

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ЛЕСІ
УКРАЇНКИ

Кафедра екології та охорони навколишнього середовища

На правах рукопису

РАБАН ОЛЬГА ЮРІЇВНА

**ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПЕСТИЦИДІВ PESTICOL
ТА KARATE GOLD НА ҐРУНТОВУ МІКРОФЛОРУ**

Спеціальність: 101 Екологія

Освітньо-професійна програма Екологія

Робота на здобуття освітнього ступеня Магістр

Науковий керівник:
ЛАВРИНЮК ЗОРЯНА ВОЛОДИМИРІВНА
кандидат хімічних наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ
Протокол № 4
засідання кафедри екології та
охорони навколишнього середовища
від 18 листопада 2025 р.

Завідувач кафедри



доц. Радзій В.Ф.

ЛУЦЬК–2025

АНОТАЦІЯ

Рабан О. Ю. Екологічний аналіз впливу пестицидів Pesticol та Karate Gold на ґрунтову мікрофлору. На правах рукопису.

Робота на здобуття освітнього ступеня Магістр спеціальності 101 Екологія. Волинський національний університет імені Лесі Українки. Луцьк, 2025.

У рамках кваліфікаційної роботи проведено екологічний аналіз впливу пестицидів Pesticol і Karate Gold на ґрунтову мікрофлору. У дослідженні приділено увагу сучасним екологічним загрозам, пов'язаним із масовим використанням пестицидів, зокрема їх токсичності для мікробіома ґрунту, порушенню екологічного балансу ґрунтової екосистеми та впливу на здоров'я тварин і людей. Дослідження також включає аналіз змін у складі мікробіоти, її функціональної активності та взаємодії з іншими компонентами ґрунтової екосистеми, що дозволяє глибше зрозуміти механізми впливу пестицидів на ґрунтові біологічні процеси. Виконано теоретичний аналіз властивостей пестицидів, механізмів їх дії, а також огляд наукових публікацій про їх вплив на ґрунтові бактерії. Експериментальні дослідження проводилися на штамах *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus* і *Micrococcus*, відібраних із трьох ділянок: ботанічний заказник «Воротнів», біля автомагістралі Е85 та квітник поруч з гуртожитком №2 ВНУ. Проведено порівняльний аналіз дії пестицидів Pesticol (апельсинова олія, 6,0 %) та Karate Gold (лямбда-цигалотрин, 0,075 %), де перший виконує функції фунгіциду, інсектициду й акарициду, а другий використовується як інсектицид. Отримані результати показали різну чутливість бактерій до досліджуваних препаратів: найбільш стійкими виявилися *Bacillus* і *Micrococcus*, тоді як *Sphingomonas* і *Streptomyces* проявили підвищену чутливість, особливо до Pesticol. Незважаючи на природний склад, Pesticol виявився більш токсичним у рекомендованих концентраціях, що проявлялося у збільшенні зон інгібування росту.

Ключові слова: пестицид, мікроорганізм, мікрофлора, бактерія, пригнічення зросту, посів, забруднення, ґрунт.

ANNOTATION

Raban O. Yu. Ecological analysis of the influence of the pesticides Pesticol and Karate Gold on soil microflora. Manuscript.

Qualification work for obtaining a Master`s degree in speciality 101 Environmental Studies, educational-professional program Environmental Studies. Lesya Ukrainka Volyn National University. Lutsk, 2025.

As part of the qualification work, an ecological analysis of the impact of Pesticol and Karate Gold pesticides on soil microflora was conducted. The study focuses on current environmental threats associated with the widespread use of pesticides, in particular their toxicity to the soil microbiome, disruption of the ecological balance of the soil ecosystem, and impact on animal and human health. The study also includes an analysis of changes in the composition of the microbiota, its functional activity and interaction with other components of the soil ecosystem, which allows for a deeper understanding of the mechanisms of the impact of pesticides on soil biological processes. A theoretical analysis of the properties of pesticides, their mechanisms of action, and a review of scientific publications on their impact on soil bacteria were performed. Experimental studies were conducted on strains of *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus*, and *Micrococcus* selected from three sites: the Vorotniv Botanical Reserve, near the E85 motorway, and a flower garden near dormitory No. 2 of the Vinnitsa National University. A comparative analysis was conducted of the effects of the pesticides Pesticol (orange oil, 6.0 %) and Karate Gold (lambda-cyhalothrin, 0.075 %), where the former acts as a fungicide, insecticide and acaricide, and the latter is used as an insecticide. The results showed different sensitivities of bacteria to the studied preparations: *Bacillus* and *Micrococcus* were the most resistant, while *Sphingomonas* and *Streptomyces* showed increased sensitivity, especially to Pesticol. Despite its natural composition, Pesticol proved to be more toxic at the recommended concentrations, which was manifested in an increase in growth inhibition zones.

Keywords: pesticide, microorganism, microflora, bacterium, adult inhibition, sowing, pollution, soil.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ПЕСТИЦИДІВ НА ГРУНТОВУ МІКРОФЛОРУ	9
1.1. Пестициди та їх властивості, вплив використання пестицидів на навколишнє середовище	9
1.2. Механізм дії пестицидів.....	18
1.3. Методи очищення ґрунту від пестицидів	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
2.1. Методи оцінки чисельності та виділення мікроорганізмів.....	22
2.2. Методи ідентифікації мікроорганізмів.....	25
2.3. Методи експериментальної оцінки токсичності пестицидів	26
РОЗДІЛ 3. ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПЕСТИЦИДІВ PESTICOL ТА KARATE GOLD НА ГРУНТОВУ МІКРОФЛОРУ	28
3.1. Характеристика місць відбору проб ґрунтів для дослідження та обраних пестицидів	28
3.2. Екологічний аналіз впливу пестицидів методом Дригальського на бактерії <i>Sphingomonas</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Micrococcus</i>	32
3.3. Екологічний аналіз впливу пестицидів методом мінімальної інгібуючої концентрації (МІК) на бактерії <i>Sphingomonas</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Micrococcus</i>	47
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54

ВСТУП

Актуальність теми. Ґрунт становить складну екологічну систему, яка об'єднує численні процеси, створюючи сприятливі умови для розвитку флори та фауни. Ключовим компонентом цієї системи виступають мікроорганізми, які відіграють основну роль у розкладанні органічної речовини та відходів, сприяють природному очищенню ґрунту й забезпечують обіг важливих елементів у середовищі.

З розвитком науки та сільського господарства все більше стали використовувати пестициди й хімічні засоби для боротьби зі шкідниками, хворобами та бур'янами. Ці речовини мають важливе значення для підвищення врожайності та зменшення втрат продукції. Однак масове застосування пестицидів серйозно впливає на природні процеси у ґрунті. Деякі з цих речовин можуть бути токсичними для ґрунтової мікробіоти, знижуючи її активність і різноманітність. Таке надмірне використання пестицидів провокує екологічний дисбаланс, веде до втрати родючості ґрунту та зниження здатності екосистеми протистояти стресовим умовам. Крім того зазначимо, що пестициди впливають на тварин та здоров'я людей. Неправильне використання пестицидів призводить до забруднення не лише ґрунту, а й повітря та води, що призводить до різних негативних наслідків для здоров'я людини.

Дослідження впливу пестицидів на мікроорганізми ґрунту передбачає аналіз змін у складі мікробіоти, її функціональній активності та взаємодії з іншими компонентами ґрунтової екосистеми. Це сприяє глибшому розумінню механізмів, через які пестициди впливають на біологічні процеси в ґрунті, та розробці стратегій для мінімізації негативних наслідків. Зокрема, йдеться про застосування біологічно активних пестицидів Pesticol та Karate Gold або впровадження альтернативних підходів до захисту рослин. Актуальність такого дослідження зумовлена необхідністю забезпечення сталого розвитку сільського господарства, збереження природних ресурсів і поліпшення здоров'я людей у перспективі.

Метою нашого дослідження є дослідити вплив пестицидів Pesticol та Karate Gold на ґрунтову мікрофлору.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання:

- проаналізувати пестициди та їх властивості, а також дослідити вплив використання пестицидів на навколишнє середовище;
- описати та пояснити механізм дії пестицидів;
- охарактеризувати методи очищення ґрунту від пестицидів;
- вивчити та застосувати методи оцінки чисельності та виділення мікроорганізмів;
- ознайомитись та застосувати методи ідентифікації мікроорганізмів;
- дослідити та застосувати методи експериментальної оцінки токсичності пестицидів;
- надати характеристику місць відбору проб ґрунтів для дослідження та обраних пестицидів;
- здійснити екологічний аналіз впливу пестицидів методом Дригальського на досліджувані штами бактерій;
- провести екологічний аналіз впливу пестицидів методом мінімальної інгібуючої концентрації (МІК) на досліджувані бактерії;

Об'єкт дослідження – процеси функціонування бактерії ґрунтового покриву під дією обраних пестицидів.

Предмет дослідження – вплив пестицидів Pesticol та Karate Gold на ґрунтову мікрофлору.

Методи дослідження включали мікробіологічний аналіз ґрунту з використанням методів: метод серійних розведень для оцінки кількості мікроорганізмів, подальше редуційне культивування, фарбування за Грамом для визначення типу бактерій, поверхневий посів для експериментів з пестицидами та метод мінімальної інгібуючої концентрації (МІК) для визначення рівня пригнічення росту мікроорганізмів. Результати досліджень були піддані графічному аналізу даних.

Інформаційну базу дослідження становили: нормативно-правові акти України, зокрема Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених щодо впливу пестицидів на мікрофлору ґрунту, а також власні експериментальні дані, отримані під час дослідження впливу пестицидів Pesticol та Karate Gold на бактеріальні штами ґрунту.

Наукова новизна: полягає у експериментальному дослідженні впливу двох пестицидів з різною хімічною природою та концентрацією активних інгредієнтів – Pesticol (на основі апельсинової олії, 6,0 %) та Karate Gold (на основі лямбда-цигалотрину, 0,075 %) – на штами мікрофлори ґрунту трьох різних ділянок забору.

Практичне значення одержаних результатів: є можливість використання результатів екологічного аналізу при розробці стратегій запобігання та зменшення хімічного забруднення ґрунту шкідливими пестицидами. Дослідження дозволяє краще зрозуміти механізми впливу пестицидів на біологічні процеси в ґрунті та розробити стратегії зменшення негативного впливу, наприклад, використання біологічно активних пестицидів або альтернативних методів захисту рослин.

Апробація результатів та публікації: Основні положення та результати кваліфікаційної роботи викладено у доповідях: «Вплив пестицидів на ґрунтову мікрофлору в контексті сталого використання природних ресурсів» у науковому журналі *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. Харків, 2025, № 43, с. 156–162 [3]; «Вплив пестицидів на активність бактерій *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus* та *Micrococcus* у ґрунті» у збірнику матеріалів X Міжнародного конгресу «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» 27–28 березня 2025 року м. Львів [10]; «Екологічний аналіз впливу пестицидів на мікрофлору ґрунту» на XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень» 14–15 травня 2024 року м. Луцьк [11]; «Вплив пестицидів Pesticol та Karate Gold на ґрунтову мікрофлору» на XVIII

Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, студентів та аспірантів «Актуальні проблеми розвитку природничих та гуманітарних наук» 14 листопада 2024 року, м. Луцьк [9];.

Структура роботи: Обсяг роботи становить 59 сторінок друкованого тексту. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 52 найменувань. Робота містить 4 таблиці, 23 рисунки.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЕКОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ПЕСТИЦИДІВ НА ГРУНТОВУ МІКРОФЛОРУ

1.1. Пестициди та їх властивості, вплив використання пестицидів на навколишнє середовище

Пестициди – це синтетичні речовини або біологічні засоби, що застосовуються для приваблення, знищення або ослаблення будь-яких видів шкідників. Вони в основному використовуються в сільському господарстві для захисту культур від комах, бур'янів, бактеріальних або грибкових захворювань під час росту, а також для захисту продуктів харчування під час зберігання від щурів, мишей, комах або різних біологічних забруднень. Деякі пестициди, такі як гербіциди, використовуються для видалення придорожніх бур'янів, дерев і чагарників, а також широко застосовуються в ставках і озерах для боротьби з небажаними водними рослинами. Інші використовуються для знищення або пригнічення росту грибів або комах, що паразитують на культурах. Отже, як гетерогенна категорія, пестициди займають особливе місце серед синтетичних хімічних речовин, з якими люди стикаються щодня. Зараз їх можна знайти майже в будь-якій точці світу. Пестициди, що утворюються в результаті діяльності людини, також можуть потрапляти у водойми через поверхневий стік, вимивання та/або ерозію. Тим часом дрейф, випаровування та вітрова ерозія можуть переносити залишки пестицидів в атмосферу, що може призвести до забруднення поверхневих вод, ґрунтів, флори та фауни через опади, часто в місцях, віддалених від їх джерела [19].

Пестициди класифікуються різними способами, зокрема за їх біологічною активністю (тобто цільовим шкідником) або за їх внутрішніми хімічними властивостями, а саме складом, структурою та наявними функціональними групами.

