводили з глибини 0–20 см, що відповідає стандартам біологічного моніторингу ґрунтів і рекомендується для визначення активності ґрунтових мікроорганізмів, які зосереджені переважно у верхньому гумусовому горизонті. Відстань між точками відбору становила 100–150 м, що дозволяло врахувати просторову неоднорідність ґрунтових умов ботанічного саду, різну щільність насаджень, особливості освітлення й вологості, а також незначні локальні зміни у структурі ґрунтового покриву. У кожній точці формували усереднену пробу шляхом змішування кількох точкових відборів, що забезпечувало більш точну характеристику ґрунту як середовища проживання мікроорганізмів. Відібрані зразки поміщали у стерильні поліетиленові контейнери, маркували згідно з методичними вимогами та транспортували до лабораторії у термоконтейнері, що запобігало змінам мікробіологічних показників під впливом температурних коливань та забезпечувало збереження

природного складу мікробного угруповання до моменту проведення лабораторних аналізів.

Первинну лабораторну підготовку проб здійснювали згідно з ДСТУ ISO 11464:2007, включаючи видалення крупних рослинних решток, камінців та інших домішок, подрібнення грудок, просіювання через стерильне сито з діаметром комірок 1–2 мм та приведення вологості ґрунту до стандартних лабораторних умов. Після усереднення проб проводили виготовлення серійних ґрунтових суспензій, які використовували для висівання на селективні агаризовані живильні середовища. Метод серійних розведень і подальше висівання на тверді середовища є класичним у ґрунтовій мікробіології та широко застосовується для оцінювання чисельності основних функціональних груп мікроорганізмів. У дослідженні застосовували агаризовані поживні середовища, рекомендовані для виділення відповідних груп мікроорганізмів: м'ясо-пептонний агар (МПА) — для визначення кількості бактерій, що беруть участь у розкладанні органічних азотовмісних сполук; крохмале-аміачний агар (КАА) — для обліку бактерій-імобілізаторів мінерального азоту; картопляно-глюкозний агар (КГА) — для визначення чисельності грибів і мікроміцетів, які є важливими учасниками процесів трансформації органічної речовини. Інкубацію проводили при оптимальній температурі 28–30 °С, після чого здійснювали підрахунок колонієутворюючих одиниць (КУО) з подальшим перерахунком на 1 г абсолютно сухого ґрунту.

2.4 Методи мікробіологічного аналізу ґрунту

Мікробіологічний аналіз ґрунту під культурою дуба (*Quercus robur* L.) здійснювали з використанням комплексу методів, що дозволяють охарактеризувати чисельність, структурно-функціональну організацію та різноманіття ґрунтових мікроорганізмів. Основою дослідження був метод

серійних розведень ґрунтових суспензій із подальшим висіванням на селективні агаризовані живильні середовища, що є загальноприйнятим у ґрунтовій мікробіології для оцінювання кількісних параметрів мікробних угруповань [49].

Для визначення загальної чисельності бактерій, здатних до мінералізації органічних сполук, застосовували м'ясо-пептонний агар (МПА). Оскільки азотний цикл відіграє важливу роль у функціонуванні ризосферного ґрунту, окремо обліковували чисельність бактерій-імобілізаторів мінерального азоту шляхом висівання на крохмале-аміачний агар (КАА). Важливу групу ґрунтових мікроорганізмів становлять мікроміцети, які беруть участь у розкладі складних полімерних субстратів; їх кількість визначали на картопляно-глюкозному агарі (КГА). Підрахунок колонієутворюючих одиниць (КУО) проводили після періоду інкубації з подальшим перерахунком на 1 г абсолютно сухого ґрунту, що дозволяло оцінити інтенсивність розвитку основних функціональних груп мікробіоти [50].

Оскільки мікробні угруповання характеризуються значною просторовою мінливістю, у методиці передбачали обов'язкове порівняння чисельності мікроорганізмів у різних точках відбору. Отримані дані використовували для аналізу просторової неоднорідності мікробіоценозу під дубовими насадженнями та для виявлення локальних особливостей, пов'язаних із мікрокліматом, структурою ґрунтового профілю та можливим антропогенним навантаженням.

З метою оцінювання сезонних змін у розвитку мікробних угруповань дослідження проводили у кілька періодів протягом вегетаційного сезону. Такий підхід дозволяв простежити коливання чисельності основних груп мікроорганізмів залежно від погодних умов, зокрема літньої посухи, яка істотно впливає на інтенсивність мікробіологічних процесів у верхньому шарі ґрунту.

Для оцінки біологічної активності ґрунту використовували кількісні співвідношення між різними групами мікроорганізмів. На основі отриманих даних розраховували коефіцієнти, що характеризують спрямованість мікробіологічних процесів у ґрунті, зокрема інтенсивність мінералізації органічних речовин та рівень трансформації азотовмісних сполук. Такі

показники дозволяють судити про функціональний стан ґрунтової екосистеми та її здатність забезпечувати рослину доступними формами елементів живлення.

Для встановлення рівня мікробного різноманіття використовували індекс Шеннона (H), який враховує як чисельність мікроорганізмів, так і рівномірність їхнього розподілу серед різних функціональних груп. Розрахунок цього показника дозволяв оцінити стійкість мікробного угруповання, його здатність до саморегуляції та потенційну екологічну стабільність у мінливих умовах середовища [51].

Комплекс застосованих методів дав можливість не лише визначити чисельні показники мікроорганізмів, але й охарактеризувати специфіку формування мікробного ценозу під дубом, враховуючи вплив корневих виділень, структури підстилки, вологості ґрунту та інших екологічних чинників.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Чисельність ґрунтових мікроорганізмів під культурою дуба

Упродовж вегетаційного періоду на території ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара було виконано серійний відбір ґрунтових проб під дубом звичайним з метою оцінки сезонної динаміки чисельності ґрунтових мікроорганізмів. Регулярне повторення відборів дозволило простежити зміни активності ґрунтових мікроорганізмів у різні періоди сезону та визначити вплив локальних екологічних умов на структуру мікробного угруповання.

У таблиці 3.1 наведено дані про чисельність актиноміцетів у ґрунті під дубом звичайним на дослідних ділянках ботанічного саду в млн КУО на 1 г ґрунту.

Таблиця 3.1 - Чисельність актиноміцетів у ґрунті під дубом звичайним на дослідних ділянках ботанічного саду в КУО на 1 г ґрунту.

Варіант (ділянка)	Шар, см	Актиноміцети, млн КУО/г
Контроль	0–5	0,17 ± 0,035
	5–10	0,25 ± 0,06
Ділянка 1	0–5	0,34 ± 0,096
	5–10	0,29 ± 0,11
Ділянка 2	0–5	0,51 ± 0,104
	5–10	0,16 ± 0,04
Ділянка 3	0–5	0,79 ± 0,20
	5–10	0,26 ± 0,08

Ділянка 4	0–5	0,26 ± 0,082
	5–10	0,48 ± 0,19
Ділянка 5	0–5	0,45 ± 0,12
	5–10	0,33 ± 0,09

Дані демонструють характерні коливання чисельності мікробіоти, зумовлені зміною погодних умов та особливостями мікросередовища під пологом дерева.

Особливо помітним є зниження кількості актиноміцетів у літній період. Це пов'язано з тривалими посушливими умовами, характерними для сезону, які негативно впливають на цю групу мікроорганізмів, що віддає перевагу більш зволоженим субстратам. У результаті їх активність значно пригнічується.

Представлені дані показують, як сезонні зміни та специфічні мікрокліматичні умови можуть суттєво впливати на структуру мікробного угруповання ґрунту під дубом звичайним.

Мікроміцети відіграють надзвичайно важливу роль у функціонуванні ґрунтових екосистем, оскільки беруть активну участь у процесах мінералізації органічних решток, розкладанні складних біополімерів та мобілізації поживних елементів. Саме тому їх чисельність, просторовий розподіл і сезонна варіабельність виступають чутливими індикаторами екологічного стану ґрунту та змін у мікробному середовищі. Навіть незначні коливання умов вологості, температури або доступності субстратів здатні суттєво впливати на активність і структуру мікроміцетних угруповань.

На території ботанічного саду дослідження проводили під пологом дуба звичайного, де мікроклімат формує унікальні умови для розвитку ґрунтових мікроорганізмів. У рамках спостережень оцінювали чисельність мікроміцетів у різних ґрунтових горизонтах та на ділянках з різним рівнем антропогенного навантаження. Це дозволяє зіставити вплив локальних екологічних факторів і визначити загальні тенденції у формуванні мікобіоти під деревною рослинністю.

У таблиці 3.2 наведено дані про чисельність мікроміцетів у ґрунті під дубом звичайним на дослідних ділянках ботанічного саду в КУО на 1 г ґрунту.

Таблиця 3.2 - Чисельність мікроміцетів у ґрунті під дубом звичайним на дослідних ділянках ботанічного саду в КУО на 1 г ґрунту.

Варіант (ділянка)	Шар, см	Гриби КАА, тис.	Гриби ЧА, тис.
Контроль	0–5	1,30 ± 0,53	1,03 ± 0,11
	5–10	2,30 ± 0,94	0,87 ± 0,82
Ділянка 1	0–5	1,23 ± 0,29	4,30 ± 0,58
	5–10	2,34 ± 0,50	2,50 ± 0,22
Ділянка 2	0–5	1,10 ± 0,45	0,50 ± 0,07
	5–10	1,70 ± 0,70	0,70 ± 0,08
Ділянка 3	0–5	3,00 ± 1,20	0,13 ± 0,02
	5–10	0,30 ± 0,12	0,33 ± 0,11
Ділянка 4	0–5	0,83 ± 0,041	3,07 ± 0,041
	5–10	1,13 ± 0,29	1,50 ± 0,44
Ділянка 5	0–5	2,10 ± 0,68	2,60 ± 0,34

Отримані дані показують, що посушливе літо сприяло активізації ґрунтових грибів. За умов дефіциту вологи бактеріальні угруповання частково втрачали активність, тоді як мікроміцети, більш стійкі до таких стресів, отримували перевагу. Це видно за підвищеною чисельністю грибів на ділянках 1, 4 і 5.

На ділянках 2 і 3 рівень мікроміцетів був нижчим, але навіть там у шарі 5–10 см зберігалася стабільна грибна активність. Вертикальні відмінності підтверджують, що мікроміцети краще виживають у глибших шарах ґрунту, де умови менш схильні до висихання.

Бактеріальні угруповання ґрунту забезпечують ключові етапи перетворення органічних і мінеральних речовин та підтримують його родючість. Різні групи бактерій виконують важливі функції в мінералізації органіки, розкладанні складних сполук і регуляції азотного та фосфорного циклів.

У таблиці 3.3 наведено дані про чисельність основних груп ґрунтових бактерій у різних ділянках ботанічного саду (КУО/г $\times 10^5$).

