

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ АГРОБІОЛОГІЧНИЙ**

УДК 633.445.4:633.34

«ПОГОДЖЕНО»

Декан агробіологічного
факультету

_____ В.П. Коваленко

« » _____ 2025 р.

«ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

грунтознавства та охорони ґрунтів
ім. проф. М. К. Шикולי

_____ Р.П. Богданович

« » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

« Вплив гербіцидів на біогенність чорнозему типового »

Спеціальність 201 «Агрономія»

Освітня програма «Агрономія»

Магістерська програма Агрохімія і ґрунтознавство

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

д. с.-г. наук, професор _____ В.О.Забалуєв

Керівник магістерської роботи

д. с.-г. наук, с. н. с. _____ Т.М. Мельничук

Виконав

_____ К.А. Баранов

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ФАКУЛЬТЕТ АГРОБІОЛОГІЧНИЙ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ґрунтознавства
та охорони ґрунтів ім.проф.М.К.Шикули

к. с.-г. наук, доцент, _____ Р. П. Богданович

« » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ
РОБОТИ**

Баранову Костянтину Андрійовичу

Спеціальність 201 «Агрономія»

Освітня програма «Агрономія»

Магістерська програма Агрохімія і ґрунтознавство

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Вплив гербіцидів на біогенність чорнозему типового», затверджена наказом ректора НУБіП України від 18.09.2025р. № 1960 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 11.11.2025 р.

Вихідні дані до магістерської роботи: виконав у відділі мікробіологічних досліджень Української лабораторії якості і безпеки агропромислового комплексу НУБіП України

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

Дата видачі завдання 02.06.2025 р.

Завдання прийняв до виконання _____ К.А. Баранов

Керівник магістерської роботи

д. с.-г. наук, с. н. с.

Мельничук

_____ Т.М.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Вплив гербіцидів на біогенність чорнозему типового» містить 40 сторінок друкованого тексту, 8 таблиць, 1 рисунок, 40 джерел літератури.

Об'єкт досліджень – зміни чисельності основних таксономічних, фізіологічних та еколого-трофічних груп мікроорганізмів за внесення гербіцидів (діюча речовина): ацетохлор, 900 г/л, клопіралід, 300 г/л, бентазон, 480 г/л, пропізохлор, 720 г/л в умовах чорнозему типового, темно-сірого та ясно-сірого ґрунтів.

Предмет досліджень – реакція мікроорганізмів чорнозему типового, темно-сірого та ясно-сірого ґрунтів на внесення різних за діючою речовиною гербіцидів.

Мета досліджень – дослідити вплив гербіцидів на кількісні та якісні характеристики мікробних ценозів чорнозему типового, темно-сірого та ясно-сірого ґрунтів.

Завдання досліджень – дослідити вплив різних за діючою речовиною гербіцидів на ґрунтову мікробіоту та біологічну активність ґрунтів.

Методи досліджень – мікробіологічні дослідження проведені згідно загальноприйнятих у ґрунтовій мікробіології методик в умовах модельних дослідів. Вплив гербіцидів на біомасу ґрунтових мікроорганізмів оцінювали за ДСТУ ISO 14240-2:2003, на зміни нітрифікаційної здатності визначали за ДСТУ ISO 14238:2003 та ДСТУ 4729:2007.

Результати досліджень свідчать про те, що гербіциди за дотримання агрохімічних регламентів не чинять критичного негативного впливу на біогенність чорнозему типового, однак у менш гумусованих сірих ґрунтах їхня дія може спричинити деградаційні зміни мікробної біоти.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ҐРУНТ, ГЕРБИЦИД, ҐРУНТОВІ МІКРООРГАНІЗМИ,
БІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ, БІОГЕННІСТЬ, НІТРИФІКУЮЧА
ЗДАТНІСТЬ.

ЗМІСТ

<i>РЕФЕРАТ</i>	5
<i>ВСТУП</i>	9
<i>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ</i>	13
1.1 Поняття біогенності ґрунту та її значення	13
1.2. Біологічна активність чорноземів типових як показник родючості.....	14
1.3. Мікробна біомаса та її роль у кругообігу речовин	16
1.4 Гербіциди як фактор антропогенного впливу на мікробну біомасу	18
1.5 Вплив гербіцидів на природне середовище	19
<i>РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ</i>	27
2.1 Характеристика ґрунтів:	27
2.2 Визначення чисельності мікроорганізмів основних таксономічних та еколого-трофічних груп:.....	28
2.3 Склад та характеристика поживних середовищ	28
2.4 Підготовка ґрунту і постановка дослідів:.....	29
2.5 Місце проведення досліджень:	30
2.6 Статистична обробка результатів.....	31
2.7 Державні стандарти:	31
<i>Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА</i>	32
3.1 Вивчення впливу гербіцидів на мікробні ценози ґрунтів	32
3.2 Дослідження впливу гербіцидів на чисельність мікроміцетів	35
3.3 Дослідження впливу гербіцидів на мікробну біомасу.....	36
3.4 Вивчення впливу гербіцидів на потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту	38
<i>ОХОРОНА ПРАЦІ</i>	44
4.1 Вимоги безпеки при роботі з гербіцидами	44