Таблиця 1.1

Приклади пестицидів для знищення різних видів шкідників*

Пестецид	Боротьба зі шкідниками
Альгіцид	водорості
Авіцид	птахи
Фунгіцид	гриби
Гербіцид	бур'яни/рослини
Інсектициди	комахи
Моллюскоцид	моллюски
Нематоцид	нематоди
Рибоцид	риба
Родентицид	гризуни
Акарациди	кліщі
Бактеріюциди	бактерії
Ларвіциди	личинки
Терміциди	терміти
Овіциди	яйця
Педикулициди	воші
Прециди	хижаки (койоти, вовки)
Сліміциди	слиз
Сильвіциди	дерева та кущі

*Джерело: [17].

До найвідоміших пестицидів належать атразин, ліндан, діазинон, дихлордифенілтрихлоретан (ДДТ) та N-(фосфонометил)гліцин, більш відомий як гліфосат [8].

Атразин – популярний гербіцид, ефективний як до, так і після сходів, для боротьби з дводольними та трав'янистими бур'янами. Він належить до групи триазинів, а механізм його дії подібний до таких сполук, як симазин і пропазин [21].

Ліндан – це хлороорганічний інсектицид, який широко використовується в усьому світі для боротьби зі шкідниками. Однак його застосування викликає серйозні побоювання через високу токсичність і стійкість у навколишньому середовищі. У зв'язку з цим розробляються стратегії очищення забруднених територій на основі мікробіологічного розкладу [23]. Ліндан є типовим представником неводної фази високої щільності (DNAPL), яка забруднює ґрунт і ґрунтові води, становлячи серйозну загрозу для навколишнього середовища [32].

Діазінон – це фосфорорганічний інсектицид, класифікований як засіб з низькою або помірною токсичністю. Він широко застосовується на газонах, у садах та сільському господарстві, де ефективно бореться з багатьма видами комах. Механізм дії полягає в інгібуванні ферментів у нервовій системі шкідників [13]. Ця сполука синтезується шляхом реакції гідроксипіримідину з карбонатом калію, а потім додаванням диетилтіофосфорилу хлориду в строго визначених пропорціях для отримання кінцевого продукту [10].

Дихлордифенілтрихлоретан (ДДТ) – це добре відомий хлорорганічний пестицид, який викликає серйозне занепокоєння через свою стійкість у навколишньому середовищі та потенційну небезпеку для здоров'я людей [9]. Його основний компонент, *p,p'*-ДДТ, є кристалічною речовиною, практично нерозчинною у воді, але легко розчинною в органічних розчинниках [24]. Важливо, що деякі мікроорганізми, включаючи бактерію *Bacillus cereus*, здатні розкласти ДДТ, що створює потенціал для біологічного відновлення (біоремедіації) забруднених територій [34].

Гліфосат ((фосфометил)гліцин) є широко використовуваним фосфорорганічним гербіцидом. Його біологічна дія полягає в інгібуванні ферменту EPSPS, що робить його високоефективним засобом для знищення

бур'янів. Незважаючи на широке застосування, гліфосат становить потенційну загрозу для здоров'я людей і може негативно впливати на біорізноманіття ґрунту [14]. Синтез гліфосату полягає в каталітичному окисненні N-алкільних похідних за допомогою перекису водню та наночастинок золота на вуглецевих носіях, після чого він застосовується як гербіцид, арборцид та пестицид [33].

Токсичні речовини можуть порушувати нормальні біологічні функції організму, взаємодіючи з ферментами або транспортними білками та пригнічуючи їх активність.

Одним із поширених механізмів є те, що токсична сполука, яка має структуру, схожу, але не ідентичну природному субстрату, зв'язується з ферментом. Замість того, щоб бути переробленою, сполука блокує активне місце ферменту. Типовими прикладами таких токсинів є карбаміди та фосфорорганічні інсектициди, які діють шляхом інгібування ферменту ацетилхолінестерази в нервовій системі. Крім того, до цієї категорії належать деякі високоефективні гербіциди, які порушують ключові життєві процеси рослин. Зокрема, гліфосат і глюфосинат інгібують ферменти, необхідні для синтезу амінокислот у рослинних клітинах.

Ступінь селективності інгібіторів ферментів може бути різним, а їх загальна ефективність і вплив залежать від того, наскільки важливу роль відіграє інгібований фермент у метаболізмі різних цільових і нецільових організмів [20].

Відповідно до Закону України «Про охорону навколишнього середовища» (статті 20 та 22), країна прийняла рішення про необхідність створення загальнонаціональної системи моніторингу навколишнього середовища. Вона передбачає регулярну оцінку стану навколишнього середовища, включаючи виявлення та оцінку рівня забруднення, зокрема наявності стійких органічних забруднювачів та пестицидів [3].

Застосування пестицидів створює серйозну загрозу для навколишнього середовища, пов'язану з їх токсичністю та здатністю забруднювати

навколишнє середовище. Дослідження підтверджують стійкість цих речовин, що негативно впливає на широкий спектр організмів: від мікроорганізмів до рослин, тварин і людей.

Неправильне використання пестицидів призводить до забруднення повітря, ґрунту та води, порушує екологічний баланс і шкодить організмам, які не є об'єктом боротьби.

Професійне вплив на людей, особливо на фермерів, може викликати ряд проблем зі здоров'ям, включаючи подразнення шкіри, захворювання дихальної системи і запаморочення. Фермери часто не дотримуються належних сільськогосподарських стандартів при застосуванні пестицидів, що погіршує негативний вплив на навколишнє середовище і здоров'я населення [18; 22; 27; 31].

Щороку світове промисловість скидає в річки понад 160 мільйонів кубічних метрів небезпечних стічних вод. Водночас у ґрунт потрапляє близько 500 мільйонів тонн мінеральних добрив і близько 4 мільйонів тонн пестицидів. Значна частина цих хімікатів не залишається в ґрунті, а мігрує до поверхневих вод, зрештою потрапляючи до річок, озер, морів і океанів, де накопичується у високих концентраціях [7].

Пестициди становлять широкий спектр загроз для навколишнього середовища, масштаб яких залежить від конкретного виду речовини та її токсикологічної дії. Величезна кількість організмів в екосистемах регулярно піддається впливу цих токсичних сполук.

Існують суперечливі дані щодо структури глобального споживання:

За однією з оцінок, споживання зосереджено переважно на інсектицидах (80 %), тоді як гербіциди становлять 15 %, фунгіциди для боротьби з грибовими захворюваннями – 1,46 %, а інші пестициди – 3 %.

Інші глобальні дані показують, що гербіциди становлять найбільшу частку (близько 47,5 %), потім йдуть інсектициди (29,5 %) і фунгіциди (17,5 %), а решта становить 5,5 %.

Слід зазначити, що на Індію припадає 76 % загального споживання пестицидів порівняно з 44 % глобального споживання (ймовірно, це порівняльна категорія або регіональна частка, що вимагає пояснення контексту джерела [26]).

Безпека пестицидів для навколишнього середовища безпосередньо залежить від двох ключових факторів: їх селективності (селективності дії) та стійкості. Стійкість визначається як здатність речовини зберігати біологічну активність у навколишньому середовищі протягом тривалого часу. Слід зазначити, що рівень стабільності (стійкості) одного і того ж сполуки може значно відрізнятися залежно від характеристик конкретного середовища та кліматичних умов.

Період напіврозпаду пестицидів є широким: від одного місяця до 20 років, а в деяких випадках навіть довше. Наприклад, період напіврозпаду ДДТ становить близько 10 років.

У регіонах, де інтенсивно застосовуються пестициди, спостерігаються зміни в чисельності та видовому різноманітті комах, птахів і ссавців, особливо тих, що живуть у ґрунті.

Пестициди можуть піддаватися біологічному розкладу за умови, що їх хімічні властивості не гальмують основну активність і функції ґрунтової біоти. Ґрунтові мікроорганізми можуть розкладати від 10 % до 70 % застосованих пестицидів. Однак цей процес часто призводить до накопичення в природі продуктів розкладу, які можуть бути більш токсичними, ніж вихідна речовина.

Крім того, широке застосування пестицидів призвело до розвитку генетичної резистентності серед шкідників. Наразі відомо, що близько 800 видів комах нечутливі до інсектицидів, а також щонайменше 70 видів бур'янів, 50 видів цвілі та 10 видів дрібних гризунів розвинули стійкість до різних видів пестицидів [2].

Застосування синтетичних пестицидів створює подвійну загрозу, пов'язану з динамікою популяції шкідників. По-перше, відбувається їх

«відродження», коли кількість цільових шкідників після застосування засобу перевищує початковий рівень. По-друге, відбувається «вторинне зростання» – інтенсивне розмноження раніше незначних популяцій комах.

Ці процеси, які Роберт ван ден Бош назвав «сизифовими зусиллями», є частиною самопідживлюючого циклу: застосування пестицидів підвищує стійкість шкідників, що провокує нові епідемії. Кожна нова епідемія вимагає використання нових хімікатів, що, в свою чергу, знову підвищує стійкість. Це замкнуте коло постійно збільшує ризик для навколишнього середовища та здоров'я [4].

Забруднення навколишнього середовища пестицидами є результатом низки факторів, пов'язаних як з порушеннями правил їх обігу та застосування, так і з властивостями самих хімічних речовин.

Фактори, пов'язані з порушеннями норм і правил:

- Недотримання норм і умов: Забруднення відбувається в результаті порушення встановлених норм споживання та умов застосування пестицидів і агрохімікатів.
- Логістичні порушення: Неправильне транспортування, зберігання та застосування хімікатів, а також недотримання загальних санітарно-гігієнічних вимог.
- Помилки у виборі: Неправильний вибір пестицидів або їх сумішей для конкретних умов.
- Несвоєчасне застосування: Застосування гербіцидів у фазах розвитку рослин, коли вони чутливі до цих хімікатів.

Фактори, пов'язані з властивостями та вторинним обігом:

- Систематична стійкість: Постійне застосування стійких пестицидів призводить до їх накопичення в ґрунті та навколишньому середовищі, часто перевищуючи мінімально допустимий рівень (МДР).

- Вторинне використання матеріалів: Використання озимої соломи зернових культур, обробленої гербіцидами, як підстилки або мульчі, що повертає хімічні речовини в ґрунт або в подальший цикл.
- Забруднення атмосфери: Пестициди вивільняються в атмосферу під час переробки (шліфування), а також в результаті випаровування летких сполук [1].

Вплив пестицидів на мікрофлору ґрунту є предметом інтенсивних досліджень. Встановлено, що часте застосування цих речовин може спричиняти істотні зміни в структурі мікроорганізмів, впливаючи на деякі групи організмів, такі як гриби з групи Ascomycota [29; 30].

Основні області впливу:

- Ферментативна активність і цикл речовин: Різні класи пестицидів, включаючи інсектициди та фунгіциди, можуть пригнічувати активність ферментів, які є ключовими для циклу вуглецю та утворення органічної речовини ґрунту. Це має прямий вплив на склад мікроорганізмів [28; 54].
- Загроза для корисної біоти: Ксенобіотичний характер пестицидів становить загрозу для корисних ґрунтових мікроорганізмів, які відіграють ключову роль у біодеградації та переробці поживних речовин. Порушення їх функцій, у свою чергу, негативно впливає на ріст і врожайність сільськогосподарських культур [29].
- Показники забруднення: Дослідження однозначно показують, що пестициди спричиняють істотні зміни у складі ґрунтових бактерій і грибів. Деякі види мікроорганізмів можуть використовуватися як показники рівня забруднення ґрунту [30].

Щоб пом'якшити негативний вплив пестицидів на ґрунтову біоту, було запропоновано використовувати пестициди з повільним вивільненням, включені до біорозкладних матриць. Такий підхід допомагає зменшити токсичний вплив на мікроорганізми, одночасно зберігаючи їх природний потенціал до біоремедіації (самоочищення ґрунту) [25].

Тому розуміння та врахування впливу пестицидів на мікрофлору ґрунту є ключовим елементом розвитку стійких та екологічно чистих сільськогосподарських практик [16].

1.2. Механізм дії пестицидів

Використовуючи молекулярну теорію, закони дії маси та наші знання про природу хімічних процесів в організмах, ми можемо узагальнити біохімічну токсикологію у трьох реченнях та приблизно семи типах реакцій:

1. Токсичні молекули реагують з біомолекулами відповідно до загальних законів хімії та фізики, що призводить до порушення нормальних процесів.
2. Симптоми посилюються із збільшенням концентрації токсичної речовини в місці реакції.
3. Концентрація збільшується із збільшенням дози.

Токсична речовина може реагувати з ферментом або транспортним білком і гальмувати його нормальну дію. Ферменти можуть інгібуватися сполукою, яка має подібну, але не ідентичну структуру до справжнього субстрату; замість того, щоб перероблятися, вона блокує фермент. Типовими токсинами цього типу є карбаміди та фосфорорганічні інсектициди, які інгібують фермент ацетилхолінестеразу. Деякі надзвичайно ефективні гербіциди, які інгібують ферменти, важливі для синтезу амінокислот у рослинах, наприклад гліфосат і глюфосинат, є іншими хорошими прикладами в цій категорії. Інгібітори ферментів можуть бути, але не обов'язково, дуже селективними, і їх дія залежить від значення ферменту в різних організмах [49].

Сучасні інсектициди діють головним чином на чотири нейрональні мішені, а саме: ацетилхолінестеразу, напругозалежний хлорний канал, ацетилхоліновий рецептор та γ -аміномасляний кислотний рецептор, системи, що присутні у тварин, але відсутні у рослин. Гербіциди діють переважно на специфічні для рослин шляхи, блокуючи фотосинтез, синтез каротиноїдів або синтез

ароматичних і розгалужених амінокислот, які необхідні рослинам, але не ссавцям. Багато фунгіцидів блокують ергостерол (грибковий стерол) або біосинтез тубуліну або цитохрому с редуктази, тоді як інші порушують основні клітинні функції. Основним фактором, що обмежує подальше використання майже всіх пестицидів, є селекція штамів, які не тільки стійкі до вибраних або активних сполук, але й мають перехресну стійкість до інших пестицидів, що діють на ту саму мішень. Одним із підходів до відновлення контролю є заміна сполук із стійкою мішенню або механізмом дії на інший набір, який має чутливу мішень. Цей вид управління пестицидами призвів до створення комітетів з резистентності до інсектицидів, гербіцидів та фунгіцидів, до складу яких входять експерти, що мають великі знання, з метою ідентифікації груп резистентності, які фактично є переліками основних мішеней у токсикології шкідників [45].

Дія багатьох пестицидів є різноманітною і часто не може бути конкретно класифікована. Загальновідомо, що фосфорорганічні пестициди є надзвичайно нейротоксичними, оскільки вони незворотно інгібують ацетилхолінестеразу, фермент, що гідролізує нейромедіатор ацетилхолін у нервово-м'язових з'єднаннях та холінергічних синапсах мозку. Багато дитіокарбамінатів (ДТК) викликають внутрішньонейронний окислювальний стрес, що призводить до пошкодження нейронів, оскільки іони металів, що вивільняються під час їх біотрансформації, можуть підвищувати рівні реактивних форм кисню (РФК) в стані рівноваги та стимулювати індуковане РФК окислення ліпідів і білків або інактивувати деякі ферменти, викликаючи нейротоксичні ефекти.

Багато пестицидів викликають ендокринні розлади, порушуючи вироблення, вивільнення, транспорт, метаболізм, дію або елімінацію гормонів. Пестициди також можуть підвищувати рівні АФК у стаціонарному стані, стимулювати модифікацію клітинних компонентів, спричинену АФК, впливати на основні гомеостатичні та регуляторні процеси або послаблювати антиоксидантний захист, що в сукупності призводить до розвитку окисного стресу. Оскільки РФК взаємодіють з ДНК різними способами, підвищення їх

рівня в стаціонарному стані може збільшити ймовірність взаємодії з генетичним матеріалом і спричинити гентоксичність, що призведе до різних мутацій [15].

1.3. Методи очищення ґрунту від пестицидів

Ремедіація забруднених ґрунтів та вод відіграє ключову роль у сучасних технологіях охорони навколишнього середовища. Головною метою розробки та впровадження нових методів у цій галузі є підвищення ефективності ремедіації та зниження загальних витрат на заходи з охорони навколишнього середовища [5]. Методи ремедіації ґрунтів поділяються на дві основні категорії: хімічні та біологічні процеси.

Хімічні методи:

Технології секвестрації та іммобілізації є ефективним підходом до ремедіації ґрунтів, забруднених пестицидами, на місці.

Цей метод базується на використанні сорбційних матеріалів, здатних поглинати та зв'язувати пестициди в ґрунті. Основною метою іммобілізації є запобігання подальшій міграції забруднюючих речовин та зменшення їх токсичності для організмів, що не є об'єктом боротьби.

Типові сорбенти: Карбонатні матеріали часто використовуються через їх здатність ефективно ізолювати біологічні речовини, що мінімізує необхідність складної попередньої очистки ґрунту.

Інноваційні сорбенти: Потенціал органічних відходів, таких як залишки від виробництва оливкової олії, як ефективних матеріалів для видалення та іммобілізації певних пестицидів, зокрема трициклазолу та бентазону [12].

Технології сепарації (екстракції) – це хімічні методи видалення забруднень із ґрунтів та осадів, головним чином із використанням розчинників та поверхнево-активних речовин (сурфактантів).

Ключову роль у цих процесах відіграють поверхнево-активні речовини, які застосовуються в процесі ремедіації з метою зменшення поверхневого або

міжфазного натягу у водних розчинах. Це значно покращує розчинення та мобілізацію стійких забруднень, дозволяючи їх екстрагувати.

Вибір конкретного розчинника (або екстрагента) завжди залежить від хімічної природи забруднення, що видаляється.

Для реалізації цього підходу застосовується ряд методів:

- Застосування розчинників (традиційних екстрагентів).
- Застосування синтетичних поверхнево-активних речовин.
- Застосування біосурфактантів (наприклад, софороліпідів, які є біорозкладними і ефективно сприяють розчиненню).
- Застосування циклодекстринів.
- Пряме промивання ґрунту (як загальний процес) [5].

Біологічні методи:

Фіторемедіація – це інноваційний, безпечний для навколишнього середовища та економічно вигідний метод ремедіації ґрунтів, заснований на використанні рослин та супутніх їм ризосферних мікроорганізмів для детоксикації пестицидів. У ризосфері відбувається активний розклад шкідливих речовин, що сприяє як їх перетворенню (фітолізі), так і росту рослин. Ефективність цього методу залежить від властивостей ґрунту, виду рослин та наявності конкретних мікроорганізмів. Ключовим завданням є не тільки накопичення забруднень, але й їх метаболічний розпад у ґрунті, що є важливою умовою збереження його родючості [26; 53].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методи оцінки чисельності та виділення мікроорганізмів

Метод серійних розведень

Мікробіологічний аналіз ґрунту проводиться методом серійних розведень з метою визначення кількості мікроорганізмів у зразку. Цей метод широко використовується в мікробіології завдяки своїй ефективності та точності. Основний принцип процедури полягає в поступовому зниженні концентрації мікроорганізмів у зразку і їх вирощуванні на спеціальних агарових або рідких поживних середовищах. На першому етапі для аналізу беруть певну кількість ґрунту, яку поміщають у ємність із буферним розчином, створеним для розведення. Далі відбирають частку з отриманого розчину і переносять її до наступної ємності з новим розчином для наступного розведення. Така процедура повторюється неоднократно, поки не буде досягнуто бажаної концентрації. Після цього підготовлені розведення піддають інкубації для виявлення мікроорганізмів і оцінки їх кількості. Ця етапність забезпечує поступове зменшення концентрації мікроорганізмів, дозволяючи отримати точні результати (рис. 2.1) [11; 52].

Метод серійних розведень застосовують для підрахунку кількості мікроорганізмів у різних зразках, зокрема у ґрунті, воді, харчових продуктах або клінічних матеріалах. Цей метод відіграє ключову роль у мікробіології, оскільки дає змогу не лише виявити та оцінити кількісний склад мікроорганізмів у зразку, але й перевірити ефективність засобів, спрямованих на контроль їхнього росту, таких як антибіотики чи дезінфекційні речовини [15].

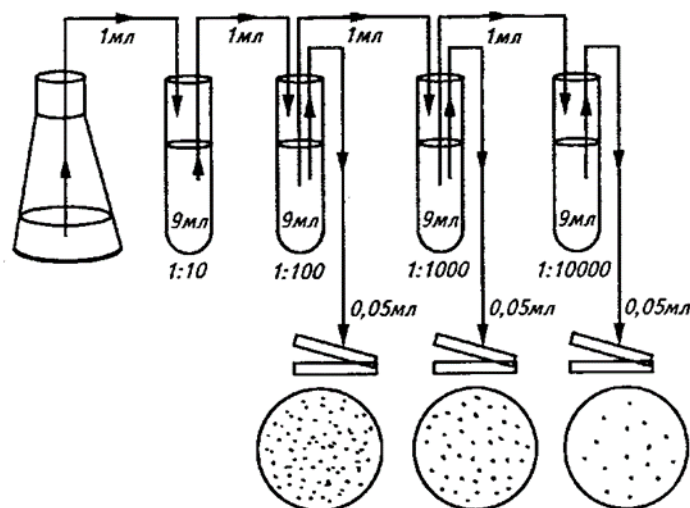


Рис. 2.1. Розведення культур*

*Джерело: [6].

1 г ґрунту з кожного зразка поміщали у три колби, наповнені стерильним фізіологічним розчином, і ретельно перемішували протягом 20 хвилин при температурі 19°C. Після цього з одержаного препарату відбирали 1 мл розчину та здійснювали серію розведень до ступеня 10^{-5} . Для дослідження були вибрані розведення 10^{-3} , 10^{-4} і 10^{-5} . Підготовлені розчини переносили на живильні агарові середовища за методом Дригальського. Чашки залишали на інкубацію протягом чотирьох днів за кімнатної температури.

Метод Дригальського

Спочатку дослідний матеріал наносять на поверхню живильного середовища поблизу краю чашки, використовуючи петлю або піпетку. Стерильний шпатель проходить процес стерилізації в полум'ї, після чого його охолоджують шляхом контакту зі стінками чашки. Виконуючи обережні кругові рухи та утримуючи чашку в напівзакритому положенні, матеріал рівномірно розподіляють по поверхні середовища [45].

Метод колонієутворюючих одиниць (КУО)

Метод колонієутворюючих одиниць (КУО) є одним із найбільш поширених підходів для кількісного аналізу мікроорганізмів у пробах. Цей метод дозволяє оцінити загальну чисельність життєздатних мікроорганізмів у зразку,

здійснювати порівняльний аналіз популяції мікроорганізмів у різних зразках, визначати ефективність антимікробної терапії, а також забезпечувати контроль якості продуктів харчування, води та інших матеріалів. Основними етапами даного процесу є підготовка зразка, його інокуляція на тверді поживні середовища, інкубація в оптимальних умовах та підрахунок утворених колоній після завершення інкубаційного періоду [41].

Після отримання серії відповідних розведень відібрані зразки висівають на специфічно підібрані агарові середовища або в рідкі середовища. За закінчення певного періоду інкубації підраховуються колонії мікроорганізмів, а чисельність мікроорганізмів у досліджуваному зразку виражається у вигляді колонієутворюючих одиниць (КУО) на одиницю об'єму зразка.

Метод штрихових посівів

Метод штрихового посіву є одним із найпоширеніших способів нанесення мікроорганізмів на тверді живильні середовища. Основними його цілями є отримання чистих культур, дослідження морфологічних характеристик видів через формування колоній, а також оцінка чутливості мікроорганізмів до антибіотиків. Цей метод широко застосовується в лабораторній діагностиці для перевірки чистоти зразків, ідентифікації видів мікроорганізмів і тестування їхньої стійкості до антибактеріальних препаратів [39].

Суть методу полягає у використанні бактеріологічної петлі для перенесення досліджуваного матеріалу на поверхню агару вздовж краю чашки. Після цього надлишки матеріалу видаляють, а посів виконують паралельними мазками від одного боку чашки до іншого.

Такий спосіб культивування дозволяє зменшити кількість мікроорганізмів у зразку перед їх розмноженням для подальшого аналізу. Після завершення посіву чашки з поживним середовищем інкубують протягом 5 днів, створюючи оптимальні умови для зростання мікроорганізмів.

2.2. Методи ідентифікації мікроорганізмів

Метода Грама

Бактерії піддавалися фарбуванню за методом Грама, що є диференційною методикою, яка дає змогу визначити дві ключові групи бактерій, котрі відрізняються за структурою клітинної стінки. У результаті цього фарбування виділяють грамнегативні та грампозитивні бактерії. Грамнегативні бактерії набувають рожевого забарвлення, тоді як грампозитивні забарвлюються у фіолетовий колір.

Процедура фарбування складається з кількох послідовних етапів. Спершу відбирається колонія бактерій. На очищене та знежирене предметне скло наносять краплину фізіологічного розчину, після чого колонію бактерій рівномірно розподіляють за допомогою бактеріологічної петлі, створюючи мазок. Отриманий мазок залишають висихати в природних умовах, після чого його фіксують через триразове прогартування над полум'ям пальника.

Далі йде етап основного фарбування: предметне скло обробляють кристалічним фіолетовим барвником, залишаючи його на поверхні протягом 2–3 хвилин. Після цього препарат промивають дистильованою водою і додають розчин Люголя на 1–2 хвилини для закріплення барвника. Знову проводиться промивання дистильованою водою, а далі застосовується етанол для знебарвлення – цей етап триває близько 30 секунд. Після завершення знебарвлення препарат ретельно промивають водою і наносять останній барвник – фуксин, який витримується протягом 30 секунд [38; 44; 47].

Завершальний етап передбачає остаточне промивання предметного скла водою та його висушування. Після висихання препарат стає готовим для мікроскопічного аналізу за допомогою імерсійного об'єктиву.

2.3. Методи експериментальної оцінки токсичності пестицидів

Дослідження впливу пестицидів на мікроорганізми методом Дригальського

Вибрані культури бактерій пересіяли в стерильні пробірки. Через три дні до вирощених мікроорганізмів додали фізіологічний розчин і перемішали за допомогою вортекса. Із отриманої суміші відбирали 0,1 мл речовини, яку висівали на заздалегідь підготовлені агарові середовища в 48 чашках Петрі. Розподіл здійснювали таким чином: по 8 чашок для кожного штаму бактерій. Усі підготовлені пластини були об'єднані в групи по 4 для кожного штаму і обраного пестициду [46]. На поверхню кожної пластини розміщували кружечок із фільтрувального паперу, на який за допомогою електронної піпетки наносили 10 мкл обраного пестициду. Після цього зразки залишали на інкубацію на чотири доби. Така робота виконувалася для всіх чашок: 24 для одного пестициду та 24 для іншого (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Методика Дригальського та пестициди на кружечку з фільтрувального паперу*

*Джерело: виконано автором.

Через певний час було здійснено спостереження за отриманими результатами. Потім проводили метод визначення мінімальної інгібуючої концентрації (МІК).

Метод мінімальної інгібуючої концентрації (МІК)

Метод мінімальної інгібуючої концентрації (МІК) – це лабораторний підхід, що дозволяє визначити найнижчу концентрацію антибіотика або іншого антимікробного засобу, необхідну для пригнічення росту мікроорганізмів. Цей метод має ключове значення у трьох основних аспектах: допомагає обрати найефективніший антибіотик для лікування конкретної інфекції, контролювати розвиток стійкості мікроорганізмів до антибіотиків та порівнювати ефективність нових препаратів зі стандартними [40; 48].

Принцип МІК полягає в тому, що мікроорганізми не гинуть при контакті з дезінфікуючим засобом, а лише призупиняють своє розмноження. Для виконання методу додають 1 мл обраного хімічного засобу до першої пробірки з 1 мл живильного бульйону, після чого ретельно перемішують на вортексі. З першої пробірки відбирають об'єм 1 мл рідини і переносять у другу пробірку, де рідина також змішується. Цей процес повторюють, переносючи 1 мл із другої в третю пробірку і так далі, аж до створення серії з п'яти розведень [37; 43; 50].

Далі в кожную пробірку додається 0,005 мл інокуляту мікробного штаму. Після цього всі пробірки залишають на інкубацію протягом 48 годин. Результати спостережень фіксуються для подальшого аналізу.

РОЗДІЛ 3

ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПЕСТИЦИДІВ PESTICOL ТА KARATE GOLD НА ГРУНТОВУ МІКРОФЛОРУ

3.1. Характеристика місць відбору проб ґрунтів для дослідження та обраних пестицидів

У Луцьку здійснено відбір трьох зразків ґрунту з територій, що знаходяться у різних локаціях. Перший зразок було отримано з ділянки, розташованої в межах ботанічного заказника «Воротнів», який належить до лісової зони.

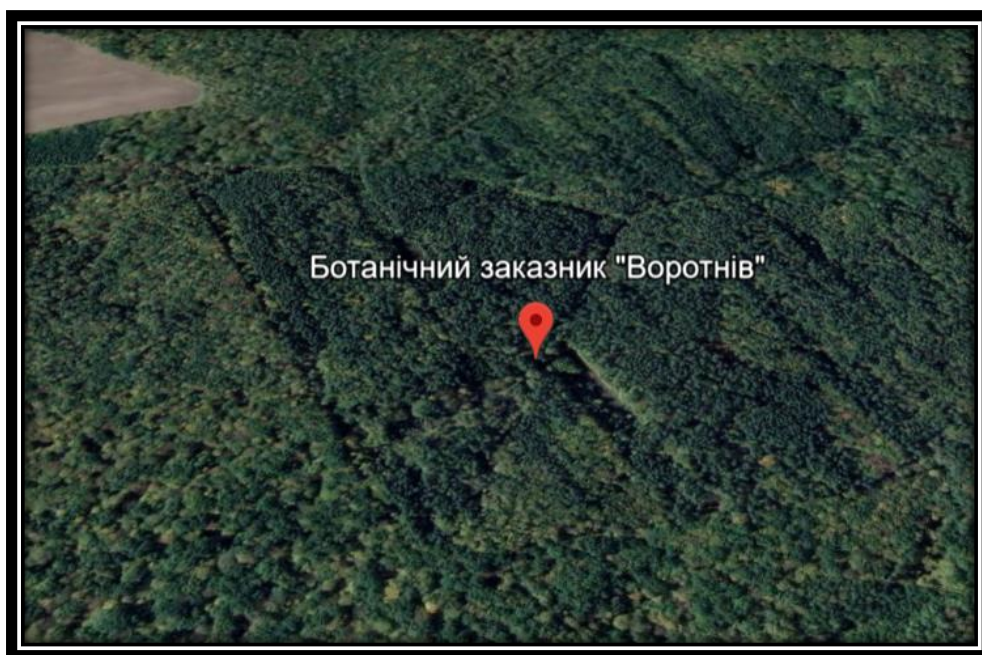


Рис.3.1. Місце розташування першої ділянки для відбору ґрунтових проб*
*Джерело: <http://surl.li/tzmbu>.

Воротнівський ботанічний заказник розташований на північ від села Воротнів у Луцькому районі Волинської області та охоплює площу 600 гектарів. Він лежить на заліснених пагорбах північно-західної частини Рівненського плато. Територія заказника вирізняється великою природною різноманітністю, представленою різними типами ґрунтів, такими як дерново-підзолисті, піщані,

кам'янисті та болотні. Тут переважають лісові екосистеми, серед яких домінують насадження граба і його похідних, берези, дуба та ясена. У заповіднику можна побачити такі лісові масиви, як дубово-грабові, грабово-березові та дубово-ясеневі, де зустрічаються рідкісні види флори: дуб черешчатий, сосна звичайна, осика звичайна, береза повисла, клен гостролистий та інші. Деякі дерева в заказнику мають солідний вік – наприклад, дуб черешчатий росте тут понад 100 років, а сосна звичайна – понад 80 років. Крім того, тут мешкають рідкісні види рослин, такі як зозулині черевички справжні, вовчі ягоди запашні тощо.

Другий зразок відібрано на ділянці автошляху Е85 за адресою вулиця Окружна, 37, неподалік від магазину «Епіцентр» у місті Луцьку.

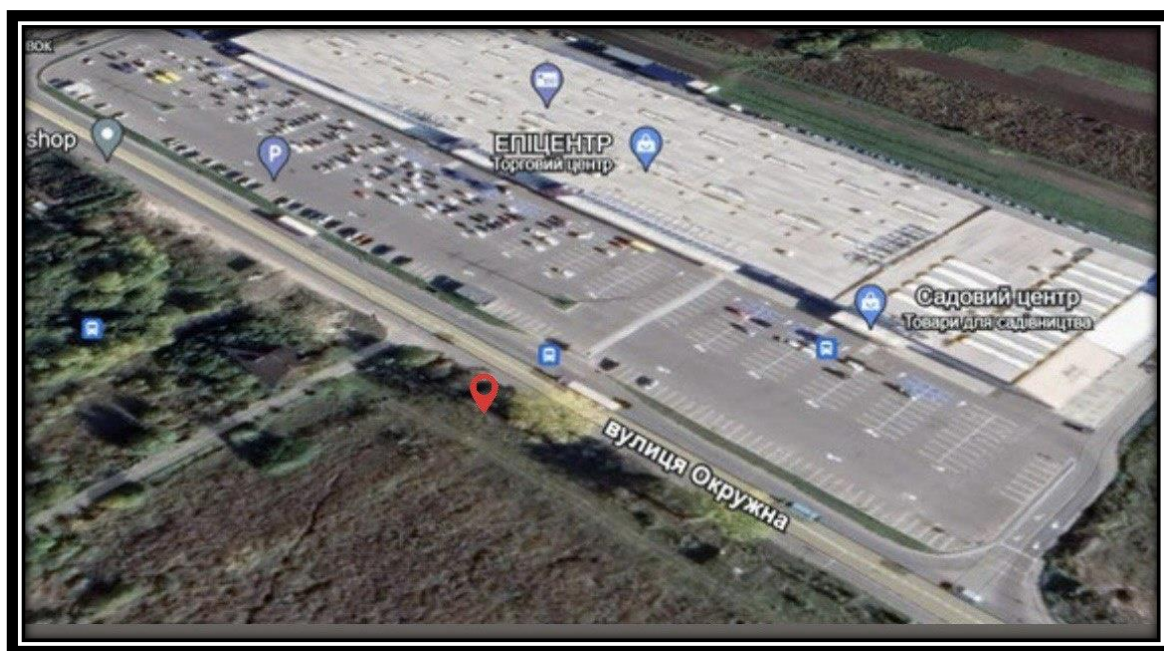


Рис.3.2. Місце розташування другої ділянки для відбору ґрунтових проб*

*Джерело: <http://surl.li/tzmct>.

Ділянка автомагістралі Е85, розташована на вулиці Окружній, 37, поблизу торгового центру «Епіцентр» у місті Луцьк, розташована на рівнинній території. Південний бік автомагістралі межує з житловою забудовою, тоді як північна частина прилягає до промислової зони. Ґрунтовий покрив цієї місцевості переважно представлений дерново-підзолистими ґрунтами. Придорожня смуга в

межах зазначеної ділянки не має деревної рослинності. Ґрунт залишається сухим та демонструє високу здатність до водопоглинання.

Третій зразок було відібрано з квітника, розташованого біля гуртожитку №2 Волинського національного університету імені Лесі Українки на вулиці Винниченка, 22, у місті Луцьк.



Рис.3.3. Місце розташування третьої ділянки для відбору ґрунтових проб*

*Джерело: <http://surl.li/tzmdk>.

Ділянка, розташована на вулиці Винниченка поблизу гуртожитку №2 ВНУ, лежить на рівнинній території, оточеній багатоквартирними житловими будинками з двох боків. На цьому місці знаходиться газон, а ґрунт характеризується як сухий. Уздовж вулиці ростуть каштани, липи та клени.

Для експерименту обрано два пестициди, детальна інформація про які представлена на рисунку 3.4. Перший препарат, Pesticol, має високу концентрацію діючої речовини – 6,0 %. Завдяки своїй універсальності, він здатний протидіяти комахам, грибовим хворобам, жукам і павукам, виконуючи функції фунгіциду, інсектициду та акарициду. Основною складовою препарату є апельсинова олія (сполука з групи ефірних олій) з концентрацією 60 г/л. Другий

пестицид, Karate Gold, застосовується для знищення комах і є інсектицидом. У складі міститься лямбда-цигалотрин (сполука піретроїдної групи) у кількості 0,75 г/л (0,075 %) (таблиця 3.1). Обидва препарати виробляє компанія Syngenta Polska Sp. z o.o., що базується у Варшаві.



Рис. 3.4. Обрані пестициди Pesticol та Karate Golg*

*Джерело: виконано автором.

Таблиця 3.1.

Характеристика обраних пестицидів*

Назва пестициду	Діюча речовина	Концентрація діючої речовини, %
Pesticol	апелсинова олія	6,0
Karate Gold	лямбда-цигалотрин	0,075

*Джерело: розроблено автором.

Апельсинова олія є ефірною масляною речовиною, що може застосовуватися як активний компонент у пестицидах. Цей продукт природного походження не шкодить довкіллю та вважається безпечним для людей і тварин. Вона демонструє ефективність у ролі інсектициду, фунгіциду та бактерициду. Утім, апельсинова олія може втрачати стабільність під впливом сонячного світла

і високих температур. У деяких людей можливі подразнення через контакт із цією речовиною. Крім того, вона може виявитися малоефективною проти певних видів шкідників або хвороб. Характеризується характерним запахом апельсина та зеленуватим кольором препарату. Температура плавлення становить 45 °С, молекулярна маса – 136,24 г/моль. Олія не розчиняється у воді, але добре змішується з різними типами масел та органічними розчинниками [36].

Лямбда-цигалотрин – це синтетичний інсектицид із групи піретроїдів, який використовується для боротьби з численними шкідниками в аграрному секторі, лісництві та побутових умовах [42; 51]. Він проявляє високу ефективність проти таких шкідників, як комахи, кліщі та нематоди. Препарат діє швидко, вбиваючи шкідників протягом кількох годин після контакту. За умови правильного використання лямбда-цигалотрин є відносно безпечним для людей і тварин, однак становить загрозу для риб та інших водних організмів. Шкідники можуть з часом набути стійкості до цієї речовини. Засіб є небезпечним також для бджіл та корисних комах. Лямбда-цигалотрин – рідина без кольору й запаху, температура плавлення якої становить 94–96 °С, а молекулярна маса досягає 479,92 г/моль. Він майже не розчиняється у воді, але добре взаємодіє з органічними розчинниками, наприклад, ацетоном чи етанолом [49].

3.2. Екологічний аналіз впливу пестицидів методом Дригальського на бактерії *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus*, *Micrococcus*

У рамках дослідження розглядалися мікроорганізми, що належать до родів *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Micrococcus* та *Bacillus*.

З першої ділянки для аналізу було обрано два види ґрунтових бактерій: представників родів *Sphingomonas* та *Streptomyces*.

Sphingomonas – грамнегативні паличкоподібні бактерії, що належать до родини Sphingomonadaceae. Ці мікроорганізми є аеробними хемоорганотрофами, отримуючи енергію через окислення органічних сполук за наявності кисню.

Представники роду широко поширені в ґрунтовому та водному середовищі і можуть брати участь у розщепленні різних забруднювальних речовин.

Стрептоміцети (*Streptomyces*) – бактерії класу актинобактерій, які вирізняються грампозитивною структурою та високим вмістом гуаніну й цитозину у ДНК. Здебільшого вони зустрічаються в органічних рештках і природному середовищі, але здатні існувати в різноманітних умовах довкілля. Більшість представників цього роду формують ендоспори. Вони відомі своїм «земляним» запахом, що виникає внаслідок метаболічної активності, зокрема виробництва геосміну. Стрептоміцети мають складний цикл морфологічного розвитку і характеризуються потужним вторинним метаболізмом. Їхні хромосоми є лінійними та вважаються одними з найбільших серед бактерій, що містять значний обсяг генетичної інформації. Ця особливість зумовлює синтез численних вторинних метаболітів, таких як антибіотики, гормоноподібні речовини та сидерофори. Завдяки здатності продукувати різноманітні антибіотики, багато з яких мають важливе клінічне значення, стрептоміцети є важливим об'єктом досліджень у біології та фармацевтиці.

З другої ділянки взято *Micrococcus* та *Bacillus*.

Родина *Micrococcus* охоплює грампозитивні бактерії кулястої форми, які зазвичай зустрічаються у повітрі та на поверхні шкіри. Вони добре пристосовані до життя у ґрунтових екосистемах, переважно тих, які характеризуються лужним рівнем рН та високим вмістом солей. Ці бактерії виконують важливу екологічну функцію у розкладі складних органічних сполук до простіших, що сприяє вивільненню необхідних поживних речовин для росту рослин. Окремі представники цього роду демонструють високу стійкість до стресових умов, що дозволяє їм існувати у найрізноманітніших ґрунтових середовищах, таких як регіони з високою температурою чи дефіцитом вологи. *Micrococcus* є аеробами або факультативними анаеробами, здатними виживати у присутності кисню або за його відсутності. Ці бактерії немобільні, тобто позбавлені здатності до активного переміщення, а для розмноження використовують бінарний поділ –

процес клітинної реплікації, при якому одна клітина ділиться на дві ідентичні дочірні.

Рід *Bacillus* складається з грампозитивних паличковидних бактерій, широко поширених у ґрунті. Ці мікроорганізми можуть бути як суворо аеробними, так і факультативно анаеробними, завдяки чому вони здатні адаптуватися до різних умов довкілля. Основною відмінною властивістю цього роду є здатність утворювати ендоспори, що надає їм високу витривалість до екстремальних впливів, таких як високотемпературне нагрівання, висихання та ультрафіолетове опромінення. У ґрунтовій екосистемі *Bacillus* відіграють ключову роль у кругообігу поживних речовин через розщеплення органічного матеріалу. Це сприяє вивільненню таких важливих елементів, як азот, фосфор і калій, що позитивно впливає на родючість ґрунту та рослинний ріст. Деякі штами *Bacillus* виконують функцію ризобактерій, які стимулюють ріст рослин завдяки фіксації атмосферного азоту, синтезу сидерофорів, фітогормонів і активації системної стійкості рослин. Крім того, окремі види бактерій *Bacillus* використовуються як агенти біоконтролю для придушення патогенів рослинного походження. Вони також беруть участь у процесах біоре mediaції, розкладаючи різноманітні забруднювачі, такі як вуглеводні чи пестициди. Серед найбільш відомих видів цього роду в екосистемі ґрунту виділяються *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium* і *Bacillus cereus*, кожен з яких має специфічні корисні властивості для підтримання екологічного балансу.

З третьої ділянки побрано 2 ґрунтові бактерії роду *Bacillus*.

Посів методом Дригальського на живильне агарове середовище у чашки Петрі

Посів здійснювали на шість чашок Петрі із застосуванням трьох розведень зразка ґрунту (10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5}). Отримані результати підрахунків колонієутворюючих одиниць (КУО) були внесені до таблиці 3.2 та показані на рисунку 3.5.

Таблиця 3.2.

КУО/мл для колоній, вирощених у чашках Петрі після 3 днів інкубації*

№ зразків ґрунту	Розведення	КУО/мл	Опис вирослих колоній
Перша ділянка, ліс	10^{-3}	не розраховується	1 велика бактерія, опукла, гладка, неправильної форми, білого кольору; 2 жовті бактерії, круглі колонії, опуклі, гладкі. 3 кратероподібні бактерії, білого кольору; великі білі колонії, неправильної форми, плоскі
	10^{-4}	не розраховується	1 великий зелений гриб; 1 неправильна і плоска колонія білих бактерій
	10^{-5}	$1 \cdot 10^5 = 100000$	1 велика бактерія, білого кольору, неправильної форми, плоска, гладка
Друга ділянка, біля дороги	10^{-3}	$88 \cdot 10^4 = 880000$	80 білих бактерій, невеликих за розміром, круглих, опуклих і гладеньких; 8 маленьких жовтих бактерій, круглих і опуклих.
	10^{-4}	$71 \cdot 10^5 = 7100000$	14 маленьких білих бактерій, круглих і опуклих; 57 маленьких червоних бактерій, круглих і гладких
	10^{-5}	$11 \cdot 10^6 = 11000000$	11 маленьких білих бактерій, круглих, плоских і гладких

Продовження таблиці 3.2.

Третя ділянка, квітник	10^{-3}	не розраховується	1 жовта маленька кругла бактерія, гладка; велика біла колонія, неправильна, плоска.
	10^{-4}	не розраховується	велика рожева бактерія, опукла, кругла; 1 жовта маленька бактерія, веретеноподібна і опукла; велика колонія білих бактерій, пунктирна і неправильна, плоска і опукла.
	10^{-5}	$2 \cdot 10^4 = 20000$	2 маленькі білі бактерії, гладкі та опуклі

*Джерело: розроблено автором.

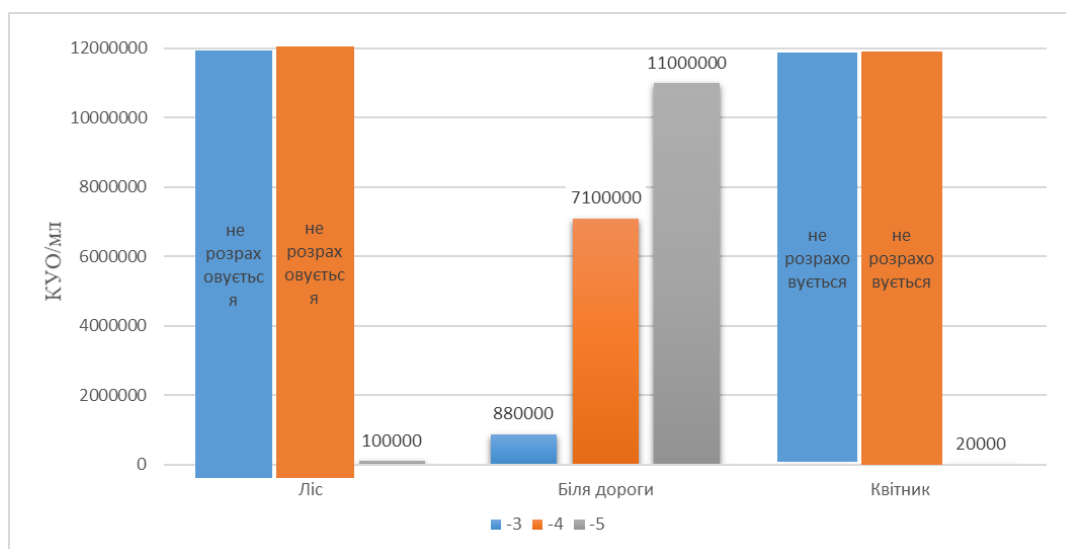


Рис. 3.5. Порівняння кількості мікроорганізмів з різних зразків ґрунту *

*Джерело: розроблено автором.

Для проведення подальших досліджень були обрані такі чашки Петрі: розведення 10^{-3} для першого зразка ґрунту; розведення 10^{-4} та 10^{-5} для другого зразка ґрунту; розведення 10^{-3} та 10^{-4} для третього зразка ґрунту.

Фарбування за Грамом

Для дослідження було відібрано шість різних штамів ґрунтових бактерій, по два види на зразок ґрунту.

Перший зразок ґрунту, ліс

На зображенні 3.6 представлено фотознімок, який демонструє велику колонію грамнегативних паличководних бактерій. Колонія має характерний жовтий колір на чашці Петрі. Виходячи з отриманих даних, можна зробити припущення, що ці бактерії належать до роду *Sphingomonas*.

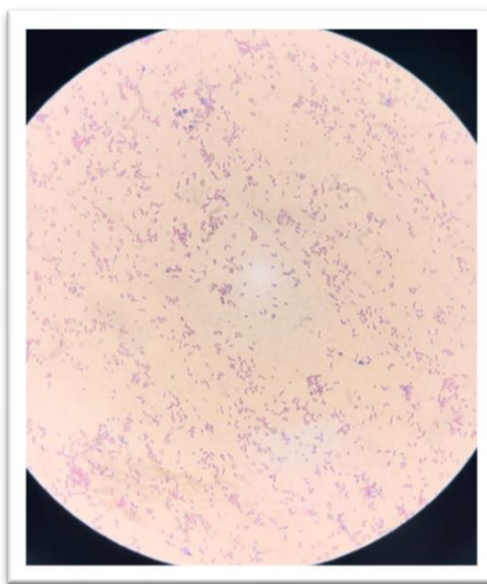


Рис. 3.6. Грамнегативні палички, розведення 10^{-3} (а)*

*Джерело: виконано автором.

На рисунку 3.7 зображено фотографію, на якій видно велику колонію грампозитивних паличок. Вона білого кольору, має форму кратера в чашці Петрі та змінила колір агарового середовища з жовтого на коричневий. Виходячи з отриманих даних, можна припустити, що це бактерія роду *Streptomyces*.

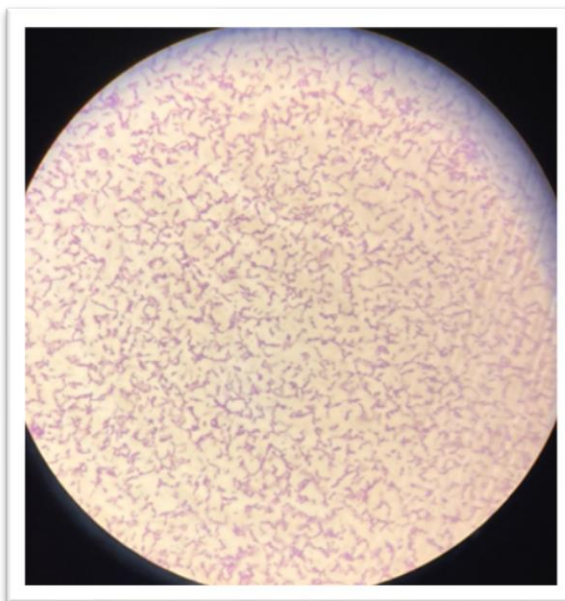


Рис. 3.7. Грампозитивні палички, розведення $10^{-3}(6)^*$

*Джерело: виконано автором.

Другий зразок ґрунту, біля автомобільної дороги

На зображенні 3.8 показано фото колонії грампозитивних коків невеликих розмірів. На чашці Петрі ці колонії мають червоне забарвлення. Виходячи з отриманої інформації, можна визначити, що це бактерії роду *Micrococcus*.

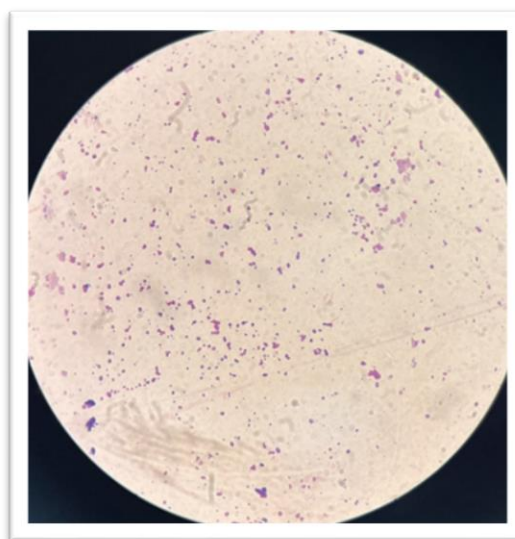


Рис. 3.8. Грампозитивні коки, розведення 10^{-4}^*

*Джерело: виконано автором.

На рисунку 3.9 зображено фотографію, на якій видно колонію грампозитивних паличкоподібних мікроорганізмів невеликого розміру. На поверхні чашки Петрі ці колонії характеризуються жовтим забарвленням. Аналіз отриманих даних дозволяє дійти висновку, що досліджувані бактерії належать до виду *Bacillus*.

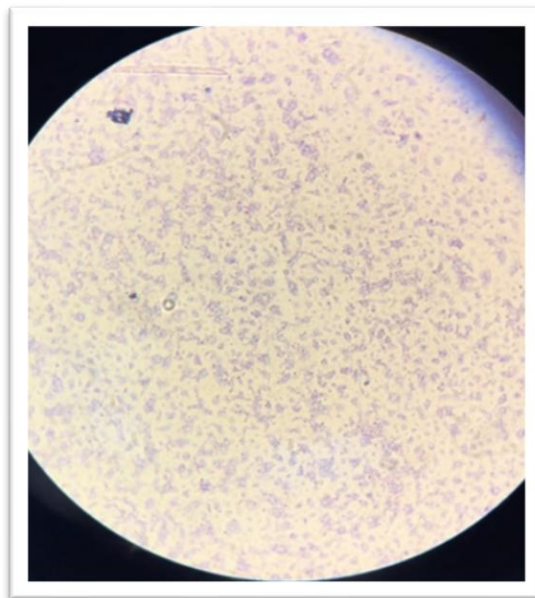


Рис.3.9. Грампозитивні палички, розведення 10^{-5} *

*Джерело: виконано автором.

Третій зразок ґрунту, квітник

На рисунку 3.10 видно колонію великих грампозитивних паличок. У чашці Петрі ці колонії характеризуються білим забарвленням. На основі отриманих даних можна припустити, що це представники роду *Bacillus*.

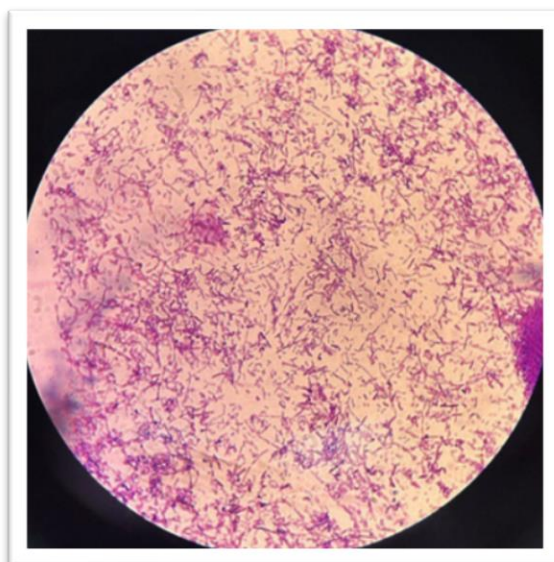


Рис.3.10. Грампозитивні палички, розведення 10^{-3} *

*Джерело: виконано автором.

На рисунку 3.11 видно колонію грампозитивних паличок веретеноподібної форми значного розміру. У чашці Петрі колонії характеризуються рожевим кольором. На основі отриманих даних можна дійти висновку, що це *Bacillus*.

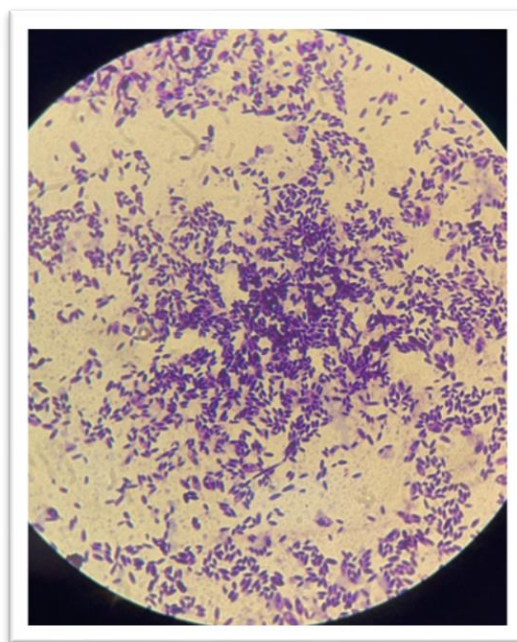


Рис.3.11. Грампозитивні палички, розведення 10^{-4} *

*Джерело: виконано автором.

Посів методом Дригальського на чашки Петрі та тестування впливу пестицидів Pesticol та Karate Gold на ґрунтові бактерії

Бактеріальний посів здійснювали у 48 чашках Петрі, розділивши по 24 на кожен із досліджуваних пестицидів та по 8 чашок для кожного типу мікроорганізмів. У експерименті використовували пестициди Pesticol (6,0 %) і Karate Gold (0,075 %). Після культивування мікроорганізмів вимірювали розмір зони пригнічення їхнього росту, застосовуючи лінійку.

Перший зразок ґрунту, ліс

10^{-3} (a) *Sphingomonas*

Після тестування було виявлено, що пестицид Pesticol достатньою мірою пригнічував ріст *Sphingomonas*, тоді як Karate Gold спрацював лише на 3 чашках Петрі, але була не велика зона пригнічення взросту.

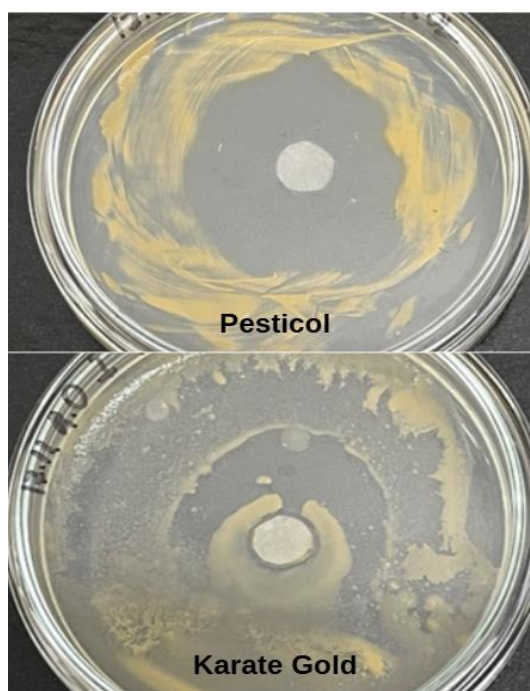


Рис.3.12. Зона пригнічення росту, на прикладі бактерії виду *Sphingomonas*, 10^{-3} (a) пестицидами Pesticol та Karate Gold*

*Джерело: виконано автором.

$10^{-3}(\text{б})$ *Streptomyces*

Дослідження виявило, що препарат Pesticol продемонстрував високу ефективність у пригніченні росту *Streptomyces*, тоді як Karate Gold проявив активність у трьох зразках, хоча його зона дії була досить обмеженою.

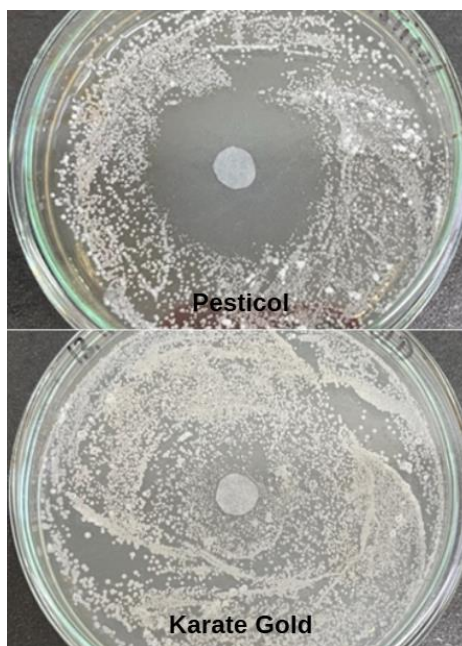


Рис.3.13. Зона пригнічення росту, на прикладі бактерії виду *Streptomyces* $10^{-3}(\text{б})$ пестицидами Pesticol та Karate Gold*

*Джерело: виконано автором.

Другий зразок ґрунту, біля автомобільної дороги

10^{-4} *Micrococcus*

Проведене дослідження продемонструвало, що бактерії виду *Micrococcus* володіють здатністю протистояти дії токсичних препаратів. Зокрема, під впливом пестициду Karate Gold на всіх чотирьох чашках Петрі не було зафіксовано пригнічення росту мікроорганізмів. У той же час пестицид Pesticol, який характеризується вищою концентрацією активної речовини, проявив ефективність лише на двох із чотирьох чашок, однак зона його дії була обмеженою.

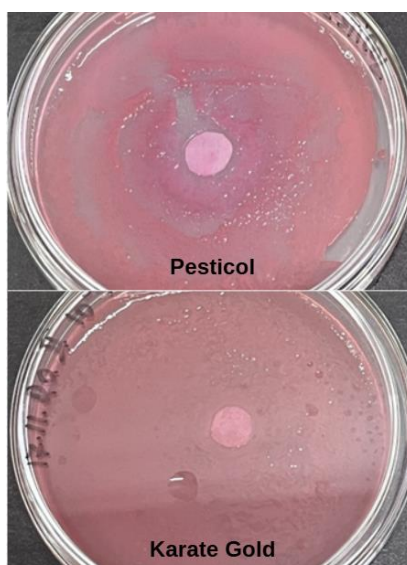


Рис.3.14. Зона пригнічення росту, на прикладі бактерії виду *Micrococcus* 10^{-4} пестицидами Pesticol та Karate Gold*

*Джерело: виконано автором.

10^{-5} *Bacillus(a)*

Дослідження виявило, що Pesticol значно стримував ріст *Bacillus* у чотирьох чашках Петрі, тоді як Karate Gold продемонстрував ефективність у трьох чашках, хоча і менш виразну.

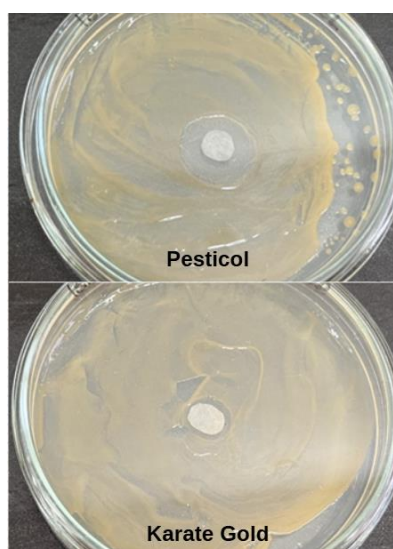


Рис.3.15. Зона пригнічення росту, на прикладі бактерії виду *Bacillus* 10^{-5} пестицидами Pesticol та Karate Gold*

*Джерело: виконано автором.

Третій зразок ґрунту, квітник

10^{-3} *Bacillus*(б)

Результати свідчать про те, що ця ґрунтова бактерія *Bacillus* була відносно стійкою до пестициду Karate Gold. Це підтверджується тим фактом, що пригнічення росту спостерігалось лише в одній чашці Петрі і з обмеженим радіусом дії. З іншого боку, Pesticol був більш ефективним, пригнічуючи ріст у всіх протестованих чашках, але також з невеликим радіусом дії.



Рис.3.16. Зона пригнічення росту, на прикладі бактерії виду *Bacillus* 10^{-3} пестицидами Pesticol та Karate Gold*

*Джерело: виконано автором.

10^{-4} *Bacillus*(в)

За результатами дослідження, ґрунтові бактерії *Bacillus* є стійкими до пестициду Karate Gold, у всіх досліджених чашках не було виявлено пригнічення дорослих особин, але у всіх чашках Петрі спостерігалось сильне пригнічення пестицидом Pesticol з великими колами пригнічення.



Рис.3.17. Зона пригнічення росту, на прикладі бактерії виду *Bacillus* 10^{-4} пестицидами Pesticol та Karate Gold*

*Джерело: виконано автором.

Після вирощування мікроорганізмів виміряли відстань зон пригнічення росту за допомогою лінійки. Результати представлені в таблиці № 3.3.

Таблиця 3.3.

Величина зон пригнічення росту під впливом пестицидів для досліджуваних мікроорганізмів*

№ зразків ґрунту		Розмір зони пригнічення росту, mm	
		Pesticol	Karate Gold
Ліс	10^{-3} (a) <i>Sphingomonas</i>	40	11
		35	10
		35	12
		36	-
	10^{-3} (б) <i>Streptomyces</i>	35	3
		48	20
		45	12

Продовження таблиці 3.3.

		43	-
Біля дороги	10^{-4} <i>Micrococcus</i>	-	-
		10	-
		15	-
		-	-
	10^{-5} <i>Bacillus</i> а	27	11
		25	10
		26	20
		21	-
Квітник	10^{-3} <i>Bacillus</i> б	17	-
		12	10
		14	-
		10	-
	10^{-4} <i>Bacillus</i> в	43	-
		32	-
		40	-
		15	-

*Джерело: розроблено автором.

На основі даних з таблиці 3.3 було розраховано середнє значення для кожного досліджуваного мікроорганізму та побудовано графік зображений на рисунку 3.18.

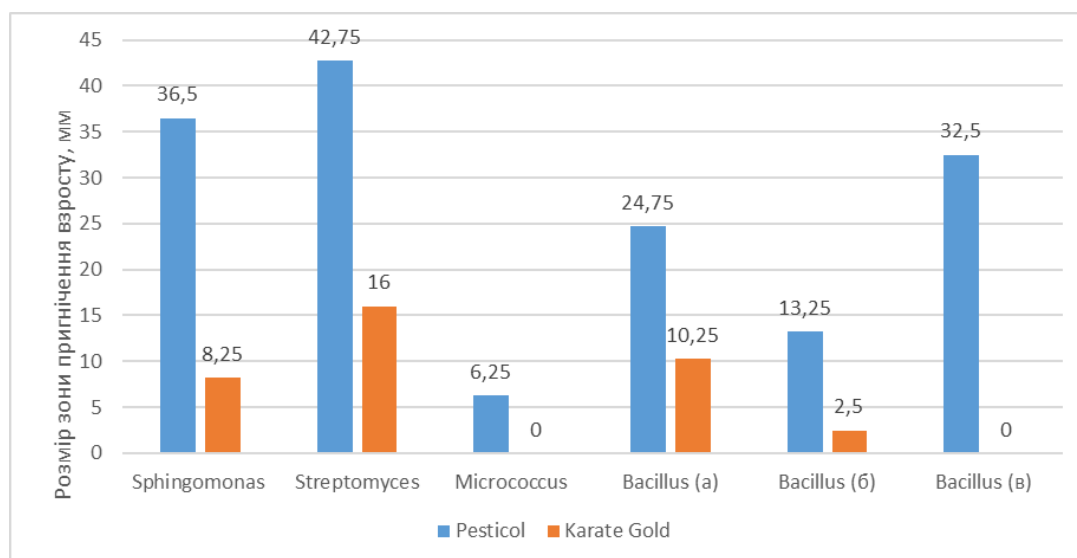


Рис. 3.18. Порівняння впливу пестицидів Pesticol і Karate Gold на бактерії ґрунту*

Джерело: розроблено автором.

Детальний аналіз графіка, представленого на рисунку 3.18, наведено в підрозділі висновків (пункт 3).

3.3. Екологічний аналіз впливу пестицидів методом мінімальної інгібуючої концентрації (МІК) на бактерії *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus*, *Micrococcus*

Мінімальна інгібуюча концентрація (МІК) вибраних пестицидів була визначена для досліджуваних штамів бактерій шляхом послідовних розведень в живильному бульйоні. Метою було встановлення найнижчої концентрації кожного пестициду, яка інгібувала видиме зростання тестованих культур. Присутність мікроорганізмів спостерігалася шляхом струшування пробірки на світлі.

На основі отриманих даних було отримано наступні результати:

Sphingomonas 10^{-3} :

1.Pesticol – бактерії були видимі в пробірках 3, 4 і 5 та відсутні в пробірках 1, 2. Отже, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 8 мкг/мл.

2.Karate Gold – через низьку концентрацію цього пестициду бактерії були помітні у всіх пробірках, окрім першої. Таким чином, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 2 мкг/мл. Помітна зміна забарвлення білийону на жовтий відтінок.

Streptomyces 10⁻³:

1.Pesticol – бактерії були видимі в пробірках 4 і 5 і відсутні в пробірках 1, 2, 3. Отже, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 16 мкг/мл. Присутність мікроорганізмів спостерігали, струшуючи пробірку на світлі. У пробірці 5 спостерігалось сильне помутніння, видиме неозброєним оком.

2.Karate Gold – через низьку концентрацію цього пестициду бактерії були помітні у всіх пробірках, окрім першої. Таким чином, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 2 мкг/мл. Зміна кольору не спостерігалася, а присутність бактерій була помітна при струшуванні пробірки.

Micrococcus 10⁻⁴:

1.Pesticol – бактерію було виявлено в усіх пробірках, окрім першої, тому мінімальна інгібуюча концентрація цього пестициду становить 2 мкг/мл. Перша пробірка змінила колір через зелений відтінок пестициду. Бактерія стала рожевою, що підтверджує наявність мікроорганізму в живильному бульйоні.

2.Karate Gold – завдяки високій стійкості бактерій до пестициду та низькій концентрації препарату, мікроорганізм був присутній у кожній пробірці. У всіх пробірках колір бульйону змінився зі світло-коричневого на рожевий.

Bacillus (a) 10⁻⁵:

1.Pesticol – бактерії були видимі в пробірках 3, 4 і 5 та відсутні в пробірках 1, 2. Отже, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 8 мкг/мл. У пробірці 5 була спостерігалось сильне помутніння.

2.Karate Gold – через низьку концентрацію цього пестициду бактерії були помітні у всіх пробірках, окрім першої. Таким чином, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 2 мкг/мл. Зміна кольору не спостерігалася, наявність помутніння живильного бульйону.

Bacillus (б) 10⁻³:

1.Pesticol – бактерії були видимі в пробірках 2, 3, 4 і 5 і відсутні лише в першій пробірці. Отже, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 2 мкг/мл. Зміна кольору не спостерігалася, а присутність бактерій була помітна через помутніння живильного бульйону.

2.Karate Gold – через низьку концентрацію цього пестициду бактерії були помітні у всіх пробірках окрім 1. Таким чином, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 2 мкг/мл. Помутніння бульйону.

Bacillus (в) 10⁻⁴:

1.Pesticol – бактерії були видимі в пробірках 3, 4 і 5 і відсутні в пробірках 1, 2. Отже, мінімальна інгібуюча концентрація для цього пестициду становить 8 мкг/мл. Відтінок середовища змінився на світло рожевий у 5 пробірці.

2.Karate Gold – через низьку концентрацію цього пестициду бактерії були помітні у всіх пробірках. Зміна кольору на світло рожевий.



Рис.3.19. Наявність бактерій *Streptomyces* у розчині живильного бульйону та пестициду Karate Gold у співвідношенні 1:32*

Джерело: виконано автором.

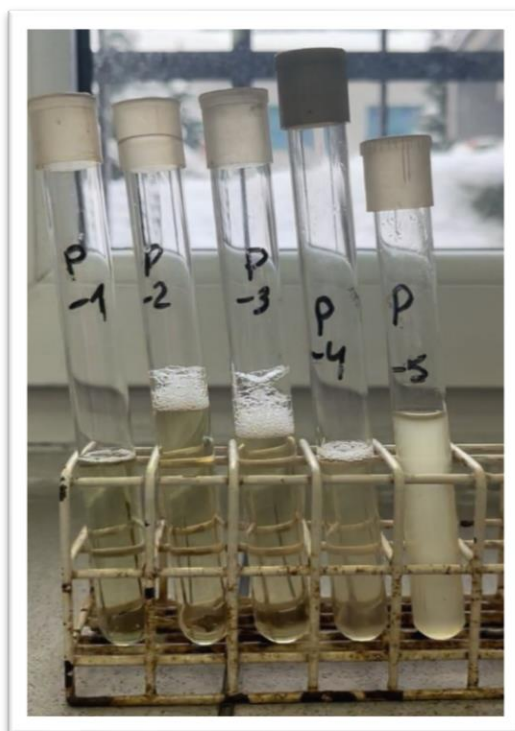


Рис.3.20. МІК над бактерією *Streptomyces* $10^{-3}(b)$ з пестицидом Pesticol*
Джерело: виконано автором.

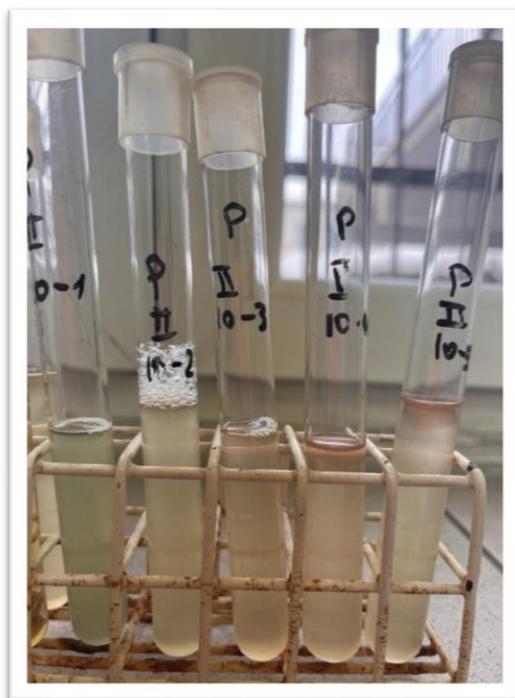


Рис.3.21. МІК над бактерією *Micrococcus* 10^{-4} з пестицидом Karate Gold*
Джерело: виконано автором.

ВИСНОВКИ

1. Пестициди знаходять широке застосування, проте їхня стійкість і токсичність стають причиною забруднення ґрунту, води та повітря. Вони негативно впливають на мікрофлору ґрунту, порушують біохімічні процеси та створюють загрозу для здоров'я людей і тварин. Тому їх використання потребує ретельного контролю та дотримання екологічно обґрунтованих методів.

Механізм дії пестицидів пов'язаний із взаємодією з ферментами, рецепторами або клітинними структурами шкідників. Наприклад, інсектициди впливають на нервову систему, гербіциди порушують процеси фотосинтезу й синтезу амінокислот, а фунгіциди пригнічують клітинні функції грибів. Ефективність їхньої дії залежить від дози, однак тривале застосування може призводити до формування стійких штамів.

Очищення ґрунтів від пестицидів здійснюється за допомогою хімічних і біологічних методів. Хімічні методи базуються на сорбції та екстракції забруднень, тоді як біологічні зосереджені на фіторе mediaції й залученні мікроорганізмів. Комбіноване застосування цих підходів дозволяє досягти більш ефективного відновлення екосистем ґрунту.

2. У ході роботи було розглянуто ключові методи виділення та підрахунку мікроорганізмів: серійні розведення, метод Дригальського, визначення кількості колонієутворюючих одиниць (КУО) та штрихові посіви. Ці підходи дозволяють точно встановити чисельність мікрофлори в ґрунті, ізолювати окремі колонії та отримати чисті культури для подальших досліджень. Їх використання сприяє оцінці впливу хімічних речовин, зокрема пестицидів, на життєздатність і активність бактерій. Отже, наведені методи є ефективними для мікробіологічного аналізу та забезпечують достовірність отриманих результатів.

Основним методом ідентифікації у дослідженні було фарбування за Грамом, яке дозволило розподілити бактерії на грампозитивні та грамнегативні, що є важливим для подальшої оцінки їх стійкості до хімічних речовин, вибору середовищ культивування та аналізу морфологічних ознак. Застосування цього

методу забезпечило можливість визначення типових характеристик виділених штамів (*Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus*, *Micrococcus*) та їх подальшого використання в експерименті. Отже, метод Грама є базовим, інформативним та ефективним інструментом ідентифікації бактеріальних культур.

Для визначення токсичності пестицидів використовували метод Дригальського та метод мінімальної інгібуючої концентрації (МІК). Ці методи дозволили оцінити здатність Pesticol і Karate Gold пригнічувати ріст ґрунтових бактерій. Метод Дригальського чітко показав зони інгібування навколо фільтрувальних дисків з пестицидами, тоді як МІК забезпечив можливість кількісного визначення найменшої концентрації, яка припиняє ріст мікроорганізмів. Результати дослідження підтвердили відмінності у токсичності препаратів: Pesticol показав сильнішу інгібуючу дію, тоді як Karate Gold виявився менш агресивним до мікрофлори. Отже, застосовані методи є надійними для експериментальної оцінки токсичності та порівняння властивостей пестицидів.

3. Для проведення екологічного аналізу впливу пестицидів Pesticol та Karate Gold на ґрунтову мікрофлору ми відібрали різні види бактерій у трьох місцях: 1 – ботанічний заповідник «Воротинів», лісова зона; 2 – ділянка автомагістралі Е85 на вулиці Окружній, 37; 3 – квітник біля гуртожитку № 2 університету на вулиці Винниченка, 22.

За результатами дослідження, найменша кількість мікроорганізмів, придатних для підрахунку, була виявлена в районі поблизу дороги (№ 2). Однак у лісовій зоні (№ 1) та у квітнику (№ 3) було виявлено надмірне зростання мікробних колоній, що не дозволило провести їх кількісну оцінку, що підтверджується високими значеннями КУО/мл. Ця різниця може бути пов'язана з впливом таких факторів, як рівень забруднення, інтенсивність дорожнього руху, характеристики ґрунту, клімат та активність тварин.

Дослідження показало, що різні види ідентифікованих бактерій, а саме *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Micrococcus*, *Bacillus*, мають різну чутливість до

токсичної дії пестицидів Pesticol і Karate Gold. Різна чутливість бактерій до пестицидів може призвести до змін у складі мікробіоценозу ґрунту.

По-перше, різні види бактерій мають різну чутливість до пестицидів, причому *Bacillus* (б) з місця 3 і *Micrococcus* є найбільш стійкими до обох речовин. Крім того, *Sphingomonas* і *Streptomyces* продемонстрували більшу чутливість до обох пестицидів, тоді як *Bacillus* (в) з місця 3 був найбільш чутливим до Pesticol, а у випадку Karate Gold не відбулося жодного інгібування. Збільшення концентрації пестицидів призводить до збільшення розміру бактеріальної зони інгібування росту, що викликає прототоксичний вплив цих речовин на мікроорганізми. В цілому, Pesticol був більш токсичним для бактерій у концентраціях, рекомендованих виробником, хоча його склад є більш сприятливим для навколишнього середовища.

Аналіз МІК показав, що Pesticol був набагато ефективнішим у пригніченні росту досліджуваних бактерій, оскільки для більшості штамів його мінімальна інгібуюча концентрація становила 2–8 мкг/мл, тоді як *Streptomyces* продемонстрував найбільшу резистентність (МІК 16 мкг/мл). На відміну від цього, Karate Gold майже не пригнічував ріст мікроорганізмів: у більшості випадків бактерії були присутні у всіх пробірках, крім першої, що свідчить про дуже низьку чутливість мікробів до цього препарату і слабку антимікробну дію. Додаткові ознаки, такі як каламутність і зміна кольору бульйону, підтверджують активний ріст бактерій навіть у присутності Karate Gold, тоді як у випадку з Pesticol ріст пригнічувався набагато сильніше.

Ці результати вказують на негативний вплив застосування пестицидів на досліджувані мікроорганізми, що може спричинити порушення в екосистемі. Врахування впливу пестицидів на мікрофлору має величезне значення при розробці стратегії захисту культур, щоб забезпечити збалансоване використання хімічних засобів захисту.

Дослідження можуть сприяти кращому розумінню взаємодії між пестицидами та мікроорганізмами в ґрунті, що важливо для збалансованого управління природним середовищем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головка В., Мешкова В., Злотін А. Сільськогосподарська екологія. Харків: Еспада, 2009. 624 с.
2. Іваненко О., Носачова Ю. Техноекологія. Київ: Кондор, 2017. 294 с.
3. Лавринюк З.В., Караїм О.А., Рабан О.Ю., Караїм В.П. Вплив пестицидів на ґрунтову мікрофлору в контексті сталого використання природних ресурсів. *Людина та довкілля. Питання неоекології*. 2025. № 43. С.156–162.
4. Мислюк О. Основи хімічної екології. Київ: Кондор, 2015. 660 с.
5. Моклячук Л., Ліщук А., Матусевич Г. Еколого-економічні засади ремедіації забруднених пестицидами ґрунтів. *Екологічний Вісник*. 2013. № 81. С. 20–21.
6. Приготування послідовних розведень. *StudFiles*. URL: <https://studfile.net/preview/1582556/page:10/> (дата звернення: 11.05.2024).
7. Промислова екологія: навчальний посібник / Я. Бедрій та ін. Київ: Кондор, 2016. 374 с.
8. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 р. № 1264-XII. *Рада*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення: 10.09.2025).
9. Рабан О., Лавринюк З. Вплив пестицидів Pestiscol та KarateGold на ґрунтову мікрофлору. *Актуальні проблеми розвитку природничих та гуманітарних наук: матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, студентів та аспірантів, м. Луцьк, 14 лист. 2024 р. Луцьк, 2024*. С. 427–430.
10. Рабан О., Лавринюк З. Вплив пестицидів на активність бактерій *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus* та *Micrococcus* у ґрунті. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: збірник матеріалів X Міжнар. конгресу, м. Львів, 27–28 берез. 2025 р. Львів, 2025. С. 164–165.

- 11.Рабан О., Лавринюк З.В. Екологічний аналіз впливу пестицидів на мікрофлору ґрунту. Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень: матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Луцьк, 15 трав. 2024 р. Луцьк, 2024. С. 1096–1110.
- 12.Azzouz A. Pesticides and removal approaches. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/pesticides-and-removal-approaches-1pqmayc8u5> (date of access: 01.10.2025).
- 13.Baker S., Vinayaka A.C., Manonmani H.K., Thakur M.S. Development of dipstick-based immuno-chemiluminescence techniques for the rapid detection of dichlorodiphenyltrichloroethane. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/development-of-dipstick-based-immuno-chemiluminescence-2w5naysw79> (date of access: 01.11.2024).
- 14.Balasubramanian A. Soil Microorganisms, University of Mysore. 2017. URL: https://www.researchgate.net/profile/A-Balasubramanian/publication/314499993_Soil_Microorganisms/links/58c2c60ca6fdcce648de29ee/Soil-Microorganisms.pdf (date of access: 01.09.2025).
- 15.Berndt M.P. Does diazinon pose a threat to a neighborhood stream in Tallahassee. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/does-diazinon-pose-a-threat-to-a-neighborhood-stream-in-2tyn7c0hpc> (date of access: 01.09.2025).
- 16.Blair D. Seryjne rozcieńczanie w mikrobiologii. *Journal of microbiology & biology education*. 2012. Vol. 13 (2).
- 17.Calugaru I. L., Neculita C. M., Genty T. Metals and metalloids treatment in contaminated neutral effluents using modified materials. *PMC PubMed*. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29428649/> (date of access: 08.02.2025).
- 18.Casida J. E. Pest Toxicology: The Primary Mechanisms of Pesticide Action. *Chemical Research in Toxicology*. 2009. Vol. 22 (4). P. 609–619.
- 19.Chapman H.D. Cation-exchange capacity. *American Society of Agronomy Inc*. 1965. Vol. 9. P. 891–901.

20. Dick, R. Lecture on Soil Bacteria in Soil Microbiology: lecture. Columbus, OH: The Ohio State University, School of Environment and Natural Resources, 2009.
21. Djadouni F. Effects of the herbicide glyphosate [n-(phosphonomethyl) glycine] on biodiversity and organisms in the soil. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/effects-of-the-herbicide-glyphosate-n-phosphonomethyl-1bj4zuqo> (date of access: 30.06.2025).
22. Frey-Klett P., Garbaye J., Tarkka M. The mycorrhiza helper bacteria revisited. *New Phytologist*. 2007. Vol. 176(1). P. 22–36.
23. Gagelidze N., Amiranashvili L., Sadunishvili T., Kvesitadze G., Urushadze T., Kvrivishvili T. Bacterial composition of different types of soils of Georgia. *Annals of Agrarian Science*. 2018 Vol. 16. P. 17–21.
24. Grzesiak M., Kuczyńska M. Metody badania mikroorganizmów w próbkach środowiskowych. Warszawa : PWN, 2010. 372 p.
25. Gurfinkel E., Shmueli Y. Process to prepare diazinon. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/process-to-prepare-diazinon-4enq6hrpcu> (date of access: 08.07.2020).
26. Gurjar N., Sanjay S., Telkar G. S., Meena K. N., Kamal K., Kumar R. Soil Biological Properties and Their Importance in Agricultural Production. *Biomolecule Reports – An International eNewsletter*. 2017. Vol. 3. P. 1–4.
27. Jenkins A. Soil fungi. New South Wales: Department of Primary Industries, 2005. 4 p.
28. Jones M., Netterville J., Johnston D., Wood J., Joesten M.. Chemistry and Society. New York: Saunders College Publishing, 1987. P. 491-519.
29. Lishchuk A., Parfenyk A., Horodyska I. Environmental risks of the pesticide use in agroecosystems and their management. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/environmental-risks-of-the-pesticide-use-in-agroecosystems-and-2i089y7b> (date of access: 01.03.2025).
30. Brown S., Biswas A., Caron J., Dyck M., Si B. Soil Physics. *Geosciences LibreTexts*. URL: <https://geo.libretexts.org/Bookshelves/>

- Soil_Science/Digging_into_Canadian_Soils:_An_Introduction_to_Soil_Science/01:_Digging_In/1.04:_Soil_Physics (date of access: 15.11.2024).
31. Lushchak V.I., Matviishyn T.M., Husak V.V., Storey J.M. Pesticide toxicity: a mechanistic approach. *PMC PubMed Central*. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6295629/> (date of access: 08.11.2024).
 32. Lowenfels J., Lewis W. Teaming with Microbes: A Gardener's Guide to the Soil Food Web. Portland: Timber Press, 2006. 220 p.
 33. Magdoff F., Van Es H. Building Soils for Better Crops. Sustainable Soil Management. Waldorf: Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) program, 2009. 294 p.
 34. Kumar M., Kumar V., Prasad R. Mobilization of Micronutrients by Mycorrhizal Fungi. *Function, Diversity, State of the Art*. 2017. Vol. 4. P.9–26.
 35. Mode of action of pesticides and the novel trends: critical review. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*. 2013. Vol. 3 (11). P. 393–401.
 36. Ocspp. Atrazine – Background and Updates. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/atrazine-background-and-updates-351th27yav> (date of access: 25.08.2025).
 37. Oultaf L. Environmental and health risks of pesticide use practices by farmers in the region of Tizi-Ouzou (northern Algeria). *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/environmental-and-health-risks-of-pesticide-use-practices-by-3n xm9s7h> (date of access: 09.03.2025).
 38. Parthasarathi R. Advances in microbial and enzymatic degradation of lindane at contaminated sites. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/advances-in-microbial-and-enzymatic-degradation-of-lindane-zbpbvfr3> (date of access: 01.08.2025).
 39. Perry A. The Organochlorine Insecticides. *SCISPACE*. URL: https://typeset.io/papers/the-organochlorine-insecticides_3y2eznwl78 (date of access: 10.08.2025).

40. Prudnikova S. V., Streltsova N. V., Volova T. G. The effect of the pesticide delivery method on the microbial community of field soil. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/the-effect-of-the-pesticide-delivery-method-on-the-microbial-4ih75fmgy1> (date of access: 01.02.2025).
41. Rajmohan K. S., Chandrasekaran R., Varjani S. A Review on Occurrence of Pesticides in Environment and Current Technologies for Their Remediation and Management. *Indian J Microbiol.* 2020. Vol. 60 (2). P. 125–138.
42. Ruba U. B., Kakon C. Environmental Pollution from Injudicious Application of Pesticides: Bangladesh Context. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/environmental-pollution-from-injudicious-application-of-w4k278st> (date of access: 17.03.2025).
43. Reid G., Wong P. Soil bacteria, Soil biology basics. New South Wales: State of New South Wales Department of Primary Industries, 2005.
44. Sim J., Drigo B. Impact of twenty pesticides on soil carbon microbial functions and community composition. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/impact-of-twenty-pesticides-on-soil-carbon-microbial-2fxqb455> (date of access: 06.08.2025).
45. Streletskii R., Astaykina A. Effects of the pesticides benomyl, metribuzin and imidacloprid on soil microbial communities in the field. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/effects-of-the-pesticides-benomyl-metribuzin-and-1uh3imzh> (date of access: 29.06.2025).
46. Streletskii R. Changes in Bacterial and Fungal Community of Soil under Treatment of Pesticides. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/changes-in-bacterial-and-fungal-community-of-soil-under-srb1kd4t> (date of access: 05.01.2025).
47. Tessema R., Nagy K., Balázs Á. Occupational and environmental pesticide exposure and associated health risks among pesticide applicators and non-applicator residents in rural Ethiopia. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/occupational-and-environmental-pesticide-exposure-and-1s65v7if> (date of access: 07.08.2025).

48. Teotia P., Kumar M., Prasad R., Kumar V., Tuteja N., Varma A. (2017) Mobilization of Micronutrients by Mycorrhizal Fungi. *Mycorrhiza - Function, Diversity, State of the Art. Springer*. 2017. Vol. 4. P. 9–26.
49. The mycorrhiza helper bacteria revisited. *PubMed*. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17803639/> (date of access: 15.02.2025).
50. Yu-Min Cui. Data from Disruption of Autophagy at the Maturation Step by the Carcinogen Lindane Is Associated with the Sustained Mitogen-Activated Protein Kinase/Extracellular Signal–Regulated Kinase Activity. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/data-from-disruption-of-autophagy-at-the-maturation-step-by-6ldqjcx1> (date of access: 30.03.2025).
51. Yushchenko D. Method for producing n-(phosphonomethyl)-glycine. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/method-for-producing-n-phosphonomethyl-glycine-4new88xkm8> (date of access: 05.09.2025).
52. Fujin Z. Dichlorodiphenyltrichloroethane degrading bacterium as well as culturing method and application thereof. *SCISPACE*. URL: <https://typeset.io/papers/dichlorodiphenyltrichloroethane-degrading-bacterium-as-well-3iq87sub1n> (date of access: 16.11.2025).