Таблиця 3.3 - Чисельність основних груп ґрунтових бактерій у різних ділянках ботанічного саду (КУО/г $\times 10^5$)

Варіант	Шар, см	Гетеротрофи	Споруутворюючі	Грамнегативні	Амоніфікатори	Нітрифікатори	Денітрифікатори	Фосфатмобілізу	Азотфікатори
Контроль	0–5	6,8	6,0	20,1	12,0	6,8	22,9	0,4	18,2
	5–10	5,6	5,1	18,4	10,3	5,9	20,7	0,3	15,7
Ділянка 1	0–5	7,2	6,8	19,3	12,8	7,1	21,4	0,6	16,7
	5–10	6,5	6,2	18,0	11,5	6,4	20,1	0,5	15,2
Ділянка 2	0–5	8,0	7,1	16,2	14,3	5,8	19,8	0,7	17,5
	5–10	6,4	5,9	15,4	11,0	5,1	18,7	0,4	14,4
Ділянка 3	0–5	9,1	7,8	13,0	15,0	4,2	17,2	0,8	19,1
	5–10	7,0	6,4	12,8	12,3	4,0	16,0	0,5	13,0
Ділянка 4	0–5	6,5	5,7	17,0	11,9	5,0	19,3	0,6	14,8
	5–10	5,9	5,2	15,9	10,5	4,7	17,5	0,4	12,7
Ділянка 5	0–5	8,5	7,2	21,0	13,5	7,3	23,4	0,7	18,9
	5–10	7,3	6,8	19,7	12,0	6,0	21,0	0,5	16,2

Отримані дані свідчать, що бактерійні угруповання на всіх досліджених ділянках характеризуються значною різноманітністю та стабільністю, хоча їхня чисельність суттєво варіює залежно від локальних умов. У верхньому горизонті (0–5 см) майже всі групи бактерій трапляються у вищих концентраціях, що пов'язано з кращою аерацією, більшою кількістю органічних решток і інтенсивнішими корневими виділеннями.

На окремих ділянках спостерігається підвищення активності азотфіксаторів, що може бути наслідком більш сприятливих умов для

симбіотичних і вільноживучих форм. Натомість чисельність нітрифікаторів та денітрифікаторів чутливо реагує на зміни вологості, що вказує на динамічний характер азотного циклу в межах ботанічного саду. Підвищені показники грамнегативних та гетеротрофних бактерій на деяких ділянках свідчать про інтенсивні процеси розкладання органічних субстратів.

3.2 Порівняння мікробних угруповань у точках відбору

Для виявлення подібності між точками відбору було проведено ієрархічну кластеризацію за основними мікробіологічними показниками, що включають вісім функціональних груп бактерій. Аналіз дав змогу оцінити структурну подібність мікробних угруповань у різних ділянках та горизонтах ґрунту й побудувати дендрограму, яка відображає ступінь їх схожості або відмінності.

На рисунку 3.1 зображено дендрограму кластеризації точок відбору у ботанічному саду ДНУ ім. Олесья Гончара.

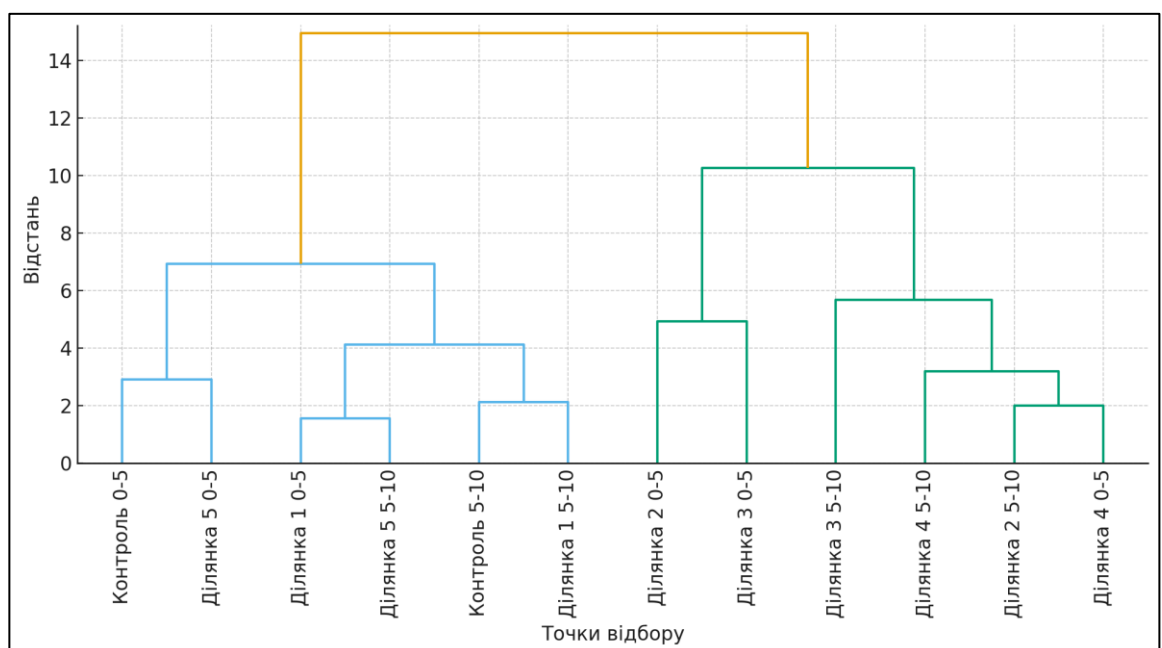


Рисунок 3.1 - Дендрограма кластеризації точок відбору у ботанічному саду ДНУ ім. Олесья Гончара.

Дендрограма демонструє чітке групування точок відбору залежно від подібності мікробіологічних показників. Перший великий кластер об'єднує контрольні зразки та ділянку 1, що характеризуються вищими значеннями грамнегативних бактерій, денітрифікаторів та азотфіксаторів, що свідчить про відносно стабільний і збалансований мікробний комплекс. Другий кластер формують ділянки 2, 3 та 4, для яких характерна знижена чисельність нітрифікаторів і грамнегативних форм та водночас підвищена роль амоніфікаторів і фосфатмобілізуючих бактерій, що вказує на інший тип мікробної функціональності. Спостерігається також певна подібність між зразками верхнього і нижнього горизонтів у межах однієї ділянки, хоча на окремих ділянках (зокрема 3 та 5) між ними фіксуються суттєвіші відмінності, ймовірно зумовлені неоднорідністю органічних субстратів та різною інтенсивністю корневих виділень. Загалом дендрограма відображає просторову неоднорідність мікробіоценозу ґрунтів ботанічного саду та дозволяє виділити ділянки, близькі або контрастні за структурою бактеріальних угруповань.

У проведених дослідженнях було застосовано аналіз головних компонент (Principal Component Analysis, PCA) як ключову статистичну технологію багатовимірної обробки мікробіологічних даних. Цей метод дав змогу зменшити кількість вихідних показників без суттєвої втрати інформації та виявити приховані структурні закономірності у мікробних комплексах ґрунту. PCA ґрунтується на формуванні нових змінних — головних компонент, які є лінійними комбінаціями первинних параметрів та пояснюють найбільшу частку варіації в системі. Застосування цієї технології дозволило нам ефективно встановити відмінності між досліджуваними ділянками, оцінити вплив глибини відбору та візуалізувати просторову організацію функціональних груп бактерій.

На основі стандартизованих значень восьми функціональних груп мікроорганізмів ми сформуваємо дві головні компоненти, що відобразили найбільшу частку загальної дисперсії та забезпечили виразне групування зразків у двовимірному просторі.

На рисунку 3.2 зображено дані аналізу головних компонент у головних мікробних комплексах з дослідних ділянок ботічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара.

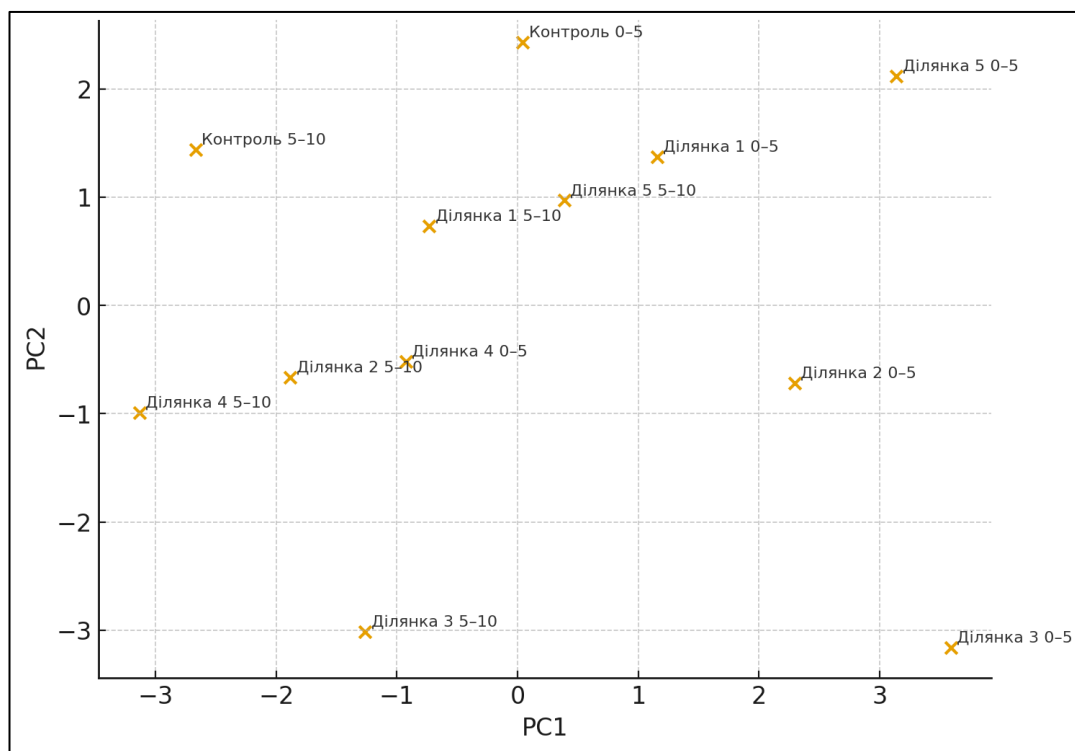


Рисунок 3.2 - Аналіз головних компонент у головних мікробних комплексах з дослідних ділянок ботічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара

Аналіз показав нерівномірне розташування ґрунтових мікроорганізмів, що свідчить про чітку структурованість мікробних угруповань. Контрольні зразки та частина матеріалу з ділянки 1 тяжіли до верхньої частини графіка завдяки підвищеній чисельності грамнегативних бактерій і денітрифікаторів та стабільним рівням гетеротрофів і азотфіксаторів. Це вказує на збалансований мікробний комплекс і сприятливі умови для інтенсивного мікробіологічного кругообігу азоту. Водночас зразки ділянки 3, насамперед із горизонту 0–5 см, розміщувалися на протилежному полюсі першої компоненти через високі значення амоніфікаторів та низьку чисельність грамнегативних форм і нітрифікаторів, що свідчить про домінування процесів первинної мінералізації та менш активну нітрифікацію.

Зразки ділянок 2 та 4 утворювали компактні групи в центральній та нижній частинах графіка. Для них ми виявили помірні концентрації більшості мікробних груп та специфічне співвідношення між амоніфікаторами, фосфатмобілізуючими та нітрифікуючими бактеріями, що може бути пов'язано з особливостями трофічного режиму й умовами зволоження. Для ділянки 5 зафіксовано змішаний тип мікробної організації: верхній горизонт (0–5 см) характеризувався високими рівнями грамнегативних і денітрифікувальних бактерій, тоді як глибший горизонт (5–10 см) формувал кластер, подібний до зразків ділянки 1.

Загалом результати аналізу, отримані в ході нашої роботи, засвідчили виразну просторову диференціацію мікробних комплексів залежно від ділянки та глибини відбору. Верхні горизонти майже на всіх досліджуваних ділянках проявили вищу мікробіологічну активність, тоді як нижні шари формували окремі підгрупи, що відображає зниження доступності органічної речовини та модифікацію кисневого режиму.

3.3 Сезонна динаміка мікробних угруповань

Сезонні зміни абіотичних умов, зокрема температури, вологості та динаміки органічної речовини, суттєво впливають на структуру й функціональну активність ґрунтових мікробних угруповань. Оскільки мікроорганізми є ключовими регуляторами процесів мінералізації, трансформації азоту, фосфору та деструкції органічних сполук, аналіз їхньої сезонної поведінки дозволяє глибше зрозуміти екосистемні механізми ґрунтоутворення та стабільності ґрунтових мереж. З огляду на це було проведено дослідження динаміки основних фізіологічних груп мікроорганізмів упродовж річного циклу.

В таблиці 3.4 наведено результати дослідження сезонної динаміки мікробних угруповань на дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара.

Таблиця 3.4 - Дослідження сезонної динаміки мікробних угруповань на дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара в КУО на 1 г ґрунту.

Період	Актиноміцети	Нітрифікатори	Денітрифікатори	Фосфатмобілізуючі	Азотфіксатори	Мікроміцети	Грамнегативні бактерії	Співвідношення бактерії/гриби
Весняний період	0,48	6,7	22,5	0,42	17,8	0,13	20,0	~525
Літній період	0,32	5,1	20,1	0,33	15,2	0,26	18,1	~355
Осіньний період	0,41	6,0	21,3	0,49	16,9	0,18	19,1	~383
Зимовий період	0,45	6,4	21,8	0,44	16,4	0,15	19,4	~440

Навесні відзначається найвищий сумарний рівень бактеріальної активності, що обумовлено оптимальною вологістю ґрунту та поступовим підвищенням температури. Чисельність актиноміцетів становила $0,48 \cdot 10^6$ КУО/г, що свідчить про активізацію деструкційних процесів після зимового періоду. Нітрифікатори та денітрифікатори також характеризувалися високими показниками (6,7 та $22,5 \cdot 10^6$ КУО/г відповідно), що вказує на інтенсивне відновлення циклу мінералізації азоту.

Фосфатмобілізуючі мікроорганізми демонстрували помірну активність ($0,42 \cdot 10^6$ КУО/г), що узгоджується зі збільшенням доступності органічного фосфору після танення снігу та розкладу рослинного опаду. Чисельність грибів була порівняно низькою ($0,13 \cdot 10^3$ КУО/г), що є типовим для ранньої весни, коли грибні мережі лише відновлюють активність після холодного сезону. Унаслідок цього співвідношення «бактерії/гриби» було максимальним серед усіх сезонів

(~525), що вказує на переважання бактеріального шляху трансформації органічної речовини в цей період.

Літо характеризувалося істотним зниженням чисельності більшості бактеріальних груп, що зумовлено посушливими умовами та перегріванням верхнього шару ґрунту. Чисельність актиноміцетів та нітрифікаторів зменшилася до $0,32$ і $5,1 \cdot 10^6$ КУО/г відповідно, тоді як денітрифікатори знизили активність до $20,1 \cdot 10^6$ КУО/г. Подібна тенденція спостерігалася й у групі N_2 -фіксаторів та грамнегативних бактерій, які є найбільш чутливими до зневоднення.

На противагу бактеріям, гриби продемонстрували максимальну сезонну активність, досягаючи $0,26 \cdot 10^3$ КУО/г. Це узгоджується з даними літератури, згідно з якими грибні організми мають вищу толерантність до низької вологості та здатні ефективно функціонувати в умовах водного стресу завдяки морфологічним та фізіологічним адаптаціям гіфальної структури.

Унаслідок різкого зростання кількості грибів та зниження бактеріальної фракції співвідношення «бактерії/гриби» зменшилося до ~355, що відображає зміщення домінування в бік грибного шляху деструкції органічних залишків у літній період.

На початку осені спостерігалось відновлення бактеріальної активності, зокрема нітрифікаторів, денітрифікаторів та N_2 -фіксаторів ($6,0$; $21,3$ та $16,9 \cdot 10^6$ КУО/г відповідно). Це пояснюється стабілізацією вологості ґрунту та зниженням температури до оптимальних для мікроорганізмів значень. Актиноміцети також продемонстрували збільшення чисельності порівняно з літнім періодом ($0,41 \cdot 10^6$ КУО/г), що свідчить про активізацію процесів розкладу органічних решток після літнього нагромадження біомаси.

Гриби в осінній період зберігають порівняно високий рівень активності ($0,18 \cdot 10^3$ КУО/г), проте він нижчий від літнього максимуму, що характерно для перехідного сезону зі збалансованими умовами вологості. Співвідношення «бактерії/гриби» (~383) відображає певне вирівнювання внеску обох трофічних груп у функціонування ґрунтової екосистеми.

Взимку мікробні угруповання демонструють загальне уповільнення метаболічної активності, проте без суттєвих провалів, що свідчить про високий рівень адаптації ґрунтової біоти до холодного стресу. Більшість бактеріальних груп зберігали помірні значення чисельності (актиноміцети — 0,45; нітрифікатори — 6,4; денітрифікатори — $21,8 \cdot 10^6$ КУО/г).

Гриби знижували активність до $0,15 \cdot 10^3$ КУО/г, що характерно для зимового періоду, коли більшість гіф перебуває у фазі сповільненого росту. Співвідношення «бактерії/гриби» зростало до приблизно 440, що відповідає поступовому поверненню домінування бактеріальних угруповань, яке буде максимальним на початку весни.

На рисунку 3.3 зображено сезонну динаміку мікробних угруповань на дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара в КУО на 1 г ґрунту

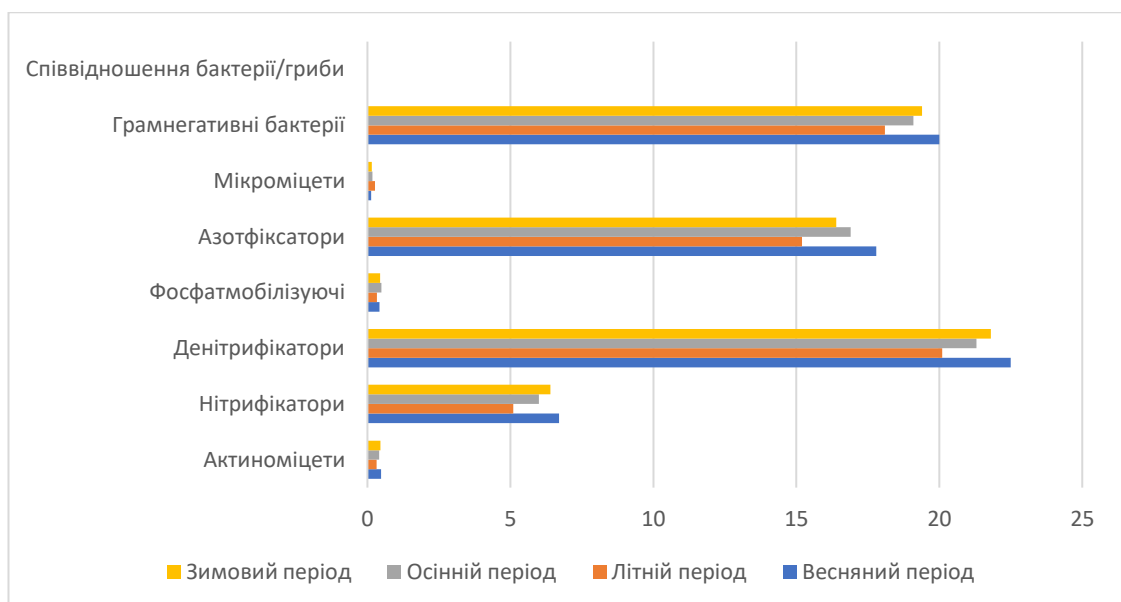


Рисунок 3.3 - Сезонна динаміка мікробних угруповань на дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара в КУО на 1 г ґрунту.

Дані демонструють, що найбільша активність більшості груп ґрунтових мікроорганізмів спостерігається навесні, тоді як у літній період їх чисельність знижується через посушливі умови. Узимку та восени показники залишаються відносно стабільними. Це свідчить про чітку сезонну динаміку та високу чутливість мікробіоти ґрунту до змін вологості й температури.

3.4 Показники біологічної активності ґрунту

Ферментативна активність ґрунту є інтегральним показником інтенсивності мікробіологічних процесів і відображає рівень біологічного функціонування ґрунтової екосистеми під впливом певної рослинної культури. Ферменти каталаза, уреаза, фосфатази та дегідрогенази беруть участь у ключових етапах кругообігу вуглецю, азоту та фосфору, тому їх показники дозволяють оцінити ступінь мінералізації органічної речовини, активність мікробних угруповань і загальний стан ґрунтового середовища.

У межах ботанічного саду ДНУ ім. О. Гончара ферментативна активність ґрунту може істотно варіювати залежно від типу рослинності, віку насаджень, щільності корневих систем, ступеня затіненості та вологості, а також під впливом алелопатичних виділень дуба звичайного. Саме тому порівняння ферментативної активності між різними дослідними ділянками дозволяє оцінити різницю у функціональній активності ґрунтової мікробіоти та виявити найбільш стабільні й біологічно активні мікробні консорціуми.

Таблиця 3.5 - Ферментативна активність ґрунту на дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олесея Гончара

Показник	Одиниця вимірювання	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 4	Ділянка 5
Каталазна активність	мл O ₂ / г · хв	3,6	4,2	3,1	4,8	3,9
Уреазна активність	мг NH ₄ ⁺ / г · 24 год	1,80	2,25	1,55	2,40	1,95
Фосфатазна (кисла)	мг PO ₄ ³⁻ / г · год	0,78	0,95	0,66	1,02	0,88
Фосфатазна (лужна)	мг PO ₄ ³⁻ / г · год	1,05	1,28	0,90	1,34	1,10
Дегідрогеназна активність	мг ТФФ / г · 24 год	2,4	3,1	2,0	3,4	2,7

Аналіз даних свідчить, що ферментативна активність ґрунту суттєво різниться між дослідними ділянками. Найвищі значення всіх досліджуваних ферментів зафіксовано на ділянці 4, що вказує на інтенсивні мікробіологічні процеси та активну мінералізацію органічної речовини. Найнижчі показники спостерігаються на ділянці 3, де зменшення ферментативної активності, ймовірно, пов'язане з менш сприятливими умовами для мікроорганізмів. Ділянки 1, 2 і 5 характеризуються середнім рівнем активності, при цьому ділянка 2 має дещо вищі значення, що може свідчити про кращі мікроекологічні умови.

Розкладання органічної речовини визначає інтенсивність мінералізації та залежить від активності ґрунтових мікроорганізмів. На дослідних ділянках ботанічного саду, розташованих під дубовими насадженнями, швидкість цього процесу змінюється під впливом умов ризосфери та вологості ґрунту. Втрати маси органічного матеріалу відображає рівень деструкційної активності мікроорганізмів.

У таблиці 3.6 наведено дані про розкладання органічної речовини на дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара

Таблиця 3.6 - Швидкість розкладання органічної речовини на дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара

Варіант досліджу	Кінцева маса, г	Втрати маси, %
Ділянка 1	0,64	36,0%
Ділянка 2	0,52	48,0%
Ділянка 3	0,71	29,0%
Ділянка 4	0,49	51,0%
Ділянка 5	0,60	40,0%

Отримані дані демонструють суттєві відмінності в інтенсивності розкладання органічної речовини на різних ділянках. Найбільші втрати маси спостерігаються на ділянці 4 (51,0 %) та ділянці 2 (48,0 %). Це свідчить про високу активність мікробних угруповань, сприятливі умови вологості й

достатню кількість доступних субстратів для деструкції. У цих ґрунтах мікроорганізми ефективно розкладають органічні сполуки, що узгоджується з підвищеними показниками ферментативної активності, характерними для високопродуктивних ризосферних систем.

Найнижчий рівень втрати маси органічної речовини зафіксовано на ділянці 3 (29,0 %), що вказує на знижену швидкість деструкційних процесів. Причиною може бути нижча вологість, пригнічення мікробної активності або менша кількість специфічних ферментів, відповідальних за розкладання полімерних компонентів. Ділянки 1 (36,0 %) та 5 (40,0 %) демонструють середні значення інтенсивності мінералізації, характерні для стабільних, але помірно активних ґрунтових мікробних систем.

Аналіз даних свідчить про нерівномірність деструкції органічної речовини, що відображає просторову неоднорідність ґрунтових умов та різний рівень біологічної активності ґрунтових мікроорганізмів під дубовими насадженнями.

Інтегральна оцінка біологічної активності ґрунту є важливим інструментом аналізу функціонального стану ґрунтової екосистеми, оскільки поєднує в собі комплекс показників, що відображають різні аспекти діяльності мікроорганізмів. До таких показників належать біологічний коефіцієнт продуктивності, рівень трансформації органічної речовини та інтегральний індекс мікробної активності. Разом вони дозволяють отримати узагальнену характеристику інтенсивності мікробіологічних процесів, стабільності ґрунтових біогеохімічних циклів та ефективності розкладання органічної речовини.

У дослідженні, проведеному на ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара під дубовими насадженнями, значення цих інтегральних показників мають особливу екологічну інформативність. Дуби, як довговічні деревні види з розвиненою кореневою системою та специфічними алелопатичними властивостями, формують стабільне ризосферне середовище, яке значною мірою впливає на структуру і активність ґрунтових мікробних угруповань. Взаємодія

кореневих виділень дуба з мікроорганізмами визначає швидкість розкладання органічної речовини, накопичення гумусу та загальну біологічну продуктивність ґрунту.

У таблиці 3.7 наведено дані про інтегральні показники біологічної активності по дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара.

Таблиця 3.7 — Інтегральні показники біологічної активності по дослідних ділянках ботанічного саду ДНУ ім. Олеся Гончара

Показник	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 4	Ділянка 5
Біологічний коефіцієнт продуктивності	0,68	0,92	0,55	1,00	0,78
Показник трансформації органіки	36%	48%	29%	51%	40%
Інтегральний індекс мікроб. активності	0,98	1,34	0,82	1,46	1,12
Категоріальна оцінка	середня	висока	низько–середня	дуже висока	висока

Дані свідчать про значні відмінності біологічної активності між ділянками. Найвищі значення біологічного коефіцієнта продуктивності (1,00), показника трансформації органіки (51 %) та інтегрального індексу мікробної активності (1,46) відмічені на ділянці 4, що відповідає категорії «дуже висока» активність. Це вказує на максимально розвинений мікробний комплекс та інтенсивний перебіг деструкційних процесів у ґрунті.

Найнижчі показники спостерігаються на ділянці 3 (0,55; 29 %; 0,82), що характеризує її як ділянку з низько–середнім рівнем біологічної активності, ймовірно пов'язаним з менш сприятливими ґрунтовими умовами та нижчою мікробною біомасою.

Ділянки 1, 2 і 5 демонструють середній та високий рівні активності. Ділянка 2 виділяється показниками, близькими до високої категорії, що може свідчити про інтенсивні мікробні процеси та сприятливі умови ризосфери дуба.

Ферментативна активність ґрунту є одним із ключових індикаторів стану мікробних угруповань та інтенсивності біохімічних процесів у ґрунтовій екосистемі. Оскільки ферменти каталаза, уреаза, фосфатази та дегідрогеназа беруть участь у трансформації органічної речовини, кругообігу азоту, фосфору та окисно-відновних процесах, сезонна динаміка їх активності дозволяє оцінити функціонування мікробіоти протягом року.

На рисунку 3.4 наведено дані про ферментативну активність ґрунту по сезонах на дослідних ділянках під насадженнями дубу звичайного в ботанічному саду ДНУ ім. Олеся Гончара.

На рисунок 3.4 наведена ферментативна активність ґрунту по сезонам на дослідних ділянках під насадженнями дубу звичайного в ботанічному саду ДНУ ім. Олеся Гончара.

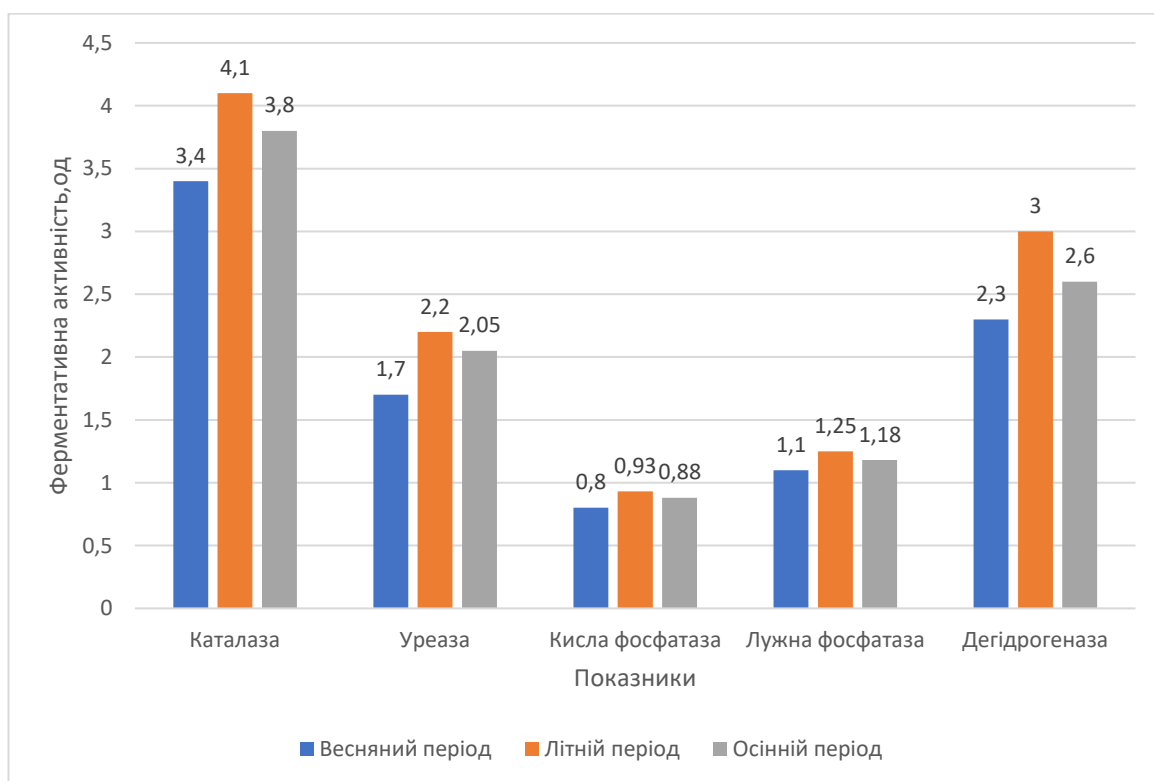


Рисунок 3.4 - Ферментативна активність по сезонам ґрунту на дослідних ділянках під насадженнями дубу в ботанічному саду ДНУ ім. Олеся Гончара

Представлені дані демонструють чітку сезонну динаміку ферментативної активності ґрунту. Для всіх досліджуваних ферментів максимальні значення загалом спостерігаються в літній період, що характерно для умов підвищеної температури та доступності органічних субстратів. Зокрема, влітку відзначається найбільша активність каталази (4,1 од.), уреаз (2,2 од.) та дегідрогенази (3,0 од.), що свідчить про посилення окисно-відновних і мінералізаційних процесів.

Весняні показники є помірними, що відповідає поступовій активізації мікробіоти після зимового періоду. Найнижчі значення в більшості випадків фіксуються восени, коли температура знижується, а мікробні процеси поступово уповільнюються.

Лужна та кисла фосфатазна активність також демонструють найбільшу інтенсивність улітку (1,25 та 0,93 од. відповідно), що відображає активне вивільнення фосфатів із органічних сполук у період найбільшої біологічної активності ґрунту.

У цілому дані відображають природні сезонні коливання інтенсивності мікробних процесів у ґрунті під дубовими насадженнями, підкреслюючи вплив температури та вологості на ферментативну активність.

Мінералізація органічної речовини в ґрунті є результатом інтегрованої діяльності широкого спектра мікроорганізмів, кожна група яких виконує специфічну роль у послідовному розщепленні складних полімерних субстратів до простих неорганічних форм. Первинний гідроліз високомолекулярних сполук — целюлози, геміцелюлози, лігніну, пектинів, білків — здійснюється переважно гетеротрофними бактеріями та грибами-сапротрофами, які продукують широкий комплекс позаклітинних гідролаз (целюлаз, протеаз, амілаз). Целюлозолітичні мікроорганізми спеціалізуються на розкладанні рослинних залишків, збагачених структурними вуглеводами, забезпечуючи ранні етапи деструкції фітомаси. Актиноміцети, завдяки здатності синтезувати унікальні ферментні системи та витримувати нижчу вологість і кисліші умови, домінують на пізніх стадіях мінералізації, коли субстрати стають більш стабільними та важкодоступними. Відмінності між цими мікробними групами у ферментативних можливостях,

темпах росту, толерантності до умов середовища та трофічних перевагах формують складну систему комплементарної взаємодії. Сукупна активність цих угруповань забезпечує безперервне перетворення органічної речовини на доступні для рослин мінеральні форми азоту, фосфору, сірки та інших елементів, підтримуючи родючість ґрунту й стабільність біогеохімічних циклів.

Особливої уваги потребує вплив типу рослинного угруповання на структуру та активність мікробіоти ґрунту. У межах дослідних ділянок, розташованих під насадженнями дубу (*Quercus robur*), формувалося специфічне мікробне середовище, зумовлене хімічним складом дубового опаду та його повільною деструкцією. Листя дубу характеризується високим умістом лігніну, дубильних речовин і фенольних сполук, що ускладнює та сповільнює процеси розкладання органічних залишків. За таких умов у ґрунті зростає роль актиноміцетів і лігнінолітичних грибів, здатних розщеплювати стійкі полімери, а також підсилюється частка спеціалізованих гетеротрофних бактерій, адаптованих до низькодоступних субстратів. Це формує характерний для дубових екосистем мікробний профіль, який визначає темпи мінералізації, накопичення гумусу та біологічну активність ґрунту.

На рисунку 3.5 наведено дані про відсоткову частку внеску різних груп мікроорганізмів у мінералізацію органічної речовини.

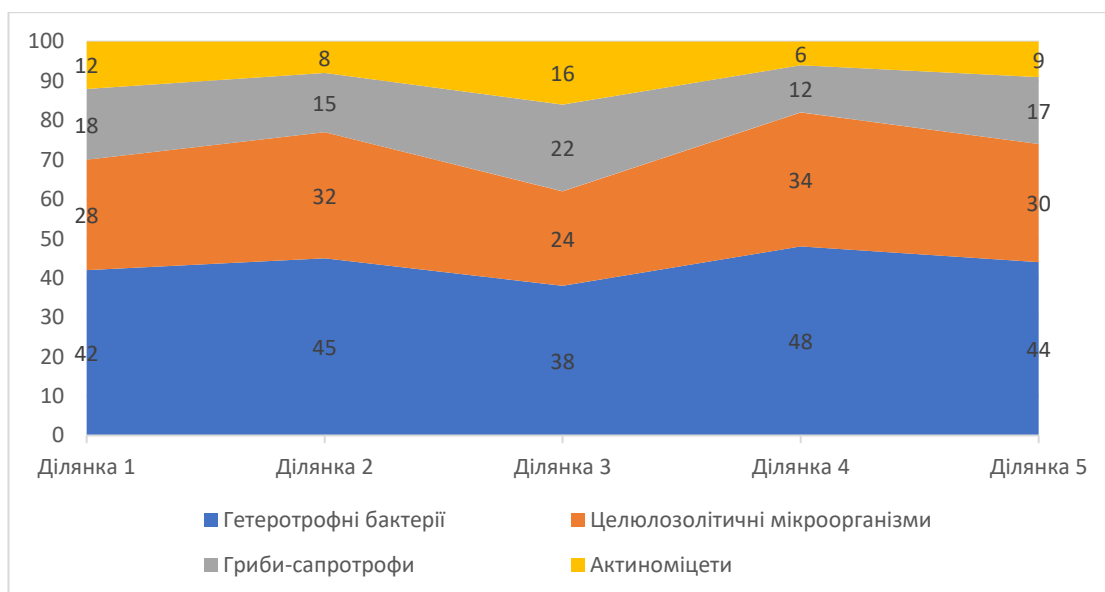


Рисунок 3.5 – Відсоткова частка внеску різних груп мікроорганізмів у мінералізацію органічної речовини.

З графіка видно, що на всіх дослідних ділянках провідну роль у розкладанні органічної речовини відіграють гетеротрофні бактерії, частка яких становить від 38 % до 48 %. Найвищий їх внесок спостерігається на ділянці 4 (48 %), що узгоджується з високими показниками ферментативної активності та інтенсивністю мінералізаційних процесів.

Целюлозолітичні мікроорганізми займають друге місце за значенням, забезпечуючи 24–34 % від загального внеску. Їх максимальна активність також відмічена на ділянці 4 (34 %), що свідчить про активне руйнування рослинних залишків.

Гриби-сапротрофи мають стабільну, але відносно нижчу частку — від 12 до 22 %, з максимальними значеннями на ділянці 3 (22 %). Це може бути результатом послаблення бактеріальних угруповань у періоди зниженої вологості, що створює кращі умови для грибів.

Актиноміцети становлять найменшу частку (6–12 %), але їх присутність є важливою для розкладання складних полімерів і формування гумусу. Найменший їх внесок зафіксовано на ділянці 4 (6 %), що може бути пов'язано з конкуренцією з боку активних бактеріальних угруповань.

У цілому дані демонструють, що структура мікробних угруповань суттєво варіює між ділянками, а максимальний внесок у мінералізацію органічної речовини забезпечують саме гетеротрофні бактерії та целюлозолітичні мікроорганізми.

Для оцінки функціонального стану ґрунтових мікробіоценозів було проаналізовано співвідношення між чисельністю мікроорганізмів та інтегральною ферментативною активністю на різних дослідних ділянках ботанічного саду. Одержані показники дають змогу встановити, наскільки інтенсивність біохімічних процесів відповідає загальному рівню розвитку мікробних угруповань, та виявити відмінності у біологічній активності ґрунтів залежно від умов місцезростання.

У таблиці 3.8 наведено про зв'язок між чисельністю мікроорганізмів та ферментативною активністю на різних дослідних ділянках ботанічного саду.

Таблиця 3.8 - Зв'язок між чисельністю мікроорганізмів та ферментативною активністю на різних дослідних ділянках ботанічного саду.

Варіант досліджу	Загальна чисельність мікроорганізмів (×10 ⁵ КУО/г)	Інтегральний індекс ферментативної активності (ПФА)
Ділянка 1	8,2	0,98
Ділянка 2	11,4	1,34
Ділянка 3	6,5	0,82
Ділянка 4	12,2	1,46
Ділянка 5	9,3	1,12

Аналіз даних свідчить, що дослідні ділянки характеризуються різним рівнем мікробної насиченості та активності ферментних систем. Найвищі значення загальної чисельності мікроорганізмів та ПФА відзначено на ділянках 2 та 4, що може вказувати на сприятливіші умови для розвитку мікробіоти та активного перебігу процесів мінералізації. Натомість ділянки 1 та 3 демонструють нижчі показники, що свідчить про відносно слабшу інтенсивність біологічних процесів. Ділянка 5 займає проміжне положення між цими групами. Сукупність цих даних дозволяє оцінити структурно-функціональні особливості ґрунтових мікробних комплексів та їхню реакцію на просторову мінливість екосистеми.

3.5 Оцінка мікробного різноманіття

Для оцінки структурної організації ґрунтових мікробних угруповань у межах ботанічного саду було визначено індекс Шеннона, який характеризує рівень різноманіття та рівномірності розподілу мікроорганізмів у ґрунті. Усі дослідні ділянки розташовані під насадженнями дуба звичайного (*Quercus robur*

L.), тому отримані значення відображають особливості впливу саме дубових екосистем на формування мікробіоти. Цей підхід дозволяє оцінити дрібномасштабні варіації мікробного різноманіття в межах однієї домінантної деревної породи, враховуючи локальні ґрунтово-екологічні відмінності.

На рисунку 3.6 наведено значення індексу Шеннона для ґрунтових мікробних угруповань на різних точках відбору в ботанічному саду ДНУ ім. Олесья Гончара.

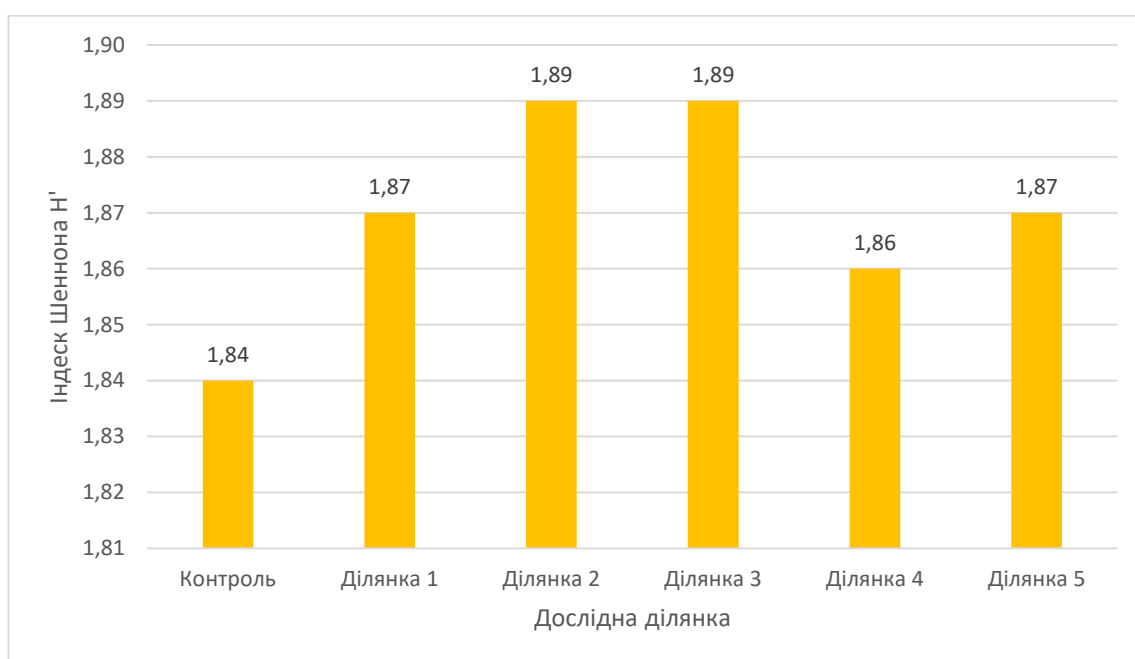


Рисунок 3.6 – Значення індексу Шеннона для ґрунтових мікробних угруповань на різних точках відбору в ботанічному саду ДНУ ім. Олесья Гончара

Показники різноманіття варіюють у межах 1,84–1,89, що свідчить про загалом стабільну структуру мікробної спільноти в умовах дубових насаджень.

Найвищі значення індексу зафіксовано на ділянках 2 та 3 (1,89). Це може бути зумовлено підвищеною доступністю органічної підстилки дуба, кращою аерацією ґрунту або сприятливими мікроумовами, що підтримують ширше різноманіття функціональних груп мікроорганізмів. Деяко нижчі значення на контрольній ділянці (1,84) можуть свідчити про більш однорідну або пригнічену мікробну структуру.

Загальна тенденція графіка демонструє, що навіть у межах єдиної деревної породи спостерігаються локальні відмінності в мікробному різноманітті, які відображають мозаїчність ґрунтових умов. Це підкреслює важливу роль дуба як формувального компонента мікробних угруповань та підтверджує стабільність дубових екосистем щодо підтримання ґрунтової біоти.

Мінералізація органічної речовини визначає швидкість трансформації рослинних решток і надходження доступних мінеральних форм елементів у ґрунт. Коефіцієнт мінералізації відображає інтенсивність цих процесів та опосередковано характеризує рівень активності мікроорганізмів-деструкторів. Оскільки дослідження проводилися на ґрунтах під насадженнями дуба звичайного (*Quercus robur L.*), отримані дані дають можливість оцінити, як у межах єдиної деревної породи варіює швидкість розкладання органічної підстилки та мікробна трансформація вуглецю.

На рисунку 3.7 наведено показники коефіцієнта мінералізації органічної речовини ґрунту на дослідних ділянках під насадженнями дуба звичайного.

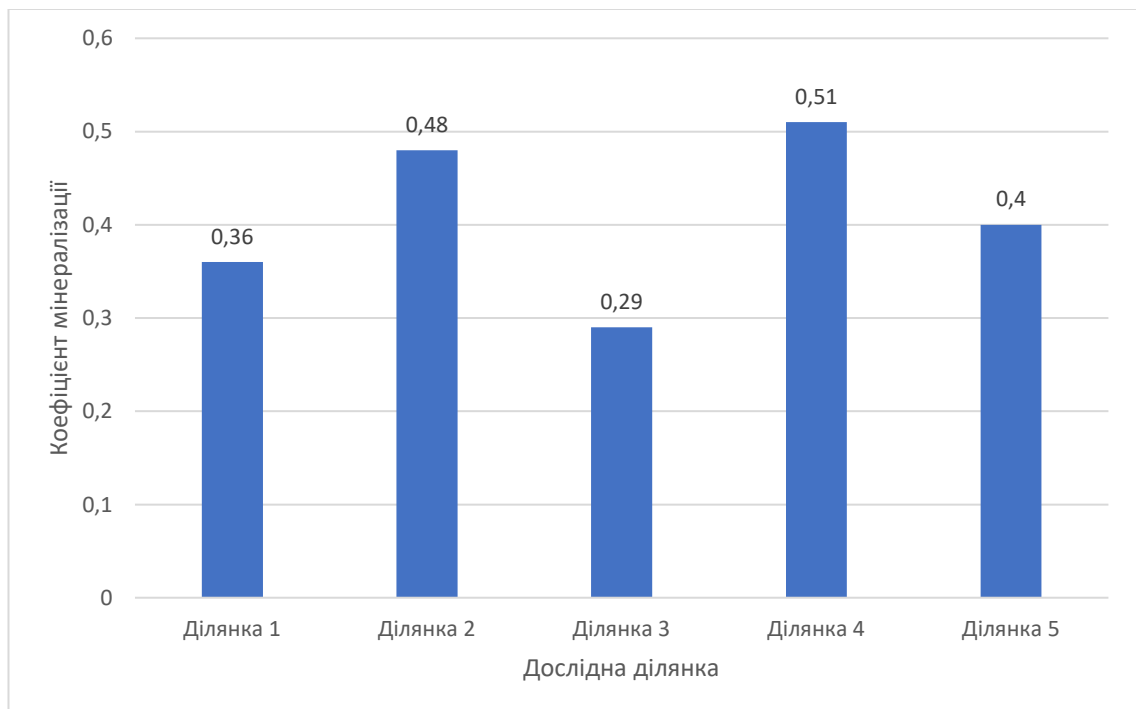


Рисунок 3.7 - Показники коефіцієнта мінералізації органічної речовини ґрунту на дослідних ділянках під насадженнями дуба звичайного

Найвищі показники мінералізації зафіксовано на ділянках 4 (0,51) та 2 (0,48). Це може бути пов'язано з більш сприятливими умовами для розвитку мікробних комплексів, зокрема достатньою вологістю, структурою підстилки або покращеним газообміном ґрунту, що пришвидшує діяльність мікроорганізмів-деструкторів. Натомість найнижче значення — 0,29 на ділянці 3 — може відображати уповільнені процеси розкладання, ймовірно пов'язані з локальними мікроекологічними факторами або зниженням мікробної активності.

Загалом представлена динаміка демонструє, що навіть у межах однотипних насаджень дуба інтенсивність мінералізації має мозаїчний характер. Це ще раз підкреслює важливість мікроекологічних умов та структури рослинної підстилки в регуляції швидкості ґрунтових біохімічних процесів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Організація безпечних умов роботи на території ботанічного саду

Організація безпечних умов роботи на території ботанічного саду під час проведення досліджень ґрунту є важливою складовою забезпечення охорони праці та охорони довкілля. У ході польових робіт необхідно дотримуватися вимог чинного законодавства України у сфері безпеки та природокористування, зокрема положень Законів України «Про охорону праці», «Про охорону навколишнього природного середовища» та нормативів протипожежної й санітарно-епідеміологічної безпеки. Основні вимоги щодо організації безпечних умов виконання робіт ґрунтуються також на положеннях ДСТУ ISO 45001:2019, що регламентує функціонування систем управління охороною здоров'я та безпекою праці [52].

Перед початком виконання робіт здобувач проходить обов'язковий інструктаж відповідно до «Типового положення про навчання з питань охорони праці» (НПАОП 0.00-4.12-05). Під час інструктажу він ознайомлюється зі специфікою території ботанічного саду, характером можливих небезпек, вимогами щодо безпечного пересування, порядком використання інструментів та засобів індивідуального захисту.

Територія ботанічного саду має різноманітний рельєф та рослинність, що зумовлює необхідність дотримання підвищеної обережності при пересуванні. Робота повинна здійснюватися виключно по встановлених маршрутах та стежках, з уникненням крутих схилів, заболочених ділянок та місць із можливим осіданням ґрунту. Вимоги щодо перебування на відкритому повітрі та мікрокліматичних умов відповідають положенням ДСН 3.3.6.042-99, які

регламентують безпечні умови температури, вологості та опромінення під час робіт на відкритій місцевості. Під час виконання польових завдань у теплий період року здобувач має забезпечувати захист від надмірного сонячного випромінювання, перегрівання та зневоднення, дотримуючись рекомендацій щодо питного режиму та перерв [53].

Вибір одягу та взуття повинен відповідати стандартам щодо засобів індивідуального захисту, зокрема ДСТУ EN 340:2017 та ДСТУ EN 388:2017, які регламентують вимоги до захисного одягу та рукавичок. Рекомендується використовувати щільне, стійке до забруднень взуття з протекторною підошвою, а також головний убір для захисту від сонця. У сезон активності комах і кліщів застосовуються репеленти відповідно до санітарних норм профілактики трансмісивних інфекцій (ДСанПіН 3.8.2.2-000-2001), а після завершення роботи здійснюється огляд відкритих ділянок тіла.

Дослідження ґрунту передбачають застосування ручних інструментів, таких як лопати, бурові пристрої, щупи та контейнери для проб. Їх використання повинно відповідати вимогам НПАОП 0.00-1.71-2013, що встановлює правила безпечної експлуатації ручних інструментів та пристроїв. Інструмент має бути справним, без тріщин і заусениць, а переносити його необхідно у положенні, що виключає випадкове травмування. Під час роботи забороняється виконувати різкі рухи або використовувати інструменти поблизу інших осіб на малій відстані.

Особливого значення на території ботанічного саду набуває дотримання правил пожежної безпеки, встановлених НАПБ А.01.001-2014. Забороняється розпалювання вогню, застосування відкритого полум'я та куріння поза спеціально відведеними місцями. Усі учасники дослідження повинні знати порядок дій у разі виникнення пожежонебезпечної ситуації та місце розташування найближчих засобів пожежогасіння [54].

Також необхідно дотримуватися природоохоронних вимог, визначених Законом України «Про природно-заповідний фонд України», які поширюються на ботанічні сади як об'єкти природоохоронного призначення. Забороняється

пошкодження рослин, витоपтування ґрунтового покриву, руйнування мікробіотопів або відхід від встановлених стежок без дозволу працівників саду.

Організація безпечних умов роботи в ботанічному саду передбачає комплексний підхід, який базується на дотриманні чинних нормативно-правових актів у галузі охорони праці, санітарного благополуччя населення, пожежної та екологічної безпеки. Виконання цих вимог забезпечує зниження ризиків під час польових досліджень, сприяє збереженню природного середовища та гарантує ефективність і безпечність науково-дослідної діяльності.

4.2 Вимоги безпеки під час відбору та транспортування ґрунтових зразків

Відбір і транспортування ґрунтових зразків під час проведення екологічних та мікробіологічних досліджень у ботанічному саду повинні здійснюватися з дотриманням вимог охорони праці, санітарних норм та нормативів, що регулюють роботу з біологічними матеріалами. Організація цих процесів ґрунтується на положеннях Законів України «Про охорону праці» та «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», а також стандартах системи управління безпекою відповідно до ДСТУ ISO 45001:2019 [55].

Перед початком відбору проб дослідник проходить інструктаж і ознайомлюється з правилами роботи з ґрунтами, що можуть містити біологічно активні або потенційно небезпечні компоненти. Відповідно до «Типового положення про навчання з питань охорони праці» (НПАОП 0.00-4.12-05), він повинен бути поінформований про можливі ризики: зустріч із гострими предметами в ґрунті, контакти з патогенними мікроорганізмами, випадкові травми під час роботи з металевим інструментом, можливе потрапляння частинок ґрунту в очі або на слизові оболонки.

Ручний інструмент для відбору ґрунту (бури, шпателі, лопати, пробовідбірники) повинен відповідати вимогам НПАОП 0.00-1.71-2013 «Правила охорони праці під час роботи з інструментами та пристроями». Він має бути технічно справним, без тріщин, сколів, послаблених рукояток або корозійних ушкоджень. Користуватися інструментом дозволено лише у захисних рукавичках, що відповідають вимогам ДСТУ EN 388:2017 щодо стійкості до стирання, порізів та проколів [56].

Під час роботи здобувач повинен дотримуватися вимог особистої безпеки: утримувати корпус у стійкому положенні, не виконувати ривкових рухів, не проводити відбір проб поблизу інших осіб на відстані менш ніж 1,5 м. Рекомендується використовувати захисні окуляри відповідно до ДСТУ EN 166:2017, щоб уникнути потрапляння частинок ґрунту або уламків у очі.

Особливу увагу слід приділити санітарно-біологічним ризикам. ґрунт може містити мікроскопічні грибки, бактерії або споруляційні форми потенційно патогенних мікроорганізмів. Тому робота повинна проводитись у щільних рукавичках, а після завершення — із дотриманням правил особистої гігієни та обробкою рук антисептичним засобом. Згідно з ДСанПіН 2.2.2.118-2010, усі контакти з біологічними агентами мають супроводжуватися застосуванням індивідуальних засобів захисту.

Важливо також дотримуватися вимог екологічної безпеки: не порушувати природну структуру ґрунту більше, ніж це необхідно для відбору проб, не завдавати шкоди кореневим системам рослин, не залишати сміття чи пошкоджених зразків інструментів на території. Відбір проб у ботанічному саду повинен виконуватися виключно у дозволених місцях, після узгодження з адміністрацією.

Окремі вимоги стосуються маркування і первинного зберігання проб. Контейнери або пакети для ґрунтових зразків повинні бути чистими, герметичними та виготовленими з матеріалу, що не вступає у взаємодію із ґрунтом. Вони маркуються водостійким маркером із зазначенням дати, часу, місця відбору та умов середовища. Відповідно до правил роботи з

мікробіологічними матеріалами, проби необхідно поміщати у додаткову захисну упаковку для уникнення проливання чи випадкового розсипання під час транспортування.

Транспортування ґрунтових зразків здійснюється у закритих контейнерах або термосумках, які запобігають впливу прямих сонячних променів, перегріванню чи промерзанню. Вимоги щодо транспортування біологічних матеріалів регламентуються положеннями Правил перевезення небезпечних вантажів, адаптованими до безпечного переміщення зразків природного походження на короткі дистанції. Під час перенесення проб заборонено розміщувати їх безпосередньо біля гострих предметів або важкого обладнання, яке може пошкодити упаковку.

Після прибуття до лабораторії проби повинні бути передані відповідальному працівнику, а їхня цілісність та відповідність маркуванню перевіряються. Будь-які пошкодження упаковки або сліди просипання ґрунту фіксуються у журналі реєстрації та розглядаються згідно з внутрішніми правилами безпеки.

Дотримання вимог безпеки під час відбору та транспортування ґрунтових зразків забезпечує мінімізацію професійних ризиків, попереджує травматизм і запобігає потенційним біологічним загрозам. Комплексний підхід до безпеки сприяє збереженню здоров'я виконавця дослідження та гарантує достовірність і репрезентативність ґрунтових проб [57].

4.3 Правила безпечної роботи з мікробіологічними матеріалами в лабораторії

Безпечна робота з мікробіологічними матеріалами в лабораторії є одним із ключових елементів охорони праці під час проведення екологічних та мікробіологічних досліджень ґрунту. Лабораторні роботи виконуються

відповідно до вимог Законів України «Про охорону праці», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», а також до санітарних норм та професійних стандартів у сфері біологічної безпеки. Основу регламентації складають ДСанПіН 2.2.2.118-2010, ДСТУ ISO 45001:2019, вимоги біобезпеки лабораторій 1–2 класів та правила роботи з біологічними агентами.

Перед початком досліджень студент проходить первинний інструктаж з охорони праці та ознайомлюється з правилами роботи в лабораторіях мікробіологічного профілю згідно з НПАОП 0.00-4.12-05. Дослідник повинен знати розташування аварійних засобів (аптечки, вогнегасника, крана екстреного водопостачання), маршрути евакуації, порядок дій у разі виникнення аварійних або небезпечних ситуацій.

Під час роботи з ґрунтовими суспензіями та культурами мікроорганізмів обов'язково застосовують індивідуальні засоби захисту: лабораторний халат, захисні рукавички та окуляри відповідно до ДСТУ 166:2017 та ДСТУ EN 374-5:2018 (захист від мікроорганізмів). Волосся має бути зібране, а особисті речі не допускаються на лабораторний стіл [58].

Робоче місце повинно бути організоване таким чином, щоб зменшити ризик контамінації та поширення біологічних агентів. Маніпуляції з відкритими культурами рекомендується виконувати у ламінарній шафі або зоні з обмеженим повітряним потоком (мікробіологічний бокс), згідно з вимогами до лабораторій II класу біобезпеки. Перед початком роботи поверхню столу обробляють дезінфікуючим розчином (70% етанол, хлорвмісні препарати), а після завершення — повторно проводять знезараження.

Усі маніпуляції з мікробіологічним матеріалом повинні виконуватися плавно та акуратно. Забороняється створювати аерозолі, енергійно струшувати пробірки, інтенсивно дути на поверхню середовищ, працювати з відкритими культурами в зоні протягу. Під час відкривання пробірок їх тримають під кутом, уникаючи спрямування отвору на інших осіб. Робота з відкритим полум'ям

(газовий пальник) дозволена лише за умови відсутності легкозаймистих матеріалів та з дотриманням протипожежних норм НАПБ А.01.001-2014.

Особливі вимоги ставляться до поводження з гострим лабораторним інструментом — бактеріологічними петлями, голками, скальпелями, ножицями, скляним посудом. Відповідно до НПАОП 0.00-1.71-2013, такий інструмент має бути справним, без тріщин та сколів; одноразові голки та леза використовуються лише один раз і підлягають спеціальній утилізації.

Важливо дотримуватися правил поводження з лабораторними відходами. Всі матеріали, що контактували з мікробними культурами (піпетки, пробірки, рукавички, фільтрувальний папір), збираються у спеціальні контейнери для біологічних відходів згідно з ДСанПіН 2.2.7.029-99. Перед утилізацією вони підлягають автоклавуванню або хімічній дезінфекції. Забороняється викидати мікробіологічні матеріали разом із побутовими відходами.

Під час роботи з ґрунтовими суспензіями важливо уникати їхнього розливу. У разі випадкового потрапляння матеріалу на робочу поверхню або шкіру слід негайно зупинити роботу, обробити місце дезінфікуючим розчином та повідомити викладача або відповідального працівника. Якщо відбулося пошкодження шкіри, травмовану ділянку промивають водою і антисептиком, фіксують випадок у журналі лабораторних інцидентів.

Порядок роботи з поживними середовищами та культуральними пробірками передбачає стерильність усіх інструментів та посуду. Металеві петлі та голки прожарюють до почервоніння, а скляний посуд перед використанням стерилізують у сухожаровій шафі або автоклаві. Забороняється використовувати пошкоджені колби або пробірки, оскільки це створює ризик травмування та витоку матеріалу.

Після завершення роботи працівник очищає робоче місце, вимикає обладнання, утилізує рукавички та проводить гігієнічну обробку рук. Лабораторний одяг знімають перед виходом з приміщення, щоб запобігти перенесенню потенційних мікробних контамінантів за межі лабораторії [59].

Дотримання зазначених правил дозволяє мінімізувати ризики біологічного та хімічного характеру, запобігає виникненню аварійних ситуацій і забезпечує достовірність результатів мікробіологічних досліджень. Комплексний підхід до безпеки в лабораторії гарантує захист здоров'я дослідника та підтримання необхідного рівня біобезпеки відповідно до чинних нормативних вимог.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження мікробного різноманіття ґрунтів ботанічного саду ДНУ ім. Олесь Гончара встановлено, що формування структури мікробних угруповань істотно визначається поєднанням ґрунтово-кліматичних умов, ступенем антропогенного впливу та, насамперед, видовими особливостями рослин, під якими відбиралися ґрунтові проби. Культура дуба (*Quercus robur L.*) продемонструвала чіткий вплив на мікробний ценоз завдяки специфічним кореневим виділенням та особливому хімічному складу листяного опаду, що формує характерну ризосферну мікронішу.

Аналіз чисельності та функціональної структури мікроорганізмів показав, що попри загальну тенденцію до зменшення активності мікробіоти через посушливі погодні умови сезону, ґрунти під дубом зберегли значну кількість автохтонних форм, а також груп мікроорганізмів, відповідальних за ключові етапи колообігу елементів — амоніфікацію, нітрифікацію, целюлозолітичну активність і мінералізацію органічних сполук. Особливо виразним виявилось пригнічення бактеріальної ланки мікробоценозу в умовах тривалої літньої засухи, що узгоджується з сучасними уявленнями про чутливість бактеріальних угруповань до дефіциту вологи. Натомість гриби, стійкіші до водного стресу, продемонстрували збільшення чисельності та активності, що сприяло перерозподілу трофічних потоків у ґрунтовій екосистемі.

Сезонна динаміка мікробного різноманіття, відображена за даними декількох термінів відбору, підтвердила залежність структури угруповань від вологи: після періодів підвищеної сухості відбувалося короткочасне зростання біологічної активності через «імпульс повторного зволоження», відомий за літературними даними як ефект стимуляції метаболізму після припинення

стресових умов. Цей ефект сприяв активізації грибних та частини актиноміцетних форм.

Розрахунок індексу Шеннона довів, що мікробні угруповання в різних точках відбору під дубовими насадженнями відрізняються за ступенем різноманіття та збалансованості. Території з мінімальним антропогенним впливом (відсутність частого втручання, рихлення, удобрення) характеризувалися вищими значеннями індексу, що свідчить про кращу стабільність та функціональну «резервність» екосистеми — наявність дублерів серед мікроорганізмів, здатних виконувати однакові екологічні ролі. Навпаки, ділянки, де антропогенний тиск був відносно вищим, демонстрували збіднення складу мікробоценозу та домінування кількох стійких груп, що знижує загальну стійкість ґрунтової системи.

Отримані результати підтверджують, що у ботанічних садах, попри їхнє штучне походження, формуються високостабільні ґрунтові екосистеми, у яких рослини-інтродуценти, зокрема дуб звичайний, відіграють ключову роль у підтриманні різноманіття та функціональної активності мікроорганізмів. Угруповання мікробів, що склалися під дубовими насадженнями, характеризуються стійкістю, наявністю високої частоти зустрічальності основних функціональних груп та адаптацією до умов посушливого кліматичного періоду сезону.

Дослідження підтвердило важливість комплексного підходу до аналізу взаємодії рослин, ґрунту та мікроорганізмів, що дозволяє глибше оцінити стан ґрунтових екосистем ботанічних садів та їхню здатність підтримувати біогеохімічні процеси. Результати роботи мають практичне значення для оптимізації заходів зі збереження ґрунтового біорізноманіття, коректної оцінки екологічного стану ґрунтів та формування стратегій сталого управління територіями з культурними насадженнями.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреюк Е.І., Іутинська Г.О., Антипчук А.Ф., Валагурова О.В., Козирицька В.Є., Пономаренко С.П. Функціонування мікробних угруповань ґрунту в умовах антропогенного навантаження. - К.: Обереги, 2001. - 239 с
2. . Відтворення родючості ґрунтів у ґрунтозахисному землеробстві/ Підред. М.К. Шикули - К.: Оранта, 1998. - 678 с
3. Гродзинський А.М. Основи хімічної взаємодії рослин. - К.: Наукова думка, 1973. - 205 с.
4. Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. - М.: Изд-во Моек, ун-та, 1987.-256с.
5. Пирог Т.П. Загальна мікробіологія. - К.: НУХТ, 2004. - 470 с.
6. Сергійчук М.Г., Позур В.К., Вінніков А.І., Фурзікова Т.М., Жданова Н.М., Домбровська І.В., Швець Ю.В. Мікробіологія: Підручник. - Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2005. - 375 с.
7. Кулік А. Ф. Мікробоценоз ґрунтів лісових біогеоценозів Присамар'я. Біорізноманіття та роль тварин в екосистемах: матеріали VI міжнар. наук. конф. Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2011. С. 18–20.
8. Lysak L. V., Larygina E. V. The Diversity of Bacterial Communities in Urban Soils. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51, No. 9. P. 1050–1056.
9. Роберт Кремер Мікробіологія ґрунту, здоров'я ґрунту, відновлення після гліфосату з Вітазимом. *Ukraine Farmers Conference May 28, 2018*. URL: <http://agro-e.com.ua/ru/2018/05/28/мікробіологія-ґрунту-здоровяґрунту>
10. Christopher P. Dunn, Biological and cultural diversity in the context of botanic garden conservation strategies, *Plant Diversity*, 2017, Pages 396-401.
11. Esther S. Felgentreff, Desiree Jakubka, Sonja Knapp, Markus Bernhardt-Römermann, The garden biodiversity index: A self-assessment tool for evaluating

- biodiversity in private gardens, *Landscape and Urban Planning*, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204625001562>)
12. Hua-Yuan Shangguan, Stefan Geisen, Zhi-Peng Li, Hai-Feng Yao, Gang Li, Martin F. Breed, Stefan Scheu, Xin Sun, Urban greenspaces shape soil protist communities in a location-specific manner, *Environmental Research*, Volume 240, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935123022892>).
 13. (Accessed 25 September 2017). Convention on Biological Diversity, 2012. Global Strategy for Plant Conservation: 2011e2020. Botanic Gardens Conservation International, Richmond, UK.
 14. Zhang, J., Quan, C., Ma, L., Chu, G., Liu, Z., Tang, Z., 2021. Plant community and soil properties drive arbuscular mycorrhizal fungal diversity: A case study in tropical forests. *Soil Ecol. Lett.* 3, 52–62. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0049>
 15. Bedernichek, T., & Hamkalo, Z. (2014). Labil'na organichna rehovyna gruntu: teoriya, metodologiya, indicatorna rol [Labile organic matter of the soil: theory, methodology, indicator role]. Kyiv: Kondor [in Ukrainian].
 16. Dokuchaev, V. V. (1948). К вопросу об открытии при русских университетех кафедр почвоведения и учение о микроорганизмах. *Izbrannyye sochineniya*
 17. Довженко Л. В., Зінченко В.А. Основи мікробіології : навч.-метод. посіб. Київ : Медицина, 2017. 49 с.
 18. Люта В. А., Кононов О.В. Практикум з мікробіології : навч.посіб. Вид. 3-є, випр. Київ : Медицина, 2018. 184 с.
 19. Широбоков В. П., Климнюк С. І. Практична мікробіологія : навч. посіб. Київ : Нова книга, 2018. 584 с.
 20. Мікробіологічні аспекти оптимізації удобрення сільськогосподарських культур: Теорія і практика: монографія // За ред. Волкогона В. В. Київ: Аграрна наука, 2007. 144 с.
 21. Патика В. П., Тихонович І. А., Філіп'єв І. Д., Гамаюнова В. В., Андрусенко І. І. Мікроорганізми і альтернативне землеробство. Київ: Урожай, 1993. 176 с
 22. Walpola B. S., Yoon M.-H. Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: a review // *African*

- Journal of Microbiology Research. 2012. Vol. 6(37). P. 6600–6605. DOI: 10.5897/AJMR12.889
23. Satyaprakash M., Nikitha T., Reddy E. U. B., Sadhana B., Satya Vani S. Phosphorous and phosphate solubilising bacteria and their role in plant nutrition: a review // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017. Vol. 6(4). P. 2133–2144. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.604.251.
 24. Волкогон В. В. Біологічна меліорація ґрунтів. Традиційне і нове: практика // Сільськогосподарська мікробіологія: міжвідомчий тематичний науковий збірник. 2011. № 13. С. 7–22.
 25. Zaidi A., Khan M. S., Ahemad M., Oves M. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria // Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica. 2009. Vol. 56(3). P. 263–284. DOI: 10.1556/AMicr.56.2009.3.6.
 26. Kumar A., Kumar A., Patel H. Role of microbes in phosphorus availability and acquisition by plants // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2018. Vol. 7 (5). P. 1344–1347. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.705.161
 27. Yu X., Liu X., Zhu T.H., Liu G. H., Mao C. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from walnut and their effect on growth and phosphorus mobilization // Biol. Fertil. Soils. 2011. Vol. 7(4). P. 437–446. DOI: 10.1007/s00374-011-0548-2.
 28. Симочко Л. Ю., Симочко В.В. Інтегрованість мікробного ценозу ґрунту при антропогенному навантаженні // Наукові записки державного природознавчого музею. - 2007. — Вип. 23. - С.111-118.
 29. Симочко Л. Ю. Биоиндикация природных и антропогенных экосистем с помощью почвенных микроорганизмов. /У Матеріали міжнародної наукової конференції "Шевченківська весна 2012: біологічні науки". - 19-23 березня 2012 року. - Київ. 2012. - С.296-297.
 30. Баранская М. И., Чайковская Л. А. Первичная оценка нововыделенных штаммов фосфатмобилизующих бактерий // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 1(25). С. 28–37.

31. Sharma S. B., Sayyed R. Z., Trivedi M. H., Gobi T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils // Springer Plus. 2013. Vol. 2.
32. Richardson A. E., Simpson R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability // Plant Physiology. 2011. Vol. 156. No. 3. P. 989–996.
33. Schulz, S., Brankatschk, R., Dümig, A., Kögel-Knabner, I., Schloter, M., & Zeyer, J. (2013). The role of microorganisms at different stages of ecosystem development for soil formation. *Biogeosciences.*, 10, 3983–3996. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3983-2013>
34. Seitz, S., Nebel, M., Goebes, P., Käppeler, K., Schmidt, K., Shi, X. ... Scholten, T. (2017). Bryophyte-dominated biological soil crusts mitigate soil erosion in an early successional Chinese subtropical forest. *Biogeosciences*, 14, 5775–5788. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5775-2017>
35. Singh, B. K., Millard, P., Whiteley, A. S., & Murrell, J. C. (2004). Unravelling rhizospheremicrobial interactions: opportunities and limitations. *Trends Microbiol.*, 12, 386–393. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.06.008>
36. Yu, J., Yin, Q., Niu, J., Yan, Z., Wang, H., & Wang, Y. (2022). Consistent effects of vegetation patch type on soil microbial communities across three successional stages in a desert ecosystem. *Land Degrad. Dev.*, 33, 1552–1563. <https://doi.org/10.1002/ldr.4194>
37. Chaikovskaya L. A., Baranskaya M. I. The mechanism of action of rhizobacteria *Enterobacter nimipressuralis* 32-3 on the mineral nutrition and productivity of soybean // *Annual Research & Review in Biology*. 2017. Vol. 14. Iss. 5. DOI: 10.9734/ARRB/2017/33934.
38. Чайковська Л. О., Ключенко В. В., Овсієнко О. Л. Поживний режим чорнозему південного за впливу мікробних препаратів та мінеральних добрив // *Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія (Біологічні системи)*. 2012. Т. 4. Вип .3. С. 344–347
39. Иутинская Г. А. Биотехнологический потенциал почвенных бактерий – основы микробных препаратов для растениеводства // *Микробные*

- биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты. Сборник научных трудов. 2013. Т. 5. С. 235–244
- 40.Токмакова Л. Н. Штаммы *Bacillus polymyxa* и *Achromobacter album* – основа для создания бактериальных препаратов // Мікробіологічний журнал. 1997. Т. 59. № 4. С.131–138.
- 41.Кавун М. Ботанічний сад засновувався двічі: Історія створення унікального дендропарку // Дніпропетровський університет. — 2007. — № 3-4. — 6 лют.
- 42.Опанасенко В. Ф., Пахомов О. Є. Історія виникнення ботанічного саду Дніпропетровського національного університету ім. Олесея Гончара.
- 43.Клімат України / За ред. В.М.Ліпінського, В.А.Дячука, В.М.Бабіченко. – К.: Вид. Раєвського, 2003. – 343 с
- 44.Тихоненко Д. Г., Дегтярьов В. В., Крохін С. В.// Практикум з ґрунтознавства. Навчальний посібник/ За редакцією Д. Г. Тихоненко і В. В.Дегтярьова. - Вінниця: Нова Книга, 2008. - 448 с.: іл.
- 45.Назаренко І. І. Ґрунтознавство / І.І. Назаренко, С.М. Польшина, В.А. Нікорич. – К.: Вища освіта, 2004. – 112 с
- 46.Тихоненко Д. Г. Практикум з ґрунтознавства / Д.Г Тихоненко, В.В Дегтярьов, С.В Крохін. – Вінниця: Нова Книга, 2008. – 448 с
- 47.ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбір проб. – Київ: Держспоживстандарт України, 2004. – 14 с.
- 48.ДСТУ ISO 10381-6:2004. Якість ґрунту. Відбір проб. Частина 6. Настанови щодо відбору проб для біологічних досліджень (ISO 10381-6:1993, IDT). – Київ: Держспоживстандарт України, 2005. – 18 с.
- 49.ДСТУ ISO 11464:2007. Якість ґрунту. Попередня підготовка проб (ISO 11464:1994, IDT). – Київ: Держспоживстандарт України, 2008. – 12 с.
- 50.ДСТУ ISO 7218:2007
- 51.ДСТУ EN ISO 11133:2019
- 52.Закон України «Про охорону праці».
- 53.Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».

54. Закон України «Про природно-заповідний фонд України».
55. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування.
56. ДСН 3.3.6.042-99 Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень та робіт на відкритій місцевості.
57. ДСТУ EN 340:2017 Одяг захисний. Загальні вимоги.
58. ДСанПіН 3.8.2.2-000-2001 Санітарні правила профілактики трансмісивних інфекцій (захист від кліщів та комах).
59. НПАОП 0.00-1.71-2013 Правила охорони праці під час експлуатації інструментів та пристроїв.