4.2 Пожежна та електробезпека.....	45
4.3 Організаційні заходи з охорони праці	45
4.4 Висновки	45
<i>ВИСНОВКИ.....</i>	<i>47</i>
<i>Список використаної літератури</i>	<i>49</i>

ВСТУП

Ґрунт є одним із найважливіших компонентів біосфери, який забезпечує життя на Землі. Він виконує ключові екологічні, біогеохімічні та господарські функції: накопичує і трансформує органічну речовину, регулює кругообіг поживних елементів, слугує середовищем для розвитку мікроорганізмів, рослин і тварин, а також є основою аграрного виробництва [8]. Здатність ґрунту підтримувати свою родючість і екологічну рівновагу визначається передусім рівнем його біогенності - сукупністю показників, що характеризують активність ґрунтової мікробіоти, ферментативну активність, інтенсивність дихання, здатність до самоочищення та відновлення органічної речовини [4].

Одним із найбільш цінних типів ґрунтів України є чорнозем типовий, який поширений у лісостеповій зоні та відзначається високим умістом гумусу (5–6 %), сприятливою структурою, водопроникністю і багатим мікробіологічним комплексом. Проте в останні десятиліття, у зв'язку з інтенсифікацією землеробства, цей унікальний природний ресурс зазнає значного антропогенного навантаження. Активне застосування мінеральних добрив, засобів хімічного захисту рослин і важкої техніки призводить до деградації ґрунтів, порушення їхньої мікробіологічної рівноваги, зниження активності біохімічних процесів і, як наслідок, втрата біогенності [20].

Серед факторів, що найбільше впливають на стан мікробіоценозу, важливе місце посідають гербіциди - хімічні сполуки, призначені для знищення бур'янів. На сьогодні їхнє використання є невід'ємним елементом сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур. У більшості агросистем гербіциди забезпечують ефективний контроль бур'янової рослинності, підвищують урожайність та зменшують витрати ручної праці. Проте тривале і надмірне їх застосування має низку

негативних наслідків. Потрапляючи у ґрунт, гербіциди можуть змінювати чисельність і видовий склад мікроорганізмів, пригнічувати ферментативну активність, порушувати азотний, вуглецевий і фосфорний обміни, що в підсумку призводить до зниження родючості.

Механізм дії гербіцидів у ґрунтовому середовищі складний і багатогранний. Вони можуть адсорбуватися на часточках ґрунту, розкладатися мікроорганізмами або накопичуватися в гумусовому шарі, впливаючи на мікробні угруповання безпосередньо чи опосередковано. Відомо, що більшість гербіцидів, особливо ті, що містять діючі речовини з групи хлорацетамідів, триазинів, похідних сечовини, відзначаються високою стійкістю до біодеградації. Це може призводити до формування токсичного середовища для ґрунтових мікроорганізмів - ключових учасників процесів самоочищення ґрунту [34].

Мікроорганізми відіграють основну роль у формуванні біогенності чорноземів. Саме завдяки їхній діяльності відбувається мінералізація органічних решток, синтез гумусових речовин, мобілізація поживних елементів і підтримання структурно-агрегатного стану. Будь-яке втручання у цей складний біотичний комплекс, може призвести до дисбалансу мікробних процесів, порушення колообігу речовин і зниження біологічної активності ґрунту.

Дослідження останніх років показують, що навіть у незначних концентраціях гербіциди здатні змінювати кількісне співвідношення між різними трофічними групами мікроорганізмів - амоніфікаторами, нітрифікаторами, целюлозоруйнівними та фосфатмобілізувальними бактеріями. У деяких випадках спостерігається короткочасна активація мікробних процесів за рахунок використання гербіцидів як додаткового джерела вуглецю, проте згодом мікробна активність знижується. Це вказує на необхідність системного вивчення тривалого впливу гербіцидів на біологічний стан чорноземів [36].

В умовах сучасного землеробства проблема хімічного забруднення ґрунтів гербіцидами набуває дедалі більшої ваги. З одного боку, гербіциди залишаються ефективним і економічно вигідним засобом боротьби з бур'янами, а з іншого - вони становлять потенційну екологічну небезпеку для ґрунтових екосистем. