ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра загальної та прикладної екології і зоології

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему: СУЧАСНИЙ СТАН МІКРОБІОТИ ҐРУНТІВ М. ЗАПОРІЖЖЯ
THE CURRENT STATE OF SOIL MICROBIOTA IN ZAPORIZHZHIA

Виконала: студентка 4 курсу, групи 6.1011
спеціальності 101 Екологія
освітньо-професійної програми
Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування
Михайличенко В.В.

Керівник, доцент кафедри
загальної та прикладної екології і зоології,
доцент, к.с.г.н. Притула Н.М.

Рецензент, доцент,
доцент, к.б.н., Домбровський К.О.

Запоріжжя – 2025

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Біологічний факультет
Кафедра загальної та прикладної екології і зоології
Рівень вищої освіти бакалавр
Спеціальність 101 Екологія
Освітньо-професійна програма Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри загальної та прикладної екології і зоології, д.б.н., професор

О. Ф. Рильський

« 23 » вересня 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ
Михайличенко Валерії Володимирівні

1. Тема роботи «Сучасний стан мікробіоти ґрунтів м. Запоріжжя»
керівник роботи Притула Наталія Михайлівна, к.с.г.н. доцент
затверджена наказом ЗНУ від «29» січня 2025 р. № 160-с
2. Строк подання студенткою роботи «05» червня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: оцінка мікробіоти ґрунтів міста Запоріжжя для визначення впливу антропогенного навантаження на ґрунтові екосистеми та виявлення можливих шляхів їх відновлення.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити:
1) проаналізувати літературні джерела щодо впливу промислових забруднювачів на ґрунтову мікробіоту в урбанізованих територіях;
2) відібрати зразки ґрунтів з різних функціональних зон м. Запоріжжя (промислових, житлових, рекреаційних);
3) визначити загальну чисельність мікроорганізмів та видовий склад основних груп мікробіоти ґрунтів досліджуваних зон;
4) порівняти результати досліджень між різними зонами міста для виявлення просторових закономірностей розподілу мікробіоти та рівня забруднення;
5) розробити рекомендації щодо покращення стану ґрунтової мікробіоти у найбільш забруднених зонах міста.

6) 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1 таблиця, 3 рисунки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ім'я, по-батькові та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Рильський О.Ф., д.б.н., професор		

7. Дата видачі завдання 23 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Огляд літературних джерел. Написання відповідного розділу роботи.	Жовтень 2024 – лютий 2025	Виконано
2.	Вивчення, засвоєння методик дослідження. Написання відповідного розділу роботи.	березень 2025	Виконано
3.	Засвоєння правил техніки безпеки під час виконання експериментальної частини. Написання відповідного розділу роботи.	квітень 2025	Виконано
4.	Проведення експериментальних досліджень. Оформлення результатів експерименту	квітень – травень 2025	Виконано
5.	Оформлення кваліфікаційної роботи. Передзахист роботи.	травень2025	Виконано
6.	Рецензування кваліфікаційної роботи	червень 2025	Виконано
7.	Захист кваліфікаційної роботи	червень 2025	Виконано

Студентка _____ В.В. Михайличенко

Керівник роботи _____ Н.М. Притула

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Н.М. Притула

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота : 50 стор., 1 табл, 3 рисунки, 38 використаних джерел, 1 додаток.

В умовах інтенсивного антропогенного навантаження, характерного для промислових регіонів України, питання збереження та відновлення ґрунтових екосистем набуває особливої важливості.

Метою дослідження є оцінка мікробіоти ґрунтів міста Запоріжжя для визначення впливу антропогенного навантаження на ґрунтові екосистеми та виявлення можливих шляхів їх відновлення.

Виходячи з мети сформовано та виконано такі завдання: проаналізувати літературні джерела щодо впливу промислових забруднювачів на ґрунтову мікробіоту в урбанізованих територіях; відібрати зразки ґрунтів з різних функціональних зон м. Запоріжжя (промислових, житлових, рекреаційних); визначити загальну чисельність мікроорганізмів та видовий склад основних груп мікробіоти ґрунтів досліджуваних зон; порівняти результати досліджень між різними зонами міста для виявлення просторових закономірностей розподілу мікробіоти та рівня забруднення; розробити рекомендації щодо покращення стану ґрунтової мікробіоти у найбільш забруднених зонах міста.

Обєкт дослідження – процеси зміни мікробіоти грунтів під дією антропогенного навантаження;

Предмет дослідження – мікробіота грунтів м. Запоріжжя.

За результатами досліджень сформовано практичні рекомендації, що дозволять покращити мікробний стан грунту.

МІКРОБІОТА ГРУНТУ, АНТРОПОГЕННЕ НАВАНТАЖЕННЯ, МІКРООРГАНІЗМИ, ГУМУС, ГРУНТОВІ ЕКОСИСТЕМИ, КОЛОНІЄУТВОРЮВАЛЬНІ ОДИНИЦІ.

ABSTRACT

Qualification Paper**:** 50 pages, 1 table, 3 figures, 38 references, 1 appendix.

Under conditions of intensive anthropogenic pressure, typical for the industrial regions of Ukraine, the issue of preserving and restoring soil ecosystems becomes particularly important.

The aim of the study is to assess the microbiota of soils in the city of Zaporizhzhia to determine the impact of anthropogenic load on soil ecosystems and to identify possible ways of their restoration.

Based on this aim, the following tasks were formulated and completed: analyze the scientific literature on the impact of industrial pollutants on soil microbiota in urbanized areas; collect soil samples from different functional zones of Zaporizhzhia (industrial, residential, recreational); determine the total number of microorganisms and the species composition of the main microbial groups in the studied zones; compare the research results across the city's zones to identify spatial patterns in microbiota distribution and pollution levels; develop recommendations for improving the condition of soil microbiota in the most polluted areas of the city.

Object of the study – processes of soil microbiota change under anthropogenic influence; Subject of the study – soil microbiota of the city of Zaporizhzhia.

Based on the research results, practical recommendations have been developed to help improve the microbial state of the soil.

SOIL MICROBIOTA, ANTHROPOGENIC LOAD, MICROORGANISMS, HUMUS, SOIL ECOSYSTEMS, COLONY-FORMING UNITS.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЗМЧ – загальне мікробне число;

КУО – колонієутворювальні одиниці;

НААН – Національна Академія аграрних наук.

ЗМІСТ

ВСТУП…… 7
1ОГЛЯД НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ……... 10
1.1 Роль мікроорганізмів у формуванні гумусу……... 10
1.2. Основні групи ґрунтових мікроорганізмів Запорізького регіону… 27
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ……. 30
2.1.Методика відбору зразків ґрунту…… 30
2.2 Методика проведення мікробіологічних досліджень……... 32
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА……... 35
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ…….. 39
ВИСНОВКИ…… 44
ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІІ…… 46
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ…….. 47
ДОДАТКИ……... 51

ВСТУП

Актуальність дослідження. В умовах інтенсивного антропогенного навантаження, характерного для промислових регіонів України, питання збереження та відновлення ґрунтових екосистем набуває особливої важливості. Місто Запоріжжя є одним із найбільших промислових центрів країни, на території якого функціонують металургійні комбінати, хімічні підприємства, енергетичні об'єкти та транспортні вузли. Така концентрація промислових об'єктів призводить до забруднення довкілля важкими металами, нафтовими продуктами, пестицидами та іншими токсичними речовинами.

Мікробіота ґрунту є ключовим біологічним індикатором його екологічного стану, оскільки саме мікроорганізми забезпечують основні процеси біогеохімічних циклів, впливають на родючість ґрунту, трансформацію забруднювачів і стійкість екосистем. Зміни у складі ґрунтових мікробних спільнот можуть свідчити про деградацію ґрунтів або їхню адаптацію до нових умов.

Проте на сьогоднішній день існує обмежена кількість актуальних досліджень, присвячених сучасному стану мікробіоти ґрунтів саме на території м. Запоріжжя. Відсутність систематичних моніторингових даних ускладнює оцінку екологічного ризику та розробку заходів з відновлення ґрунтового середовища. У цьому контексті дослідження складу і функціональної активності ґрунтової мікробіоти Запоріжжя є вкрай важливим для оцінки впливу промислових забруднювачів, підготовки рекомендацій щодо поліпшення якості ґрунтів та формування екологічно безпечних стратегій управління територіями.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є оцінка мікробіоти ґрунтів міста Запоріжжя для визначення впливу антропогенного навантаження на ґрунтові екосистеми та виявлення можливих шляхів їх відновлення.

Виходячи з мети сформовано та виконано такі *завдання*:

– проаналізувати літературні джерела щодо впливу промислових забруднювачів на ґрунтову мікробіоту в урбанізованих територіях;

– відібрати зразки ґрунтів з різних функціональних зон м. Запоріжжя (промислових, житлових, рекреаційних);

– визначити загальну чисельність мікроорганізмів та видовий склад основних груп мікробіоти ґрунтів досліджуваних зон;

– порівняти результати досліджень між різними зонами міста для виявлення просторових закономірностей розподілу мікробіоти та рівня забруднення;

– розробити рекомендації щодо покращення стану ґрунтової мікробіоти у найбільш забруднених зонах міста.

Методи дослідження: порівняльний, описовий, мікробіологічні методи**:** **к**ультивування на поживних середовищах – для визначення кількісного складу (кількість колонієутворюючих одиниць, КУО) різних груп мікроорганізмів (бактерій, актиноміцетів, грибів); **м**орфологічна і тинкторіальна ідентифікація (мікроскопія, фарбування за Грамом) – для попередньої класифікації мікроорганізмів.

Обєкт дослідження – процеси зміни мікробіоти грунтів під дією антропогенного навантаження;

Предмет дослідження – мікробіота грунтів м. Запоріжжя.

Результати, практичне значення одержаних результатів. За результатами досліджень сформовано практичні рекомендації, що дозволять покращити мікробний стан грунту. Результати досліджень можуть бути використані при

викладанні освітніх компонент «Загальна мікробіологія і вірусолгія», «Екологія мікроорганізмів».

Особистий внесок та публікації. Матеріали за темою досліджень опробовані на конференціях, з публікацією тез доповідей: Михайличенко В.В., Притула Н.М. Вплив військових дій на мікробіоту ґрунтів. *Матеріали XI регіональної, і всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми та перспективи розвитку природничих, медичних та фармацевтичних наук»* 26 квітня 2025 року.

Михайличенко В. В., Притула Н. М. «Вплив військових дій на ґрунтові мікроорганізми». *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Актуальні проблеми розвитку сучасної науки: виклики та перспективи»* 29 квітня 2025 року.

1 ОГЛЯД НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Роль мікроорганізмів у формуванні гумусу

Вивчення впливу антропогенних факторів на мікробіоту ґрунтів має довгу історію. Giller et al. (1998)[1] та Baath (1989) [2] показали, що важкі метали значно пригнічують мікробну активність, зменшують різноманіття та порушують ключові біогеохімічні процеси, такі як фіксація азоту, кругообіг вуглецю й мінералізація органіки. Зокрема, навіть помірне підвищення концентрацій кадмію або свинцю призводить до істотного зниження чисельності азотфіксуючих мікроорганізмів (*Azotobacter*, *Rhizobium*).

Ґрунт представляє собою біоорганомінеральну систему, що забезпечує ріст культурних рослин і, таким чином, необхідні для існування всього живого умови. Одним з основних чинників процесу ґрунтоутворення є функціонування ґрунтової мікрофлори, вміст якої в 1 г сягає мільярдів клітин [3]. Цій мікрофлорі властива надзвичайно висока різноманітність видового складу. На думку Р. Тейта [4] в 1 г ґрунту міститься близько 4000 видів мікроорганізмів. Однак, основна їх кількість не здатна рости на живильних середовищах, які використовують у даний час для культивування мікроорганізмів. Їх природним середовищем життєдіяльності може бути організм людини або тварини, водні або морські екосистеми, термальні джерела, продукти харчування тощо. Слід відмітити, що чисельність культурабельних клітин у ґрунті може змінюватися в залежності від стадії сукцесії екосистеми і, за даними дослідників, відношення культурабельних клітин до їх загальної кількості у ризосфері знижувалось від 0,25 до 0,05 протягом перших 30-50 днів вирощування рослин. Сумарна маса прокаріотних організмів на Землі приблизно відповідає біомасі еукаріотів [3]. Серед мікрофлори ґрунту зустрічаються представники майже всіх видів мікроорганізмів, описаних у визначнику Берджі. Бактерії і гриби є найбільш поширеними і екологічно

важливими фітосимбіонтами [4]. Однак, інші представники природних екосистем також відіграють важливу роль у їх функціонуванні. Так, було показано, що виключення безхребетних зі складу біоценозу опаду дубового лісу в 2-5 разів уповільнювало його розкладання мікробним ценозом [3]. Маса мікроорганізмів ґрунту сягає десятих долей відсотка від його загальної маси. Від 0,1 до 1,0 % органічної речовини ґрунту представлено клітинами різних видів мікроорганізмів [4].

Згідно з даними болгарських вчених [5], маса бактерій та мікроскопічних грибів у лучних екосистемах сягає декількох тон на один гектар. Максимальна її кількість спостерігалась у осінній період, що автори пов’язують з надходженням у ґрунт у цей час рослинних решток. Вміст вуглецю мікробної маси складає від 2 до 10 % його загального вмісту в тропічних ґрунтах і є вищим у порівнянні з ґрунтами помірних широт на 1-4 %. Чисельність мікроорганізмів у ґрунті (показник біогенності ґрунту) коливається не тільки протягом року, але й упродовж незначних проміжків часу в залежності від його температури, вологості, стану рослинного покриву тощо. Наприклад, у південних регіонах на неполивних ґрунтах у літній посушливий період домінантами є актиноміцети, а весною і в осінній період – бактерії, чисельність яких влітку значно знижується. Зволоження ґрунту помітно впливає на стан мікробного ценозу в таких зонах. Як правило, активізація діяльності мікрофлори ґрунту відбувається у весняний період року [5].

Функціонування ґрунтової мікрофлори є одним з важливих факторів, що сприяють структуруванню ґрунту. Так, наприклад, розвиваючись на поверхні часточок ґрунту, гриби і актиноміцети оточують ці часточки міцелієм і формують водостійкі агрегати, які на наступному етапі можуть скріплюватися гумусом [4]. Певну роль у цьому процесі відіграють мікроорганізми, що синтезують позаклітинні полісахариди [6].

Мікроорганізми є надзвичайно важливим чинником формування родючості ґрунту. Наявність у ґрунтових екосистемах найрізноманітніших груп мікроорганізмів, які відрізняються за біологічною та біохімічною специфічністю, обумовлює величезне їх значення у процесах, що відбуваються у ґрунті. Кількісний склад і співвідношення окремих представників у мікробному ценозі ґрунту значною мірою залежить від способу обробітку ґрунту [4], надходження в ґрунт рослинних решток, які в першу чергу трансформуються під впливом неспорових бактерій і мікроскопічних грибів, а на пізніших стадіях цього процесу – бацил та актиноміцетів [7].

Значний вплив на поширення в ґрунті тих чи інших груп мікроорганізмів спричиняють кореневі виділення рослин. Згідно з існуючими даними [4,6,7], кореневі виділення складають близько 20 % від загальної кількості продуктів фотосинтезу рослин. До складу кореневих виділень входять вуглеводи, органічні кислоти, амінокислоти, пептиди, алкалоїди, глюкозиди, вітаміни, речовини фенольної природи тощо. Серед органічних кислот визначено яблучну, янтарну, винну, лимонну, фумарову, щавелеву та інші кислоти.

Показано, що склад кореневих екзометаболітів залежить від умов та стадії розвитку рослин. Так, у складі виділень дводобових проростків насіння томатів переважно визначалась щавелева кислота, вміст якої сягав 296 нг у розрахунку на насінину, що складало 48,9 % від загальної кількості досліджуваних органічних кислот. У менших кількостях визначались піровиноградна (18,6 %), кетоглутарова (17,3 %) і молочна (12,7 %) кислоти. Після 4 діб пророщування насіння у складі екзометаболітів переважала лимонна кислота, яка взагалі не виявлялась після дводобового пророщування насіння. Її вміст сягав 2060 нг на 1 насінину, що складало 53,7 % від загальної кількості органічних кислот у цих виділеннях. Вміст щавелевої, молочної та піровиноградної кислот сягав, відповідно, 16,6, 12,3 та 7,6 %. У виділеннях 14-добових проростків вміст лимонної кислоти сягав 13630 нг на рослину і складав 55 % від загальної кількості

органічних кислот. Частка щавелевої, яблучної та молочної кислот складала, відповідно, 5,7, 15,3 і 10,0 % від загальної кількості органічних кислот [8].

Відмінності у кількісному і якісному складі кореневих виділень та у трофічних потребах мікроорганізмів спричиняють значний вплив на ріст у зоні кореня представників мікрофлори різних таксономічних груп, а також їх антагоністичну активність. Так, за наявності у середовищі глюкози *Pseudomonas chlororaphis* характеризувався антифунгальною активністю до грибів *Fuzarium oxisporum*. Зона пригнічення росту грибів сягала 13 мм. Однак, при культивуванні за тих же умов іншого виду цих бактерій, *P. fluorescens*, антифунгальної активності не виявлено. На середовищі з целобіозою, навпаки, зона пригнічення росту гриба бактеріями *P. fluorescens* складала 30 мм, а *P. chlororaphis*– 12 мм [9].

Кореневі виділення є харчовим субстратом для інших компонентів біоценозу ґрунту, в першу чергу, мікроорганізмів, які інтенсивно розмножуються у кореневій зоні рослин, особливо в тій частині, яка безпосередньо прилягає до поверхні коріння у радіусі від нього не більше 2 мм, – ризосфері [8].

Ризосфера рослин є динамічним середовищем, у якому діє багато факторів, які визначають структуру і склад мікробних спільнот, що колонізують ризосферу і ризоплану рослин. Дослідження структури і складу цих угруповань є фундаментальним завданням для розуміння того, як впливають на біологічні процеси ґрунту фактори навколишнього середовища і практика рослинництва [7]. Відомо, що склад мікрофлори ризосфери різних рослин суттєво відрізняється. До того ж, ці відмінності є істотними, якщо порівняти мікробні ценози об’єму ґрунту і ризосфери [9]. Крім того, мікрофлора поверхні кореня (ризоплана) в певній мірі також відрізняється від мікробного ценозу ризосфери. В ризоплані переважають грамнегативні бактерії. Безпосередньо на корінні рослин виявляється менша кількість мікроорганізмів, ніж у прикореневій зоні. Це може бути обумовлено тим, що корені виділяють не тільки поживні для мікроорганізмів речовини, а й продукують фітонциди, що інгібують розвиток мікроорганізмів у ризоплані. В

зоні молодого коріння розмножуються переважно неспорові бактерії і мікроскопічні гриби, тоді як бацили поширені слабо, що пов’язано з тим, що ці бактерії погано споживають прості органічні сполуки, які виділяються у таких зонах кореня [6].

Мікрофлора ризосфери змінюється в залежності від виду та стадії розвитку рослин. Показано, що серед культурабельних 11 бактерій ризосфери цукрових буряків близько 9 % складали представники роду *Microbacterium* [9]. У ризосфері кукурудзи домінували бактерії родів *Pseudomonas* та *Enterobacter*. Серед мікроорганізмів, що здатні розчиняти мінеральні фосфати, найбільш широко були представлені роди *Penicillium* та *Streptomyces*. У неризосферному ґрунті домінували бактерії роду *Bacillus*. Однак, було показано, що бактеріальне різноманіття, як правило, нижче у ризосфері, ніж у загальному об’ємі ґрунту [9].

Методами молекулярної біології при аналізі зволожених зразків грунту було встановлено, що у шарі ґрунту, який не містить кисню, домінуючими видами бактерій були представники родів *Bacillus* та *Clostridium*, тоді як у шарі ґрунту, насиченому киснем, домінували представники протеобактерій [6].

Основним геохімічним циклом ґрунту є колообіг вуглецю, складовими якого є синтез фототрофними організмами органічної речовини з диоксиду вуглецю і її трансформація до простих сполук. Під впливом внесення рослинних решток у ґрунті спостерігається спалах чисельності різних груп мікроорганізмів і підвищення їх біохімічної активності. Найбільш поширеною вуглецьвмісною сполукою в природі є целюлоза. Її вміст у сухій масі рослин складає від 40 до 70 %. У природних умовах трансформація целюлози здійснюється за участі угруповань мікроорганізмів. Значна роль у цьому процесі належить грибам, у тому числі сапротрофним представникам родів *Trichoderma, Chaetomium, Dicoccum, Stachybotrys, Penicillium* і *Aspergillus*, а також, незавершеним грибам *Alternaria* та *Fumago* [10].

Речовини, що утворюються при розкладі целюлозних матеріалів, споживаються іншими представниками біоценозу ґрунту. Після внесення рослинних матеріалів у ґрунт вміст у ньому целюлозоруйнівних мікроорганізмів зростав від декількох десятків тисяч до десятків мільйонів на 1 г сирої речовини. Домінуючими були мікроскопічні гриби і бактерії. Співвідношення різних родів і видів целюлозоруйнівних мікроорганізмів (бактерій, актиноміцетів, грибів) у ґрунтах залежить від багатьох факторів: типу ґрунту, характеру рослинності, кліматичних умов тощо.

Мікроорганізми ґрунту здатні виділяти речовини, що стимулюють ріст та розвиток фітобіонтів. Синтез ними в кореневій зоні вітамінів (тіаміну, вітаміну В 12, пиридоксину, рибофлавіну, пантотенової кислоти тощо), а також фітогормонів (гіберелінів, гетероауксинів та інших), спричиняє позитивний вплив на розвиток рослин [9]. Крім того, мікроорганізми можуть бути джерелом накопичення у ґрунті токсичних речовин. Провідна роль у цьому належить представникам родів *Bacillus* і *Pseudomonas*. Найбільш помітний фітотоксичний вплив спричиняли *B amilosina, B brevis* і *Pseudomonas fluorescens* та деякі інші. Головним фактором, що визначає можливість синтезу фітотоксичних речовин, є внесення у ґрунт рослинних решток чи деяких вуглеводів [3].

Доведено, що ґрунт можна штучно збагатити мікроорганізмами-антагоністами шляхом внесення перегною. При цьому в ґрунті підвищується кількість мікроорганізмів-антагоністів, що відносяться до бактерій, актиноміцетів, мікроскопічних грибів роду *Trichoderma*, у той час, як чисельність фітопатогенних грибів роду *Helminthosporium* помітно знижується.

Гумус відіграє інтегральну роль у родючості ґрунтів. Його вміст у ґрунтах залежить від багатьох факторів, серед яких важлива роль належить гранулометричному складу, гідроморфізму та їх карбонатності [6]. Важлива роль в утворенні гумусу і його мінералізації належить ґрунтовій мікрофлорі.

Інтенсивність мікробної трансформації органічних речовин у ґрунтах підвищується у напрямі від північних до південних регіонів.

У ґрунтах південних регіонів підвищується відносний вміст целюлозоруйнівних бактерій у порівнянні з грибами. Не дивлячись на зниження вмісту мікроміцетів у ґрунтах південних регіонів, їх видова різноманітність зростає. В ґрунтах північних регіонів, де повільно протікають процеси мінералізації, найбільш широко представлені гриби роду *Penicillium*. При просуванні на південь спостерігається підвищення вмісту представників роду *Aspergillus*. Гриби цих двох родів складають понад 70 % мікроміцетів ряду типів ґрунтів. Ґрунти північних регіонів значно бідніші за вмістом спорових бактерій і актиноміцетів у порівнянні з південними. Ці мікроорганізми розмножуються на пізніших стадіях розкладу рослинних решток.

У ґрунтах, де відбуваються інтенсивні процеси мінералізації, широко поширені спорові бактерії, що здатні засвоювати як органічний, так і мінеральний азот (*Bacillus subtilis* і *B. megaterium*). Навпаки, у ґрунтах, де процеси мінералізації органічних сполук протікають повільно, превалюють спороутворюючі бактерії, що споживають органічні форми азоту [6].

Досліджуючи молекулярно-біологічними методами структуру бактеріальної спільноти ряду зразків ґрунту, було показано, що подібні типи ґрунтів характеризуються подібною структурою домінантних видів бактерій [3]. Слід відзначити, що, незважаючи на значну увагу дослідників до різноманіття і функціонування біоценозів ґрунту, в літературі недостатньо висвітлено питання щодо закономірностей змін їх складу в залежності від умов довкілля. Однак відомо, що за дії на мікробний ценоз стресового фактору, який спричиняє вплив на окремі еколого-трофічні групи мікроорганізмів, спостерігається найбільш помітний розвиток певних груп бактерій і збіднення видового різноманіття угруповання.

Кількісний склад мікрофлори ґрунту не завжди є показником його родючості. За певних умов у результаті інтенсивного розвитку мікроорганізмів мінеральні форми основних біогенних елементів ґрунту можуть споживатися мікробними клітинами і переходити до їх складу. Подібний процес відбувається у ґрунті після внесення значної кількості соломи. При цьому спостерігається інтенсивний розвиток целюлозоруйнівних мікроорганізмів та представників інших еколого-трофічних груп, що супроводжується зниженням вмісту в ґрунті мінеральних форм азоту і його накопиченням у мікробних клітинах (іммобілізація) [4]. За цих умов мікроорганізми можуть бути конкурентами рослин у процесі споживання азоту. Однак, це явище носить тимчасовий характер.

Колообіг азоту в ґрунті. Потреби рослин у азоті більш ніж на 2/3 забезпечуються за рахунок біологічного азоту [11]. Частка біологічного азоту в урожаї складає від 60 до 90 %. Сумарна річна продукція азотфіксації в екосистемах сягає 175-190 млн т. Для порівняння можна сказати, що тільки близько 5 % азоту від цієї кількості випускали заводи світу в кінці 20-го століття у вигляді азотних добрив [12].

Азотфіксувальною активністю характеризуються представники бульбочкових бактерій, мікроорганізмів родів *Clostridium, Azotobacter, Azospirillum, Pseudomonas, Acetobacter, Alcaligenes, Agrobacterium, Erwinia, Klebsiella, Bacillus*, синьо-зелених водоростей та інших бактерій [13].

У середині двадцятого століття вважалося, що азотфіксувальні мікроорганізми відносяться до двох основних груп: вільноживучих та симбіотичних азотфіксаторів [14]. Однак, після дослідження функціонування у агроценозах злакових рослин азотфіксувальних бактерій роду *Azospirillum* [11] стало зрозумілим питання щодо існування більш тісних, асоціативних зв’язків азотфіксувальних мікроорганізмів з небобовими рослинами.

Дослідниками встановлено, що *Azotobacter chroococcum* здатний колонізувати не тільки ризосферу, а й ризоплану рослин. Інший вид азотобактера, *A. vinelandii*, є типовим асоціативним азотфіксатором стоколосу безостого та канарника очеретяного. Ці бактерії колонізують ризоплану даних видів рослин [13]. Типовими діазотрофами кореневої зони тимофіївки лучної є бактерії *Bacillus subtilis*. Ці бактерії здатні колонізувати ризосферу і ризоплану тимофіївки [13].

Таким чином, у даний час існування явища асоціативної азотфіксації в агроекосистемах, під яким розуміють розвиток у кореневій зоні небобових рослин азотфіксувальних мікроорганізмів, тісно пов'язаних з ними просторово і функціонально, не викликає сумніву. В асоціативні зв'язки з певними видами рослин вступають не тільки бактерії роду *Azospirillum*, а й *Azotobacter, Agrobacterium, Klebsiella, Enterobacter, Pseudomonas* [14]. Асоціативними бактеріями фіксуються помітні кількості атмосферного азоту. В агроценозах зі злаковими культурами важлива роль належить бактеріям роду *Azospirillum*. [12].

У ґрунті під злаковими травами продуктивність азотфіксації протягом вегетаційного періоду сягала 40 кг азоту на 1 га [12], а за 150 діб вегетації – від 16 до 22 кг азоту на 1 га [13]. Слід відмітити, що інтенсивність азотфіксації визначається не тільки видовими особливостями рослин, а навіть їх сортовими відмінностями. Було встановлено, що у різних сортів ячменю цей показник може відрізнятись у 3,0-3,5 раза, а у різних сортів ярої пшениці – у 250-450 разів [12].

Значна роль у поповненні біосфери азотом належить симбіотрофній азотфіксації. Збудниками цього процесу є бактерії, що утворюють бульбочки на корінні чи стеблах рослин. Вказані мікроорганізми відносяться до родів *Rhizobium* (6 видів), *Bradyrhizobium* (3 види), *Sinorhizobium* (5 видів), *Mesorhizobium* (5 видів), *Azorhizobium* (1 вид) [12]. Для цих видів бактерій є характерною певна специфічність до видів і навіть до певних сортів рослин [11], з якими вони здатні формувати ефективні симбіотичні взаємовідносини. В

оптимальних умовах функціонування бобово-ризобіального симбіозу потенційні розміри симбіотичної азотфіксації можуть сягати 130-390 кг/га. Ще більш високих значень цей показник може сягати для багаторічних бобових трав – 270-550 кг/га [13].

За рахунок біологічної фіксації азоту повітря зернобобові рослини протягом вегетаційного періоду засвоюють до 60-180 кг азоту на 1 га. Це забезпечує до 90 % їхньої потреби в азоті. Після збирання зернобобових культур у ґрунті залишається 20-70 ц/га кореневих і пожнивних решток, у яких міститься 45-130 кг азоту, 10-30 кг фосфору і 20-70 кг калію [5]. Проте на думку деяких дослідників внесок симбіотичної азотфіксації у загальний баланс «біологічного» азоту є незначним. Навіть в агроекосистемах доля бобових культур не перевищує 10 % від загальних посівів сільськогосподарських культур, а в природних фітоценозах бобові рослини є присутніми лише на перших етапах рослинних сукцесій і практично відсутні у клімаксних екосистемах [7].

Поряд з азотфіксувальними мікроорганізмами до складу мікробних ценозів ґрунтів завжди входять різні види бактерій, які здатні розкладати азотовмісні органічні речовини. Процес розкладу цих речовин протікає з виділенням амонію і називається амоніфікацією. Аміак, що утворюється при цьому, є субстратом для іншої групи мікроорганізмів – нітрифікаторів. Процес окиснення амонію вузькоспеціалізованими бактеріями у нітрити, потім – у нітрати, а у випадку гетеротрофних мікроорганізмів – у різні органічні азотовмісні сполуки, називається нітрифікацією. Основними чинниками цього процесу є автотрофні бактерії родів *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*.

Значно пізніше було доказано, що окиснювати амоній та інші азотовмісні сполуки до нітриту і нітрату може значна кількість видів гетеротрофних мікроорганізмів. Згідно з існуючими даними гетеротрофна нітрифікація відіграє важливу, часто провідну, роль в окисненні відновлених сполук азоту [11]. Нітрат, що накопичується в ґрунті при нітрифікації, може споживатися рослинами, а

також багатьма видами мікроорганізмів в асиміляційному процесі. Більш доступною формою азоту для рослин є амоній, оскільки нітрат необхідно відновлювати до NH^{4+}, що потребує додаткових витрат енергії. Однак інтенсивність асиміляції амонію чи нітрату залежить від властивостей грунту (pH, вмісту катіонів, співвідношення нітрату та амонію), фази розвитку рослин та їх біології. На слабокислих ґрунтах ефективнішими є нітратні добрива, а на нейтральних – амонійні.

При окультуренні ґрунтів серед різних форм азоту в них зростає відсоток нітрату з 20 % у ґрунтах з низькою родючістю і до 60 % – у добре окультурених. У більшості випадків це обумовлено інтенсифікацією процесу нітрифікації. Тому високу нітрифікаційну властивість ґрунту використовують як один з показників його родючості. Важливим процесом, який обумовлений функціонуванням мікрофлори ґрунту, є денітрифікація. Цей процес супроводжується зниженням у ґрунті мінерального азоту і може протікати під впливом як анаеробних, так і аеробних мікроорганізмів. У процесі денітрифікації відбувається відновлення нітрату через NO^{2-}, NO, N_2O до N_2.

Повний ланцюг нітратного дихання функціонує лише у деяких видів бактерій, що відносяться до родів *Alcaligenes, Bacillus, Pseudomonas, Thiobacillus* та деяких інших. Однак, часто дисиміляційне відновлення нітратів закінчується на проміжних стадіях. Це спостерігається в умовах, неоптимальних для повної денітрифікації, коли в даному процесі утворюється N_2O [12].

Денітрифікація, як анаеробний процес, значно посилюється при перезволоженні ґрунту, а також тоді, коли, поряд з органічними добривами (гній), вносять нітратвмісні мінеральні добрива. Процес денітрифікації відбувається і в незатоплених ґрунтах, що пов’язано зі створенням в них анаеробних мікрозон. Рихлення ґрунту та підвищення в ньому кисню пригнічує денітрифікацію. Однак порушення структури ґрунту, його розпилення сприяє підвищенню вмісту оксиду азоту в атмосфері ґрунту [14].

Згідно з існуючими даними [11-14], якщо цикл азоту досяг стадії нітрифікації і для її перебігу є сприятливі умови, тоді втрати азоту за рахунок денітрифікації попередити неможливо. В даний час відсутні специфічні інгибитори, які б пригнічували функціонування денітрифікувальних мікроорганізмів у ґрунті. Для зниження втрат азоту, що може відбуватись при денітрифікації, рекомендовано інгібувати процес нітрифікації [12]. Можна специфічно пригнічувати функціонування бактерій *Nitrosomonas*, що відповідають за першу стадію перетворення $NH^{4+} \rightarrow NO^{2-}$ [14].

Мікробна мобілізація фосфору в ґрунті. Важливим елементом біосфери є фосфор. За своїм впливом на розвиток рослин він займає друге місце після азоту. Вміст фосфору в ґрунтах України сягає 0,05-0,15 %, а в метровому шарі ґрунту в залежності від його типу складає від 3,8 до 22,9 т/га [48], тоді як у дерновопідзолистих ґрунтах – близько 4 т/га. В той же час у ґрунтах Західних регіонів України вміст фосфору в метровому шарі ґрунту складає 1,3-4,5 т/га [15]. У ґрунті фосфор зустрічається у формі органічних сполук (фітин, гліцерофосфат, залишки нуклеїнових кислот та інших сполук), а також у вигляді важкорозчинних неорганічних його сполук.

Основна кількість органічного фосфору ґрунту зосереджена у фітині. Вміст фосфору в органічних сполуках ґрунту сягає 25-85 % від його загальної кількості, а по відношенню до органічної речовини ґрунту його вміст складає від 0,5 до 2,0 %. Від 15 до 75 % фосфору ґрунту знаходиться у формі важкорозчинних неорганічних сполук: фосфату кальцію, заліза, алюмінію, що входять до складу ряду мінералів (апатиту, фторапатиту, фосфориту, вівіаніту тощо) [16]. У зв’язку з тим, що фосфор у ґрунті знаходиться у важкодоступних для рослин формах, при загальному його вмісті в орному шарі 1000 кг/га у ґрунтовому розчині його вміст не перевищує 1 кг [15].

Незважаючи на високий загальний вміст фосфору, в ґрунтах він переважно знаходиться у малорухомих формах. Ступінь його використання рослинами з

ґрунту складає лише 3-5 % . Навіть фосфати, що вносять в ґрунт у вигляді добрив, засвоюються рослинами з низькою ефективністю. Доступність для рослин фосфору в рік внесення добрив у ґрунт складає від 10 до 30 %. Це обумовлено здатністю окстдів кальцію, заліза, алюмінію та інших елементів, а також глинистих мінералів не тільки зв'язувати іони фосфору, але й утримувати їх [16].

Мобілізувати фосфор з важкорозчинних сполук заліза, алюмінію і кальцію здатні мікроорганізми багатьох видів. Вони широко розповсюджені в агроекосистемах. Так, їх вміст у ризоплані кукурудзи сягає 45 %, бавовнику та мандарину – 60 % від загальної чисельності мікрофлори [15]. Згідно з іншими даними [16], вміст фосфатмобілізувальних мікроорганізмів у ризосфері сільськогосподарських культур сягає 15-30 %. Найбільша їх кількість спостерігається у ризосфері цукрових буряків, тоді як у ризосфері озимої пшениці, ячменю, гороху їх значно менше. Активністю мобілізації фосфату з важкорозчинних сполук характеризуються мікроорганізми родів *Pseudomonas*, *Azotobacter Enterobacter, Bacterium, Pseudomonas, Bacillus, Agrobacterium, Burkholderia, Aspergillus, Penicillium, Rhodotorula*, сульфатвідновнювальні бактерії роду *Desulfobacterium*, везикулярно-арбускулярні мікоризні гриби *Trichoderma* та інші. [16].

Відомо, що за нейтральних значень pH важкорозчинний фосфат кальцію практично не розчиняється. У лимоннокислому буферному розчині розчинність $C_3(PO_4)_2$ істотно підвищується зі зниженням pH і сягає максимальних значень при pH 5,0. Таким чином, нагромадження іонів фосфату у культуральній рідині при рості бактерій роду *Bacillus* і *Pseudomonas* у середовищі, що містить важкорозчинний фосфат кальцію, обумовлено здатністю даної сполуки розчинятись у кислому середовищі. Ймовірно, такий механізм не має важливого значення при рості в середовищах з важкорозчинними фосфатвмісними неорганічними сполуками азотфіксувальних мікроорганізмів роду *Azotobacter* і *Agrobacterium radiobacter*. Так, культивування бактерій *A. chroococcum*,

A. vinelandii у середовищі Ешбі і *A. radiobacter* на гороховому відварі з $Ca_3(PO_4)_2$ приводило до збільшення чисельності клітин на 3-4 порядки. Отримані результати дозволяють припустити, що мобілізація фосфору з важкодоступного фосфату кальцію здійснюється на поверхні клітин цих мікроорганізмів і обумовлена контактною взаємодією даного мінералу з кислими зонами глікокаліксу. Це сприяє розчиненню фосфату кальцію і задоволенню потреби бактерій у фосфорному живленні [10].

Для покращення фосфорного живлення пшениці запропоновано застосовувати гриби *Penicillium radicum*, що виділені з ризосфери цих рослин та характеризуються високою активністю мобілізації фосфору з важкодоступних неорганічних сполук. Розчинення фосфорвмісних речовин цим грибом автори пов'язують з секрецією ним глюконової кислоти, що знижує pH, чи з утворенням нею хелатних сполук [9].

Мобілізувати фосфор з важкорозчинного фосфату кальцію здатні мікроміцети роду Trichoderma. Їх фосфатмобілізувальна активність складала близько 70 % показників Bacillus megaterium subsp. phosphaticum. Інокуляція насіння нуту цими грибами покращувала його ріст і підвищувала врожайність культури. У ґрунті поширені мікроорганізми, які здатні мобілізувати фосфор з органічних сполук. Значна роль у цьому процесі належить спороутворювальним бактеріям роду *Bacillus* [10].

Органічні сполуки фосфору здатні розкладати бактерії родів *Pseudomonas*, мікроміцети родів *Aspergillus, Penicillium, Rhizopus, Trichotecium, Alternaria*, дріжджі *Rhodotorula, Saccharomyces, Candida, Hansenula*. Це досягається завдяки здатності мікроорганізмів синтезувати фосфатази. Виділені 16 штамів фосфатмобілізувальних бактерій, що були віднесені до 4 видів роду *Bacillus* (5 штамів *B. megaterium*, 4 штами *B. subtilis*, 4 штами *B. pumilus* і 3 штами *B. cereus var. mycoides*) росли в середовищі з гліцерофосфатом, як єдиним джерелом фосфорного живлення, і за три доби культивування чисельність життєздатних

клітин зростала з 1-4 × 10^5 до 0,23- 36,0 × 10^8 клітин в 1 мл, а концентрація фосфату в середовищі складала від 22 до 284 мг в 1 л. Найбільш високий приріст клітин та накопичення фосфату спостерігали у штамів *B. megaterium* та *B. cereus var. mycoides* і *B. subtilis* [9].

Здатність мінералізувати органічні фосфорвмісні речовини і розчиняти важкорозчинні неорганічні його сполуки поширена у мікроскопічних целюлозоруйнівних грибів. За зниженням активності цих процесів целюлозоруйнівні мікроорганізми можна розмістити в такій послідовності: актиноміцети, гриби, целюлозоруйнівні бактерії. Таким чином, це свідчить про важливу роль целюлозоруйнівних грибів у трансформації важкодоступних для рослин органічних та неорганічних сполук фосфору [7].

Калій ґрунту і роль мікроорганізмів у підвищенні його доступності для рослин. Важливе значення в живленні рослин належить калію. Він є необхідним та незамінним для них елементом, який впливає на фізичний стан колоїдів клітин, збільшує гідрофільність протоплазми і провідність стінок клітин, визначає їх тургор, стійкість до деяких несприятливих факторів середовища. Без достатнього забезпечення калієм знижується морозостійкість рослин, їх стійкість до посухи, перезволоження, шкідників і хвороб [17].

Протягом росту рослин калій знаходиться, головним чином, в іонній формі і тільки близько 1 % – у складі білкових сполук клітин. Потенційні запаси K_2O у метровому шарі ґрунтів складають від 180 до 350 т/га. Вміст цього елементу в орному шарі сягає 24-51 тон на гектар і коливається від 0,1 % в торф’яних ґрунтах до 2,3-2,4 % – у чорноземах звичайних. З підвищенням у ґрунті вмісту тонкодисперсних часточок, у них, як правило, зростає кількість калієвмісних мінералів типу польових шпатів та тришарових алюмосилікатів, у яких калій є важкодоступним для рослин [18].

Інтенсифікація росту рослин і підвищення їх врожайності за рахунок внесення азотних та фосфорних добрив підвищує використання культурними

рослинами калію на 44-46 % у порівнянні з неудобреним фоном. У ґрунтах більшості країн світу складається негативний баланс за калієм, що супроводжується зниженням ефективності застосування азотних і фосфорних добрив [9].

Доступність калію для рослин у певній мірі забезпечується впливом мікроорганізмів та хімічних чинників. Вчені дослідили мікробну мобілізацію калію з алюмосилікатів. Доведено можливість мобілізації калію ґрунтовими бактеріями з мусковіту, гідромусковіту і біотиту. Однак, не дивлячись на важливість мобілізації мікроорганізмами калію у ґрунті з його мінералів, цьому питанню присвячено незначну кількість наукових праць. Тому ця важлива проблема потребує більш широкого дослідження [7].

Таким чином, аналіз літератури свідчить про надзвичайно важливе значення мікроорганізмів у формуванні ґрунту і підтриманні його родючості. Вони трансформують рослинні рештки, беруть участь у формуванні структури ґрунту, утворенні гумусу і його мінералізації. Глобальною є роль мікроорганізмів у поповненні біосфери, в тому числі ґрунтів, мінеральним азотом, мобілізації фосфору з органічних та важкорозчинних неорганічних сполук. Важливою, однак, недостатньо дослідженою є участь мікроорганізмів у мобілізації калію в агроекосистемах.

Moffett et al. (2003) виявили, що при забрудненні цинком спостерігається зменшення бактеріального різноманіття в 2–3 рази. Крім того, відбувається структурна трансформація мікробних спільнот: зникають чутливі до металів таксони, зростає частка стрес-адаптивних бактерій [5].

Згідно з Fierer et al. (2003), на забруднених ділянках істотно знижується активність ґрунтових ферментів (дегідрогенази, фосфатази, уреази), що безпосередньо впливає на швидкість розкладу органічних решток і кругообіг поживних речовин [19].

Krzyszowska et al. (1994) показали, що вибухові речовини (TNT, RDX) пригнічують мікробіологічну активність, особливо на ранніх етапах експозиції. Подібні результати отримали також Ramasamy (2009) у звіті UNEP щодо екологічних наслідків війни, де наголошено на комплексному хімічному та фізичному тиску на ґрунтову біоту [20, 21].

Wenzel (2009) довів, що залишки боєприпасів і вибухівки, навіть при малих концентраціях, здатні індукувати мутагенез у ґрунтових мікроорганізмів, змінюючи їхні метаболічні траєкторії [22].

Singh і Kalamdhad (2011) вказують, що навіть у віддалені терміни після припинення забруднення, у ґрунтах зберігаються зміни в мікробному складі, зокрема в симбіотичних системах рослина-бактерія [23].

Zhang et al. (2018) встановили, що TNT змінює співвідношення основних мікробіальних філумів: зменшується частка *Actinobacteria* і *Acidobacteria*, а *Proteobacteria* та *Firmicutes* займають домінантні позиції [24].

Gadd (2010) описав здатність деяких мікроорганізмів (напр. *Rhodococcus*, *Pseudomonas*) до біоакумуляції й трансформації металів, що дає підстави для біоремедіаційного застосування [25].

Rillig et al. (2019) підкреслили, що навіть при збереженні частини видового складу, функціональні параметри мікробіоти (мінералізація, фіксація азоту, стабілізація структури ґрунту) відновлюються повільніше. Особливо це стосується ґрунтів зі складною історією деградації [26].

У контексті військових дій перспективними є підходи мікробної ремедіації (Juwarkar et al., 2008) та фіторемедіації (Chen et al., 2004). Використання адаптованих штамів *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* дозволяє ефективно знижувати токсичність середовища, активізуючи локальні процеси самоочищення [28].

1.2. Основні групи ґрунтових мікроорганізмів Запорізького регіону

Ґрунтові мікроорганізми Запорізького району та міста Запоріжжя відіграють ключову роль у підтриманні родючості ґрунтів, забезпеченні кругообігу поживних речовин та формуванні екологічної рівноваги. У зв'язку з різноманіттям ландшафтів і значним антропогенним впливом, склад мікробіоти ґрунтів у цьому регіоні є досить різноманітним. Ґрунти Запорізької області, зокрема чорноземи, багаті на азотфіксуючі бактерії, такі як *Azotobacter chroococcum* та *Bradyrhizobium spp.*. Ці мікроорганізми сприяють збагаченню ґрунту азотом, покращуючи його родючість [29].

У ґрунтах регіону виявлено значну кількість бактерій, здатних мобілізувати фосфати, таких як *Bacillus megaterium* та *Pseudomonas fluorescens*. Вони перетворюють нерозчинні форми фосфору в доступні для рослин, що важливо для підвищення врожайності [30].

Trichoderma spp. ma Streptomyces spp. активно розкладають органічні рештки, сприяючи утворенню гумусу та покращенню структури ґрунту. Їх активність особливо важлива в умовах посушливого клімату Запорізької області [32].

Представники родів *Aspergillus, Penicillium* та *Fusarium* відіграють важливу роль у розкладі органічної речовини та формуванні ґрунтової структури. Їх чисельність і активність залежать від типу ґрунту та агротехнічних заходів [31].

Дослідження показують, що інтенсивне сільське господарство, зокрема надмірне використання мінеральних добрив та пестицидів, негативно впливає на біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів. Це призводить до зниження чисельності корисних мікроорганізмів та порушення ґрунтових процесів [32].

Крім того, військові дії на території Запорізької області спричинили хімічне та фізичне забруднення ґрунтів, що призвело до загибелі мікробіоти та

погіршення екологічного стану земель. Зокрема, внаслідок вибухів та використання важкої техніки відбувається ущільнення ґрунту, що ускладнює газообмін і водопроникність, негативно впливаючи на мікроорганізми [33].

Внаслідок вибухів у ґрунт потрапляють важкі метали, такі як свинець, мідь, кадмій, нікель та хром. Ці елементи накопичуються в ґрунті, перевищуючи гранично допустимі концентрації, що призводить до токсичного впливу на мікроорганізми та рослини.

Тепловий вплив вибухів та хімічне забруднення призводять до загибелі значної частини мікроорганізмів у ґрунті. Зокрема, знижується чисельність азотфіксувальних, фосфатмобілізувальних та амілолітичних бактерій, що порушує кругообіг поживних речовин у ґрунті. Вибухи та пожежі спричиняють згоряння органічної речовини в ґрунті, що веде до зниження вмісту гумусу. Це, в свою чергу, зменшує родючість ґрунту та його здатність підтримувати мікробіологічну активність. У місцях вибухів та згорілої техніки спостерігається підвищення pH ґрунту (підлужнення), що може впливати на доступність поживних речовин для рослин та мікроорганізмів [31].

Військові дії в Запорізькій області призводять до комплексної деградації ґрунтів, що включає фізичне руйнування, хімічне забруднення та зниження біологічної активності. Це вимагає проведення заходів з відновлення ґрунтів, таких як біоремедіація та внесення органічних добрив, для відновлення їх родючості та екологічної функції.

У промислових зонах Запоріжжя спостерігається зменшення чисельності чутливих до забруднення мікроорганізмів, таких як азотфіксувальні бактерії та мікоризні гриби. Натомість, у рекреаційних та сільськогосподарських угіддях з помірним антропогенним навантаженням, мікробіота ґрунтів є більш різноманітною та активною [32].

Техногенний вплив порушує рівновагу мікробних угруповань ґрунту. Особливу увагу слід звернути на вміст вільноживучого азотфіксатора роду

Azotobacter техногенно трансформованих ґрунтів, який значною мірою визначає біологічний потенціал ґрунтів, забезпеченість їх поживними елементами та фітотоксичність. Крім того, чутливість азотобактера як універсального тесту проявляється не тільки в сильно забруднених ґрунтах, а і в ґрунтах із середнім та низьким ступенями токсичності (Andrejuk et al., 2001) [33].

Отже, ґрунтові мікроорганізми Запорізького району та міста Запоріжжя представлені широким спектром таксономічних груп, які забезпечують функціонування екосистем. Рівень їхньої активності та різноманіття залежить від типу ґрунту, кліматичних умов та ступеня антропогенного впливу.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1.Методика відбору зразків ґрунту

У рамках дослідження грунтових екосистем мікроорганізмів міського середовища було проведено відбір п’яти зразків ґрунту з різних територіальних ділянок м. Запоріжжя та передмістя (рис. 2.1):

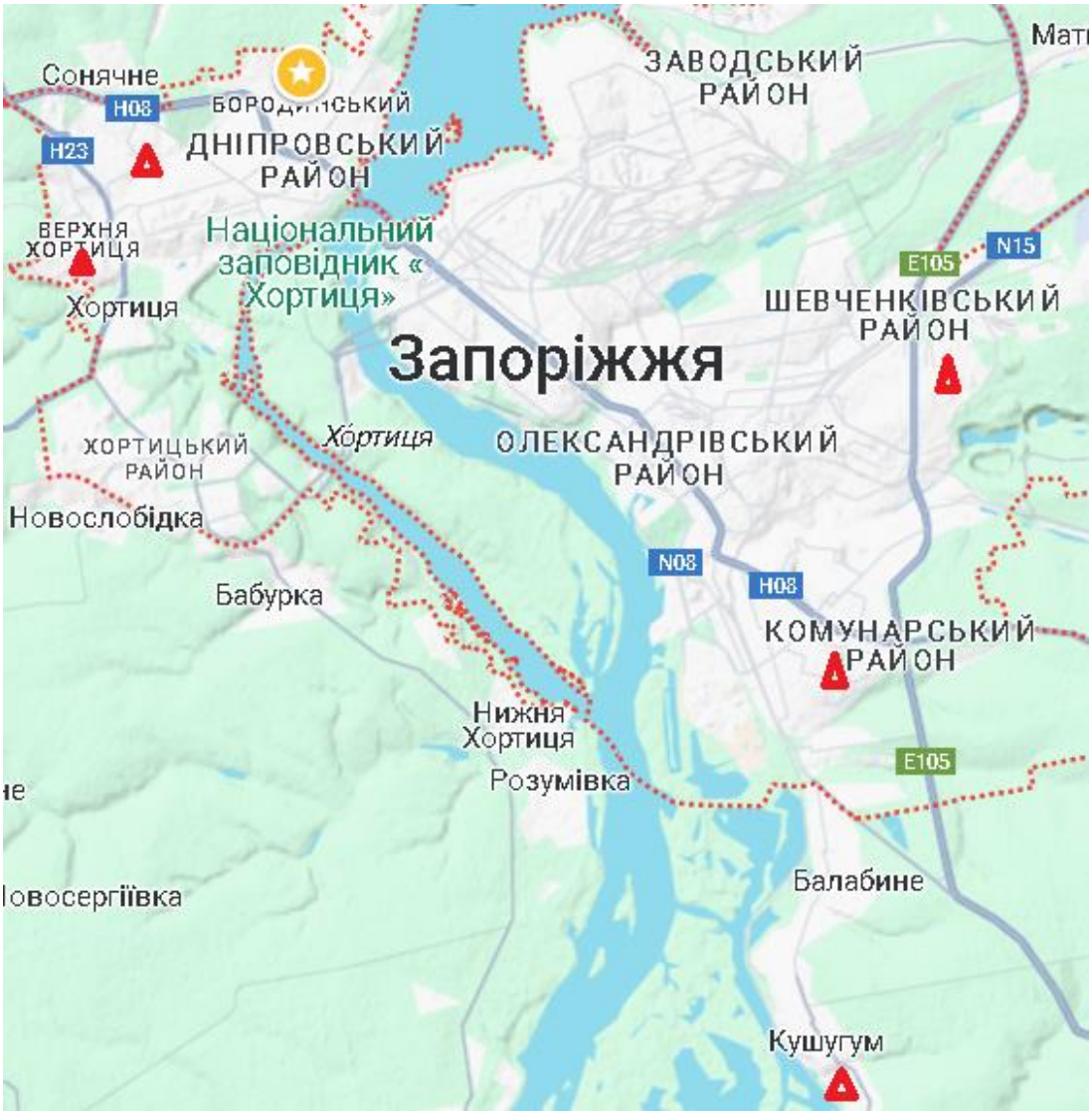


Рис. 2.1 – Місця відбору проб для проведення дослдження

– проба 1 – Осипенківський жилмасив (вул. Академіка Александрова, біля Запорізької гімназії № 29);

– проба 2 – Верхня Хортиця (парк по вулиці Розенталь);

– проба 3 – Шевченківський жилмасив (парк Бочарова);

– проба 4 – Космічний жилмасив (парк Міст-побратимів);

– проба 5 – смт Кушугум (парк по вул. Гоголя).

Забір ґрунту здійснювався у нові поліетиленові пакети з глибини 10 см після попереднього очищення поверхневого шару від рослинних залишків. Кожен зразок мав масу приблизно 200 г, що забезпечувало достатню кількість матеріалу для проведення всіх запланованих мікробіологічних аналізів. До початку лабораторного аналізу проби зберігались при температурі +4 °C не більше 24 годин.

Відбір ґрунту проводився зі штихтової глибини 0-20 см за допомогою металевого шпателя. Для отримання середньозваженого (змішаного) зразка з кожної точки відбору було здійснено забір ґрунту з п’яти підзон (центральної та чотирьох по кутах квадрату площею 1 м²). Відібрані підзразки змішували у стерильному контейнері для формування одного репрезентативного зразка.

Кожен зразок було марковано із зазначенням функціональної зони, коду точки відбору, дати та часу відбору. Інформація про координати, умови відбору та інші параметри фіксувалась у польовому журналі.

Зразки транспортували до лабораторії в термоконтейнерах з охолоджуючими елементами для підтримання температури не вище +4 °C, що дозволяло зберегти життєздатність ґрунтових мікроорганізмів.

Доставка зразків до лабораторії здійснювалася не пізніше ніж через 24 години після їх відбору. До моменту проведення аналізів зразки зберігали в умовах холодильника при температурі +4 °C (не більше 7 діб).

2.2 Методика проведення мікробіологічних досліджень

Підготовка зразків до мікробіологічного аналізу включала висів на м’ясо-пептонний агар (МПА) з метою оцінки загальної кількості життєздатних мікроорганізмів (КУО/г ґрунту). Попередньо ґрунт був просіяний через стерильне сито для видалення великих включень. Із кожного зразка відбирали по 10 г, які суспендували у 90 мл стерильного фізіологічного розчину (0,85% NaCl), стерилізованого в автоклаві при 121 °C протягом 20 хвилин. Отримані суспензії витрушували протягом 30 хвилин на лабораторному шейкері для відокремлення мікроорганізмів від ґрунтових частинок.

Із вихідної суспензії виготовляли серійні десятикратні розведення до концентрації 10^{-6}. Для посіву застосовували два методи: глибинний (у товщу середовища) та поверхневий (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Проби грунту – серійні десятикратні розведення до концентрації 10^{-6}

У глибинному методі в стерильні чашки Петрі вносили по 1 мл відповідного розведення суспензії, після чого додавали 15-20 мл розплавленого, охолодженого до ~ 45-50 °С МПА. Температуру агарового середовища перед заливкою оцінювали емпірично – за можливістю утримати колбу в долоні без відчуття термічного дискомфорту протягом 5-10 секунд. Після внесення агару чашки обертали круговими рухами для рівномірного розподілу мікроорганізмів і залишали до повного застигання.

Для поверхневого методу використовували попередньо підготовлені та застиглі агаризовані середовища. На поверхню кожної чашки вносили по 0,15 мл відповідного розведення суспензії. Розподіл здійснювали стерильним шпателем шляхом рівномірного розмазування суспензії по всій площі живильного середовища. Після підсушування чашки інкубували у перевернутому положенні при температурі +28 °С протягом 48-72 годин.

Підрахунок кількості колонієутворювальних одиниць (КУО/г) здійснювали на чашках, де було зареєстровано від 9 до 45 колоній. Результати розраховували за стандартною формулою (2.1) з урахуванням ступеня розведення та об’єму посіву. Крім підрахунку КУО, також проводився попередній морфологічний опис колоній (форма, колір, розмір, характер країв, прозорість) з метою попередньої диференціації мікробного різноманіття.

$$\text{КУО/г ґрунту} = \text{середня кількість колоній} \times \text{розведення}. \qquad (2.1)$$

За потреби здійснювали морфологічне описування колоній (форма, колір, краї, прозорість) та мікроскопію окремих штамів після пересева на чисті середовища.

Для забарвлення бактеріальних клітин за методом Грама готувалися мазки двох чистих культур (*Staphilococcus aureus, E. coli*), які забарвлюються і

які не забарвлюються за Грамом. Готуються фіксовані препарати культур бактерій і забарвлюються за Грамом.

Техніка забарвлення бактерійних клітин за методом Грама така:

1. Стерильною бактеріологічною петлею наносять краплю фізіологічного розчину на знежирене предметне скло.

2. У краплю фізіологічного розчину містять бактеріальну культуру.

3. Мазок висушують і фіксують над полум'ям спиртівки.

4. На фіксований мазок помішають смужку фільтрувального паперу, просиченого розчином генціанвіолету, змочують 1-2 краплями води, витримують 1-2 хв. (папірець повинен добре прилягати до скельця).

5. По закінченні експозиції фільтрувальний папір видаляють пінцетом, фарбу зливають й наносять розчин Люголя на 1 хв. (до почорніння мазка), при цьому препарат необхідно злегка погойдувати.

6. Розчин Люголя зливають і на мазок наносять 96 %-ний спирт на 20-30 сек. у залежності від товщини мазка.

7. Мазок промивають дистильованою водою.

8. Мазок додатково фарбують фуксином Циля на 2-3 хв.

9. Барвник змивають водою, препарат висушують, мікроскопіюють.

Після такого забарвлення грампозитивні (Гр+) бактерії набувають темного синьо-фіолетового кольору, грамнегативні (Гр –) бактерії забарвлюються в червоний (рожевий) колір фуксину [35].

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Дослідження про мікробіоту ґрунту доводять, що вона дуже важлива, адже її значення для вегетуючих рослин – безцінне, бо до її складу входять різні корисні мікроорганізми: бактерії, актиноміцети, мікроскопічні гриби, одноклітинні водорості, деякі найпростіші. Крім цього, мікробіота має суттєвий вплив на формування ґрунту і може міняти його структуру.

Залежно від глибини ґрунту знаходиться різна кількість мікроорганізмів, їх умовно можна розділити на дві великі групи – бактерії і гриби (мікроміцети).

Рівень мікробного забруднення ґрунтів суттєво варіює залежно від району, що може свідчити про різний ступінь антропогенного навантаження, санітарного стану територій та наявність сприятливих умов для розвитку мікроорганізмів.

Також є фактори, які впливають на кількісний і якісний склад ґрунту, такі як: тип ґрунту, вологість ґрунту, аерація, температура ґрунту, адсорбційна здатність ґрунтів. На склад мікрофлори ґрунту впливають пори року, клімат, методи обробки ґрунту та характер рослинного покриву.

Певні види мікроорганізмів живуть у симбіозі з рослинами. Вони мають здатність проникати в корінь та живитись солями та органічними сполуками, засвоювати атмосферний азот і постачати його рослинам.

У результаті мікробіологічного дослідження ґрунтів, нами відібраних з різних районів м. Запоріжжя та смт Кушугум, встановлено суттєву варіабельність рівня мікробного забруднення. Найвищу кількість колонієутворювальних одиниць (КУО) виявлено у пробі з району Верхня Хортиця – $1{,}41 \times 10^6$ КУО/г, що свідчить про значне мікробіологічне навантаження, ймовірно пов’язане з інтенсивним антропогенним впливом або наявністю органічних відходів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Загальне мікробне число у ґрунті

№ проби	Район міста	Сума колоній (КУО)	Розведення	ЗМЧ (КУО/г)
Проба 1	Осипенківський жилмасив	94	10^{-4}	$9{,}4 \times 10^5$
Проба 2	Верхня Хортиця	141	10^{-4}	$1{,}41 \times 10^6$
Проба 3	Шевченківський жилмасив	52	10^{-4}	$5{,}2 \times 10^5$
Проба 4	Космічний жилмасив	83	10^{-4}	$8{,}3 \times 10^5$
Проба 5	смт Кушугум	112	10^{-4}	$1{,}12 \times 10^6$

Високий рівень мікробної контамінації також зафіксовано у смт Кушугум – $1{,}12 \times 10^6$ КУО/г.

Осипенківський мікрорайон ($9{,}4 \times 10^5$ КУО/г) і мікрорайон Космос ($8{,}3 \times 10^5$ КУО/г) характеризуються середнім рівнем мікробного забруднення, що може бути ознакою помірного антропогенного впливу.

Найнижчий рівень мікробної контамінації виявлено в ґрунті Шевченківського району – $5{,}2 \times 10^5$ КУО/г, що свідчить про відносно сприятливий санітарно-екологічний стан цієї території. Але додатково в пробі з Шевченківського мікрорайону виявлено плісняві гриби, що свідчить про наявність умов, сприятливих для розвитку мікроміцетів, зокрема підвищеної вологості та наявності органічного субстрату. Це може становити потенційну екологічну та санітарну загрозу, особливо в житловій зоні.

Отримані результати вказують на необхідність впровадження регулярного моніторингу мікробіологічного стану ґрунтів, особливо в районах із високим

рівнем забруднення, а також на доцільність виявлення джерел контамінації для розробки заходів щодо зменшення мікробного навантаження на довкілля.

Графічно результати мікробіологічного дослідження грунтів представлено на рис. 3.1.

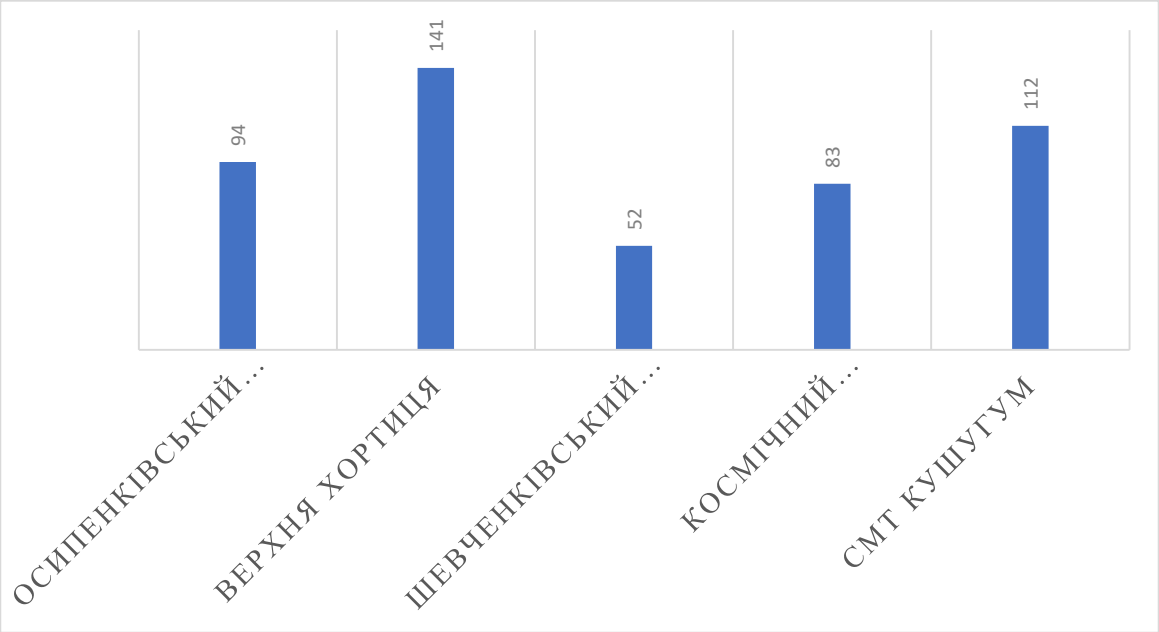


Рис. 3.1 – Сума колоній (КУО) зразків грунту

Деталізований аналіз результатів дослідження показав:

1. Верхня Хортиця (1,41 × 10^6 КУО/г) – має найвищий рівень забруднення, що свідчить про значну біологічну активність ґрунту, ймовірно через погану санітарну ситуацію, наявність органічних відходів або близькість до джерел забруднення (наприклад, стихійні звалища чи господарська діяльність).

2. смт Кушугум (1,12 × 10^6 КУО/г) – також високий рівень мікробного забруднення, а додаткова присутність пліснявих грибів у пробі №3 (Шевченківський район?) може вказувати на вологі умови, накопичення органічних залишків або поганий дренаж. Плісняві гриби – це додатковий санітарно-гігієнічний ризик, особливо в умовах проживання людей.

3. Осипенківський мікрорайон (9,4 × 10^5 КУО/г) та Космос (8,3 × 10^5 КУО/г) – середній рівень мікробного забруднення. Це може свідчити про помірне

антропогенне навантаження або змішані умови, які не є критичними, але вимагають контролю.

4. Шевченківський район ($5{,}2 \times 10^5$ КУО/г) – найнижчий рівень мікробної контамінації. Але додатково в пробі з цього району виявлено плісняві гриби, що свідчить про наявність умов, сприятливих для розвитку мікроміцетів, зокрема підвищеної вологості та наявності органічного субстрату. Це може становити потенційну екологічну та санітарну загрозу, особливо в житловій зоні.

Мікрофлора ґрунту, що досліджувався представлена грибами, актиноміцетами, переважно гнильними, маслянокислими, азотфіксуючими, нітрифікуючими, денітрифікуючими, целюлозоруйнуючими, сірко- та залізобактеріями. У меншій кількості містяться водорості, дріжджі, бактеріофаги. У ґрунті також можуть зустрічатися такі патогенні бактерії, як збудники ботулізму, шлунково-кишкових хвороб та ін. Ці мікроорганізми потрапляють з органічними викидами, стічними водами. Вони, як правило, у ґрунті не живуть, але зберігаються тривалий час. Велика кількість органічних решток: опале листя, трава, трупи тварин, які потрапили в ґрунт, і багато іншого – становлять джерело енергії для мікроорганізмів, що перебуваютьу ґрунті.

Отже, ґрунтова мікрофлора є багатокомпонентною системою, до складу якої входять бактерії різних трофічних груп (азотфіксуючі, нітрифікуючі, денітрифікуючі, целюлозоруйнівні, сірко- та залізобактерії), гриби, актиноміцети, водорості, дріжджі та бактеріофаги.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Під час проведення мікробіологічних досліджень у лабораторії важливо дотримуватися вимог охорони праці, санітарно-гігієнічних норм і правил біологічної безпеки. Робота з ґрунтовими зразками може супроводжуватися контактом з потенційно патогенними або умовно-патогенними мікроорганізмами, а також хімічними реагентами, тому потребує підвищеної уваги до безпеки. Перш ніж починати виконання експериментальної частини з мікробіології, слід памятати необхідні правила з техніки безпеки при роботі з мікробними культурами.

До приміщення лабораторії заборонено заходити без спеціального одягу (халату) і заносити сторонні речі. Працювати в лабораторії дозволяються лише в спецодязі (халаті) з прибраним волоссям і застібнутими рукавами. Перед заняттям вимити руки. Не дозволяється виходити за межі лабораторії в халатах або одягати верхній одяг на халат. У приміщенні лабораторії не дозволяється приймати їжу, не допускається зайвих розмов і непотрібних переходів. Не проводити перерви в лабораторному приміщенні. Користуватися лише своїм робочим місцем і прикріпленим до нього обладнанням. Працювати потрібно сидячи, не нахиляючи тулуб над столом, строго перпендикулярно до робочої поверхні лабораторного столу.

При роботі з мікробіологічним матеріалом необхідно використовувати загальноприйняті технічні прийоми, які виключають можливість контакту рук з мікробіологічним матеріалом. При використанні біологічного матеріалу не дозволяється ставити посуд, який містить матеріал для дослідження, безпосередньо на стіл. Для цього використовуються підноси або кювети, посуд попередньо знезаражують дезінфікуючим розчином.

Під час роботи підтримувати чистоту та порядок. Уникати зайвих рухів руками над відкритими чашками Петрі. Всі реактиви та барвники ставити на свої місця, не класти на столи пробки від пробірок, піпетки, бактеріологічні петлі.

Використані піпетки, предметні й покривні скельця, шпателі тощо поміщають у дезінфікуючий розчин. Пінцети, бактеріологічні петлі фламбують у полум’ї пальника і ставлять у штатив.

У випадках пошкодження посуду з мікробіологічним матеріалом або його витіканням слід негайно повідомити викладача або старшого лаборанта і провести заходи для знезараження забрудненого одягу, частин тіла, предметів робочого місця.

При розливі біологічного матеріалу необхідно обмежити зону забруднення, засипати розлив серветками, змоченими дезінфекційним розчином (концентрація залежить від інструкцій до засобу), витримати експозицію не менше 30 хвилин, після чого ретельно обробити поверхню.

У разі порізу або уколу під час роботи – промити рану проточною водою з милом, обробити антисептиком (70% етанол, хлоргексидин), накласти стерильну пов'язку, негайно повідомити керівника робіт та звернутися до медичного пункту.

При загорянні реагентів або електроприладів – негайно знеструмити обладнання, використати вогнегасник (порошковий або вуглекислотний), повідомити відповідальних осіб.

Пробірки і чашки Петрі з посівами мають бути підписані (вказати латинську назву культури, дату посіву). Після закінчення роботи поставити до термостату засіяні чашки й пробірки. Культури мікроорганізмів і залишки досліджуваного матеріалу необхідно здати лаборанту, а робоче місце привести в порядок і продезінфікувати. Вимити руки і обробити їх дезінфікуючими засобами [36].

Відбір ґрунтових зразків у польових умовах супроводжується впливом різноманітних потенційно шкідливих факторів: забруднення ґрунту хімічними речовинами, мікробіологічна контамінація, несприятливі погодні умови, фізичні ризики (порізи, травми, укус комах тощо). Тому для забезпечення безпеки під час відбору зразків необхідно дотримуватись вимог охорони праці та санітарно-гігієнічних норм.

Під час відбору зразків необхідно використовувати: захисний одяг (щільний костюм або халат, який прикриває руки та ноги), одноразові або багаторазові гумові/латексні рукавички, закрите взуття з неслизькою підошвою, захисні окуляри (у разі відбору поблизу джерел пилу або розбризкування рідин), респіратор, або маску при відборі зразків у забруднених промислових районах або при наявності пилу.

Перед відбором необхідно провести огляд місцевості на наявність небезпечних об'єктів (битого скла, голок, гострих металевих уламків, хімічних відходів). Слід уникати прямого контакту рук із ґрунтом без рукавичок. Використовувати стерильні або продезінфіковані інструменти (лопатки, шпателі, пробовідбірники). Перед кожним новим відбором інструменти обробляють 70% спиртом або іншим дезінфекційним розчином. Під час роботи не вживати їжу, напої, не торкатися обличчя, щоб уникнути контамінації. Відбір зразків біля небезпечних промислових об'єктів слід здійснювати лише з дозволу відповідальних осіб, із дотриманням регламентованої відстані від джерел викидів. Зібрані зразки містять у щільно закриті стерильні поліетиленові пакети або контейнери. Усі контейнери мають бути марковані (назва ділянки, дата, номер зразка). Транспортування зразків здійснюється в закритих контейнерах (термосумках, ящиках) окремо від особистих речей [37].

Дії в екстрених ситуаціях. При порізах або уколах – промити рану водою з милом, обробити антисептиком, накласти стерильну пов'язку, повідомити керівника робіт, звернутись до медичного закладу. При укусах комах – видалити

жало (якщо є), прикласти холод, за наявності алергічної реакції негайно звернутись до лікаря. При потраплянні ґрунту або його часток в очі – негайно промити очі великою кількістю чистої води, звернутись за медичною допомогою.

Перед виїздом у польові умови необхідно ознайомитись з маршрутом, особливостями місцевості та наявними ризиками. Робота в екологічно небезпечних або важкодоступних місцях проводиться не менше ніж удвох. Під час відбору зразків обов’язково мати при собі мобільний телефон для зв'язку, аптечку першої допомоги, питну воду [37].

Загальні вимоги до взяття і транспортування матеріалу

1. Взяття матеріалу слід здійснювати до вживання хворим антибіотиків та інших антимікробних препаратів, а якщо це неможливо, то після відміни їх вживання хворим через 2-3 доби.

2. Необхідно захистити матеріал від забруднення сторонньою мікрофлорою, тобто чітко дотримуватися правил асептики. Особливо це стосується тих матеріалів, які в нормі не містять мікроорганізмів, – крові, спинномозкової рідини, лімфи тощо.

3. Характер і кількість матеріалу, який забирається, повинен бути скоригований з урахуванням клінічної картини, патогенезу, строків захворювання, його тяжкості тощо.

4. Необхідно виключити можливість інфікування осіб, які беруть і доставляють матеріал, і забруднення довкілля мікробами.

5. Максимальне скорочення строків з моменту взяття матеріалу до його доставки у мікробіологічну лабораторію – не більше ніж 2-3 год.

Транспортується матеріал на спеціальному транспорті або переноситься в біксах, сумках-холодильниках, пластикових футлярах, термосах, стійких до автоклавування та дії дезінфектантів. Матеріал, що вміщує мікроорганізми, нестійкі в навколишньому середовищі (збудники коклюшу, менінгококової

інфекції), під час транспортування обкладають ватою та грілками. Направлення на дослідження упаковують окремо [36].

Таким чином, дотримання вимог охорони праці та біологічної безпеки, використання засобів індивідуального захисту, а також знання алгоритмів дій у надзвичайних ситуаціях під час відбору ґрунтових зразків і виконання мікробіологічних досліджень знижує ризики для здоров’я дослідників, забезпечує якість та достовірність результатів, зменшує ризик професійного зараження та запобігає поширенню небезпечних біологічних агентів.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи виконано всі поставлені завдання:

– проаналізовано літературні джерела щодо впливу промислових забруднювачів на ґрунтову мікробіоту в урбанізованих територіях: урбанізовані території зазнають постійного антропогенного тиску, що включає викиди від транспорту, викиди промислових підприємств (металургійні, хімічні, енергетичні), забруднення відходами (побутові, будівельні, індустріальні). Ці чинники змінюють хімічний склад ґрунту (накопичення Pb, Cd, Zn, Hg, поліциклічних ароматичних вуглеводнів тощо), що безпосередньо впливає на мікроорганізми.

– відібрано зразки ґрунтів з різних функціональних зон м. Запоріжжя та передмістя;

– визначено загальну чисельність мікроорганізмів та видовий склад основних груп мікробіоти ґрунтів досліджуваних зон;

– порівняно результати досліджень між різними зонами міста для виявлення просторових закономірностей розподілу мікробіоти та рівня забруднення: Верхня Хортиця ($1{,}41 \times 10^6$ КУО/г) – має найвищий рівень забруднення, що свідчить про значну біологічну активність ґрунту, ймовірно через погану санітарну ситуацію, наявність органічних відходів або близькість до джерел забруднення (наприклад, стихійні звалища чи господарська діяльність); смт Кушугум ($1{,}12 \times 10^6$ КУО/г) – також високий рівень мікробного забруднення, а додаткова присутність пліснявих грибів у пробі №3 (Шевченківський район) може вказувати на вологі умови, накопичення органічних залишків або поганий дренаж. Плісняві гриби – це додатковий санітарно-гігієнічний ризик, особливо в умовах проживання людей;

Осипенківський мікрорайон (9,4 × 10^5 КУО/г) та Космос (8,3 × 10^5 КУО/г) – середній рівень мікробного забруднення. Це може свідчити про помірне антропогенне навантаження або змішані умови, які не є критичними, але вимагають контролю; Шевченківський район (5,2 × 10^5 КУО/г) – найнижчий рівень мікробної контамінації. Але додатково в пробі з цього району виявлено плісняві гриби, що свідчить про наявність умов, сприятливих для розвитку мікроміцетів, зокрема підвищеної вологості та наявності органічного субстрату. Це може становити потенційну екологічну та санітарну загрозу, особливо в житловій зоні.

– розроблено практичні рекомендації щодо покращення стану ґрунтової мікробіоти у найбільш забруднених зонах міста.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Біологічна рекультивація (біоремедіація) з метою зниження токсичності та відновлення активності мікроорганізмів, щляхом внесення мікробних препаратів (наприклад, *Azotobacter, Bacillus subtilis, Trichoderma harzianum*); використання препаратів на основі консорціумів ґрунтових бактерій для запуску процесів самоочищення; застосування біокомпостів і вермікомпостів як джерел активної мікрофлори. За даними Інституту агроекології НААН, обробка забруднених ґрунтів компостом з активною мікробіотою підвищила активність дегідрогенази на 45% протягом 3 місяців (2021).

2. Фіторемедіація, метою якої є акумуляція та зв’язування важких металів, стимулювання біоти. Для цього використовуються такі рослини: гірчиця біла (Sinapis alba), соняшник (Helianthus annuus), коноплі (Cannabis sativa), багаторічний люцерновий покрив (*Medicago sativa*). Рослини утворюють ризосферу, яка стимулює розвиток симбіотичної мікрофлори.

3. Мінімізація механічного та хімічного навантаження, через обмеження використання гербіцидів та пестицидів, зменшення ущільнення ґрунтів за рахунок облаштування зелених смуг і проривів, організація точкового збору опадів для покращення гідрологічного балансу ґрунту.

4. Освітні кампанії та моніторинг з метою залучення місцевих громад і міських служб до спостереження за станом ґрунтів. Для цього встановлюють демонстраційні ділянки із прикладами біо- і фіторемедіації та проводять мікробіологічний аналіз (наприклад, за методикою НААН – облік мікробного індексу різноманіття) [37].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Giller, K.E., Witter, E., & McGrath, S.P. Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(10-11), 1998. P.1389-1414.

2. Baath, E.. Effects of heavy metals in soil on microbial processes and populations. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1989. 47(3-4), P. 335-379.

3. Мельник Л.М., Колісник С.М., Тихоненко Ю.А. Мікробіологічна характеристика ґрунтів зон екологічного ризику. *Агроекологічний журнал*, 2020. 2(98), 112-117.

4. Лісовий О.М.. Вплив техногенного навантаження на біоценотичну активність ґрунтів. *Вісник агроекології*, 2016. 1(28), С. 45-50.

5. Moffett, B.F. et al.. Zinc contamination decreases the bacterial diversity of agricultural soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 43(1), 2003. P. 13-19.

6. Дідович С.В. Формування та функціонування симбіозу Mesorhizobium ciceri Cicer arietinum в агроценозах південного Степу України: автореф. дис. …канд. с-г. наук; ІСГМ УААН. Чернігів, 2006. 20 с.

7. Мікробні препарати у землеробстві. Теорія і практика /Волкогон В.В., Надкернична О.В., Ковалевська Т.М. та ін. К.: Аграрна наука, 2006. 311 с.

8. Казюта О.М. Гумусовий стан ґрунтів заплави Сіверського Дінця. *Наук. вісник Чернівецького ун-ту*. 2005. Вип. 252. Біологія. С. 96-102.

9. Мікроорганізми і альтернативне землеробство. /Патика В.П., Тихонович І.А., Філіп’єв І.Д. та ін. К.: Урожай, 1993. 173 с.

10. Шевченко І.П. Вплив способів обробітку і добрив на стан мікробного ценозу та фітотоксичні властивості чорнозему типового еродованого. *Вісник аграрної науки*. 2006. № 10. С. 12-15.

11. Біологічний азот. Патика В.П., Коць С.Я., Волкогон В.В. та ін. К.: Світ, 2003. 422 с.

12. Пліско І.В., Моргун Д.О., Романчук К.Ю. До питання про використання мікробіологічних показників в оцінці якості ґрунтів. *Агрохімія і ґрунтознавство*, 2022. вип. 93, с. 12-23.

13. Волкогон В.В. & Скорик В.В. Шляхи активації асоціативної азотфіксації в агроценозах. *Журнал Інституту с.-г. мікробіології НААН,* 2017.

14. Скляренко І.П. Мікробіологічна деградація ґрунтів індустріальних зон. *Екологічні науки*, 2019№ 1, с. 45-50.

15. Булавенко Л.В. Фосфатазна активність деяких видів мікроорганізмів *Укр. біохім. журн*. 2002. Т. 74, № 4б. С. 65.

16. Токмакова Л.М. Розробка прийомів і створення мікробних препаратів для покращення фосфорного живлення і підвищення продуктивності цукрових буряків: автореф. дис… канд. с-г. наук. К., 1997. 20 с.

17. Носко Б.С. Калійні добрива в землеробстві України. *Міжнародний інститут калію*. 1999. 55 с.

18. Польовий В.М. Баланс та динаміка обмінного калію в ґрунтах Рівненської області залежно від інтенсифікації землеробства. *Наук. вісник Чернівецького ун-ту*. 2005. Вип. 252. Біологія. С. 207-213.

19. Fierer, N. et al.. Influence of drying-rewetting frequency on soil bacterial community structure and activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(12), 2003. P. 1669-1677.

20. Ramasamy, S.M.. Environmental impact of war: a scientific review. *UNEP Report*. 2009.

21. Krzyszowska, A.J. et al.. Ecotoxicological effects of explosives on soil microbial activity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 13(9), 1994. 1451-1459.

22. Wenzel, W.W. (2009). Environmental impacts of ammunition residues. *Review in Environmental Science and Bio/Technology*, 8(3), 231–245.

23. Singh, J., Kalamdhad, A. S. (2011). Effects of heavy metals on soil microbial community. *Bioresource Technology*, 102(2), 633-641.

24. Zhang, C. et al. (2018). Influence of TNT-contaminated soils on microbial communities and their functional genes. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 1085-1093.

25. Gadd, G.M. (2010). Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156, 609-643.

26. Rillig, M.C. et al. (2019). The role of multiple global change factors in driving soil functions and microbial biodiversity. *Science*, 366(6467), 886-890.

27. Juwarkar, A. et al. (2008). Bioremediation of contaminated sites in India: critical review. *Environmental International*, 34(1), 1-12.

28. Chen, Y. et al. (2004). Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil by Brassica napus. *Chemosphere*, 54(9), 1229-1236.

29. Шевчук В.І.. Мікробне різноманіття чорноземів у зоні бойових дій Донеччини. *Наукові записки Інституту ґрунтознавства ім. О.Н. Соколовського*, 48(1), 2022. С. 71-78.

30. Кравченко О.М. (2023). Зміни структури ґрунтових мікробних філумів під впливом військових дій. *Вісник Черкаського національного університету. Біологічні науки*, 1(387), 90-96.

31. Результати досліджень ґрунту на полях, де були бойові дії URL: https://superagronom.com/news/19803--opublikovano-rezultati-doslidjen-gruntu-na-polyah-de-buli-boyovi-diyi?utm_source=chatgpt.com

32. Кравченко О.М. Зміна біоактивності ґрунтів Запоріжжя. Вісник ЧНУ, 2020. №4, с. 81-87.

33. Andrejuk, K.I., Iutyns'ka, G.O., Antypchuk, A.F., Valagurova, O.V., Kozyryc'ka, V.J., Ponomarenko, S.P. Funkcionuvannja mikrobnyh ugrupovan' v umovah antropogennogo navantazhennja [Functioning of microbial cenoses under anthropogenic load]. Oberegy, Kyiv (in Ukrainian). 2001/

34. Скляренко І.П. Мікробіологічна деградація ґрунтів індустріальних зон. Екологічні науки, 2019 №1, с. 45-50.

35. Рильський О.Ф., Костюченко Н. І., Петруша Ю.Ю., Притула Н.М. Екологія мікроорганізмів з основами мікробіології: методичні рекомендації до лабораторних занять для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 101 «Екологія» освітньо-професійної програми «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». Запоріжжя : національний університет, 2024. 89 с.

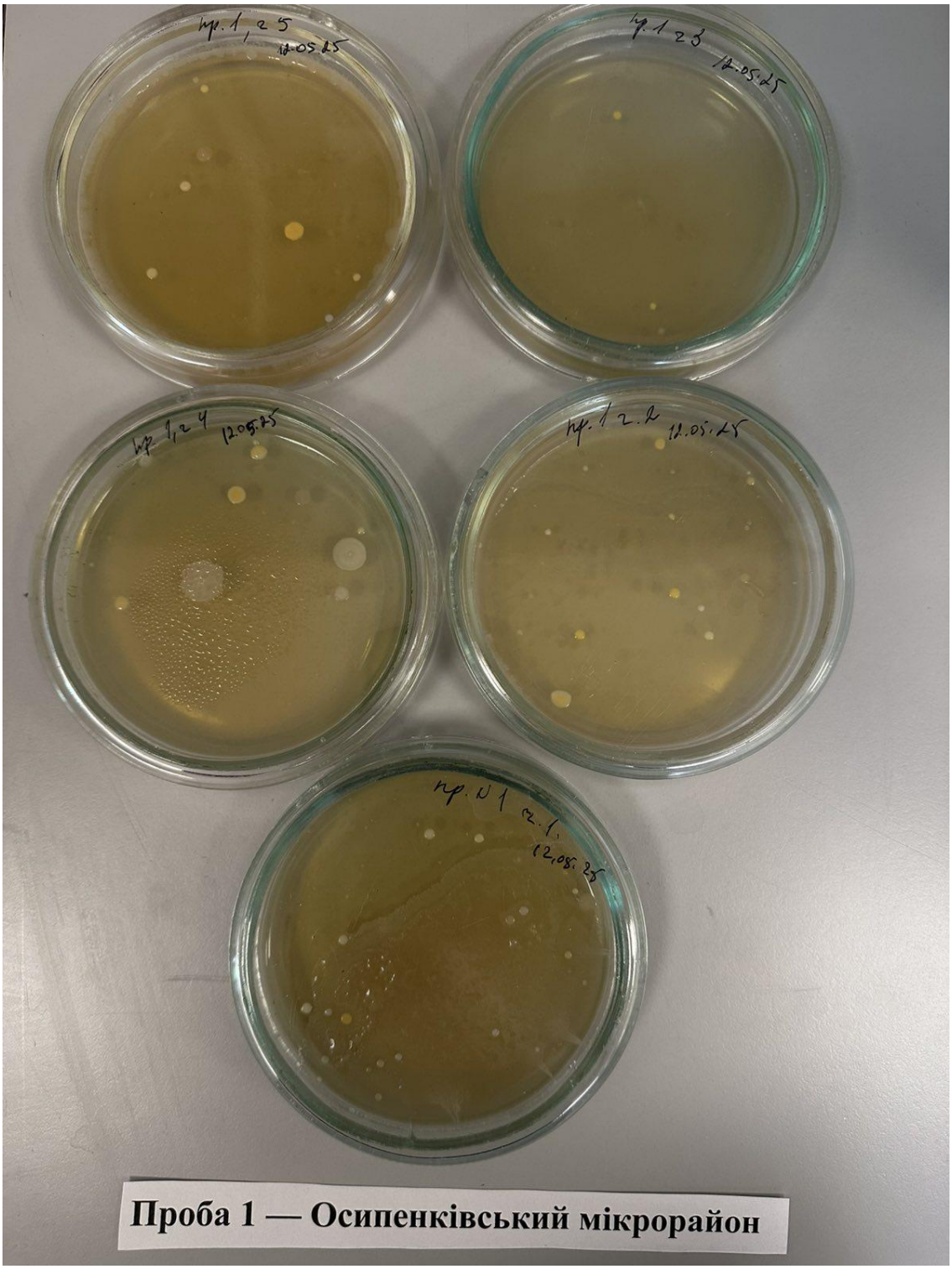
36. Люта, В.А. Практикум з мікробіології: навч. посібник. К.: Медицина, 2008. 184 с.

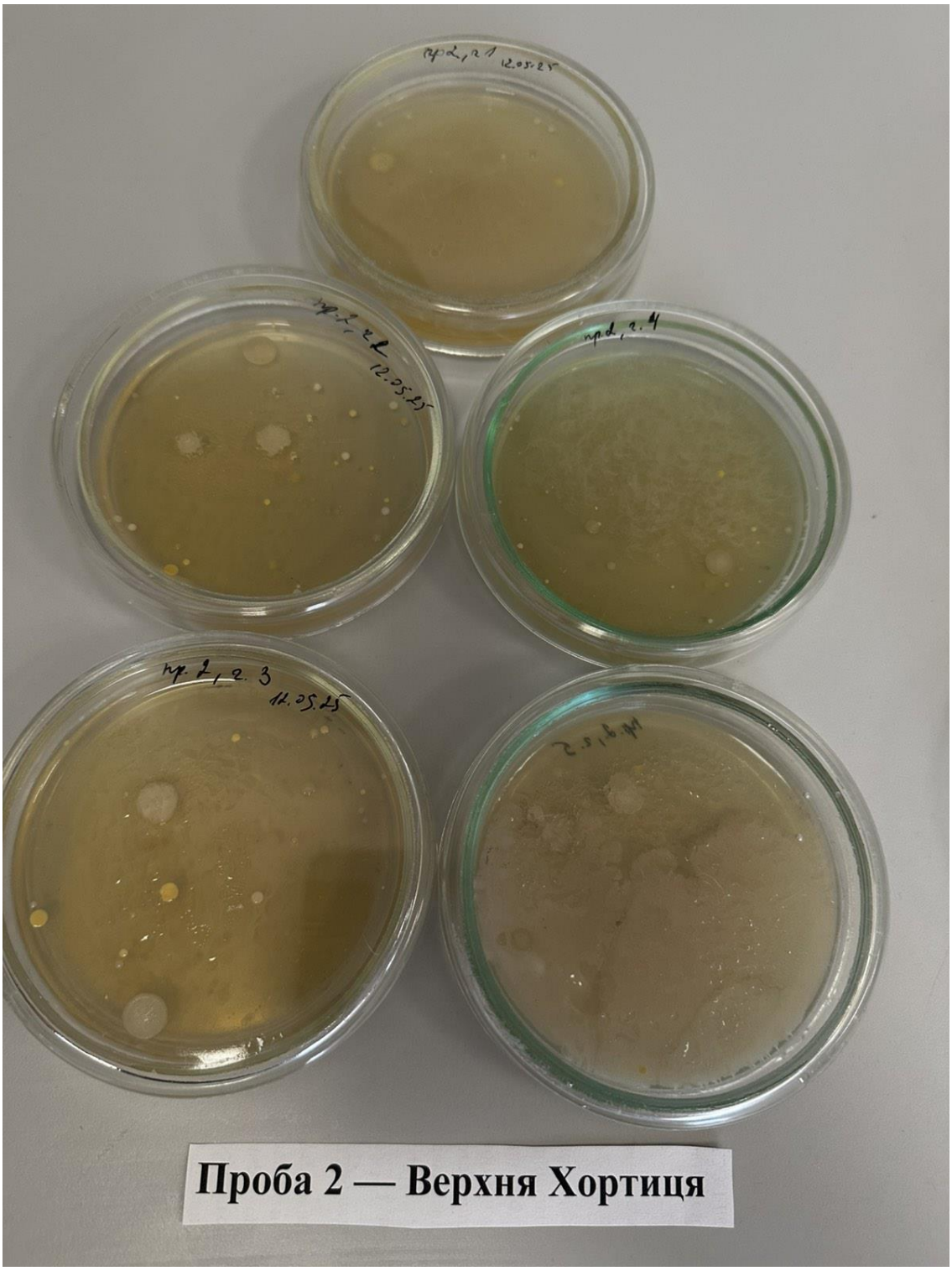
37. Метод. вказівки до викон. розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» в дипломних проектах і роботах для спеціалістів і магістрів хіміко-технологічного факультету і факультету біотехнології та біотехніки/ Уклад.: А Т. Орленко, Н. А. Праховнік, Ю.О. Полукаров, О. С. Ільчук К.: НТУУ «КПІ», 2013. 62 с.

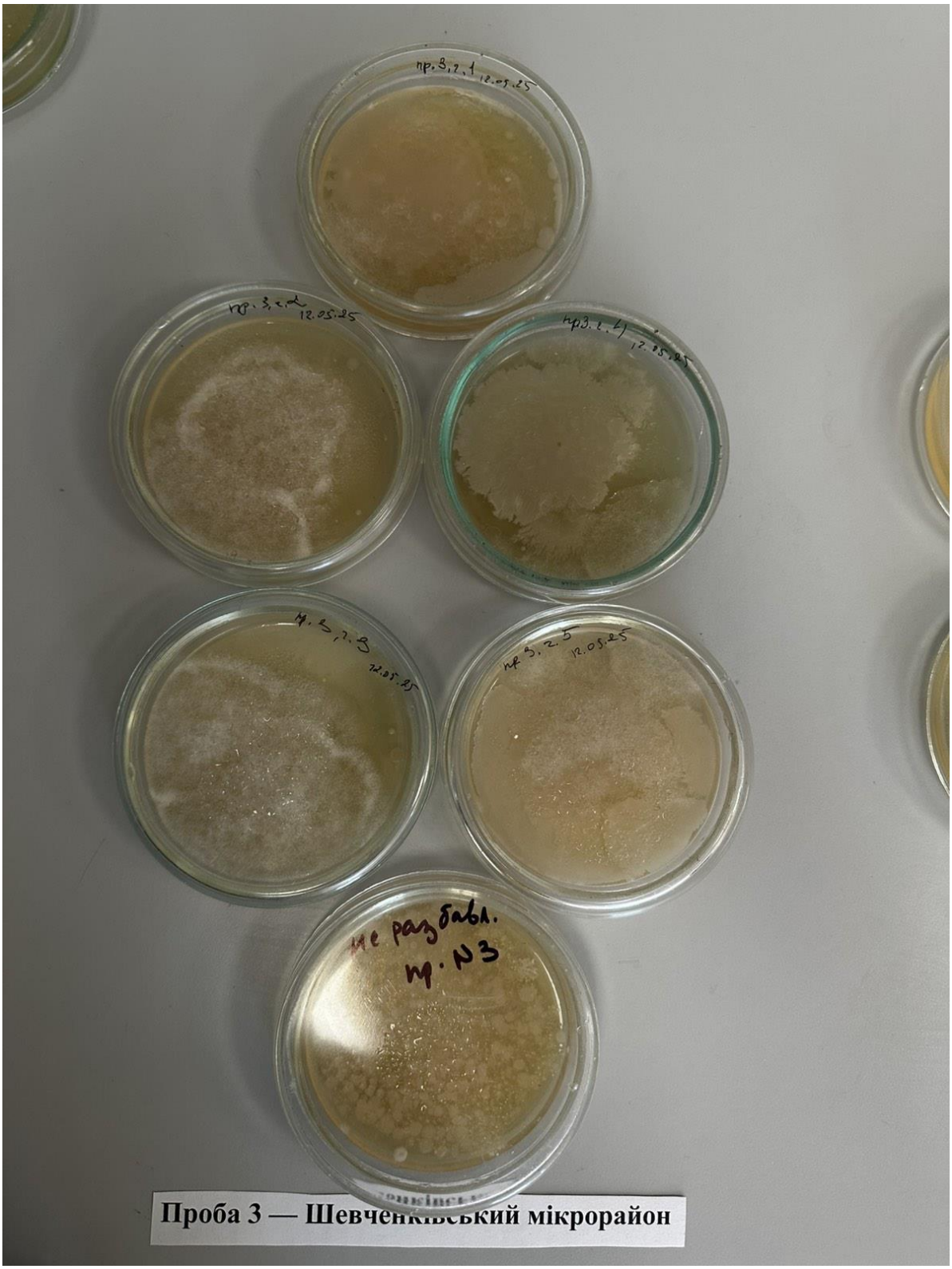
38. НААН України. Звіт з мікробіологічного моніторингу урбанізованих ґрунтів. Київ, 2021.

ДОДАТКИ

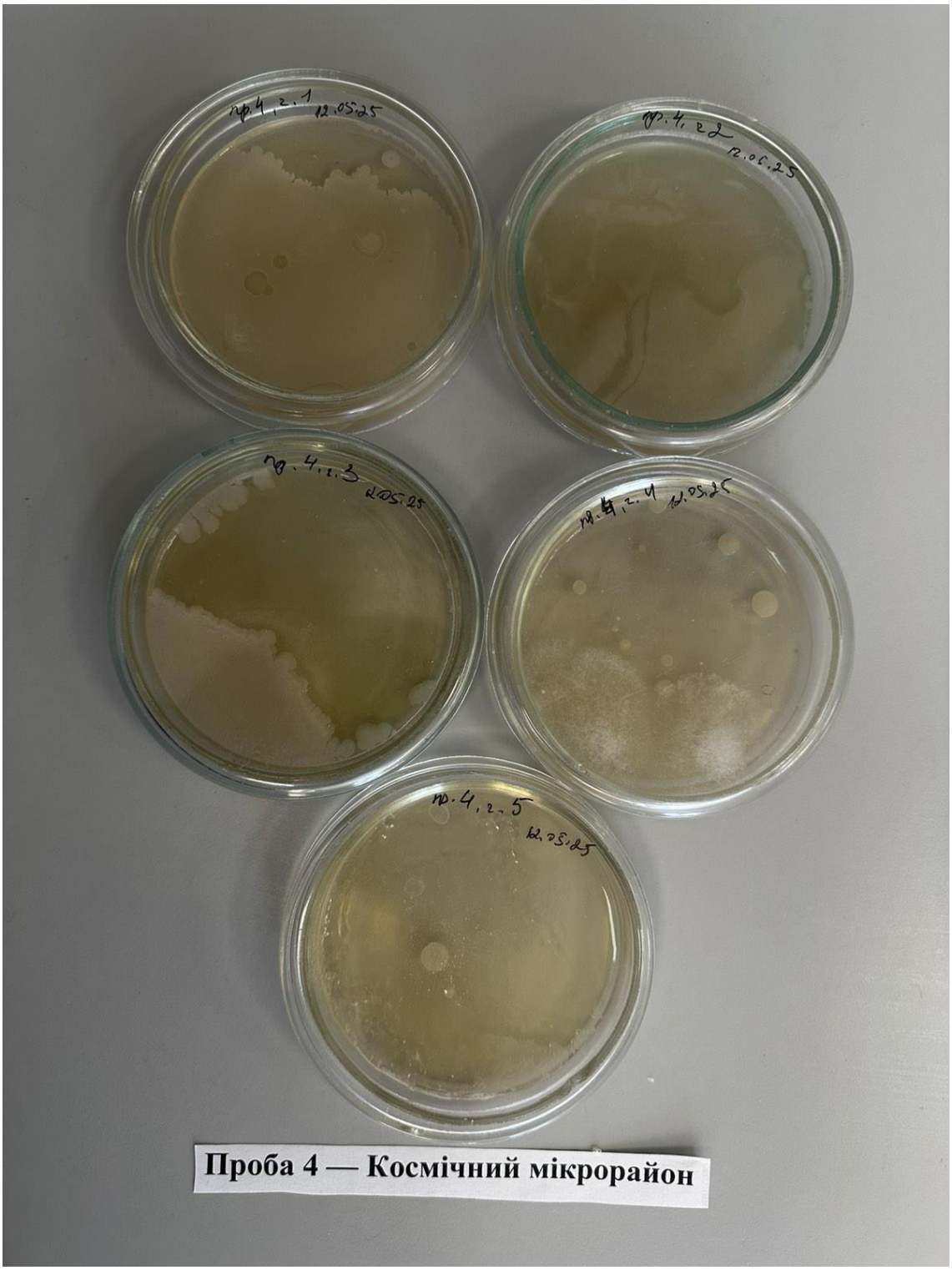
ДОДАТОК А – Результати мікробіологічного дослідження грунту

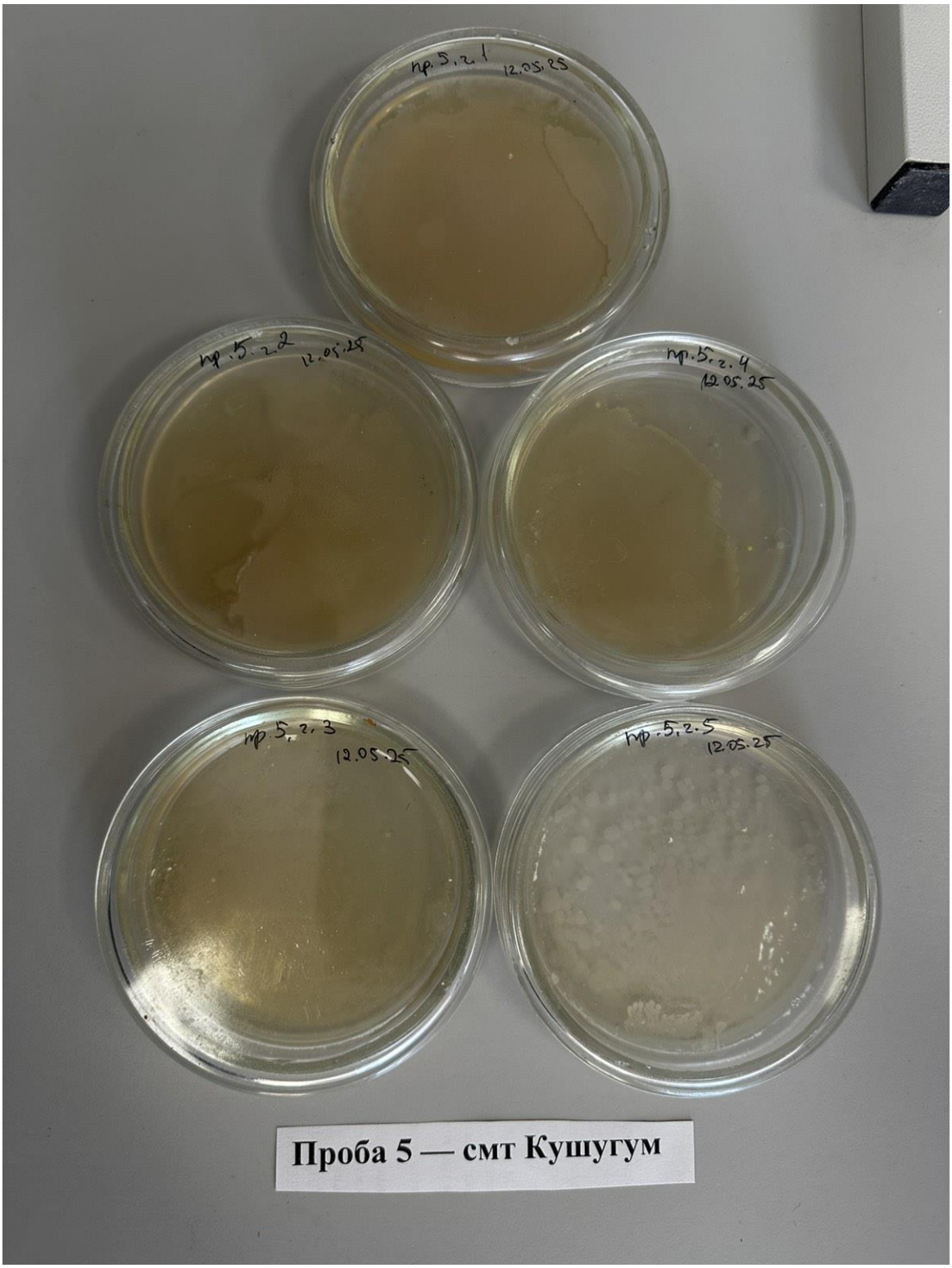



Проба 2 — Верхня Хортиця



Проба 3 — Шевченківський мікрорайон


Проба 4 — Космічний мікрорайон


пр. 5, 2, 1
12.05.25
пр. 5. 2. 2
12.05.25
пр. 5. 2. 4
12.05.25
пр. 5, 2, 3
12.05.25
пр. 5. 2. 5
12.05.25
Проба 5 — смт Кушугум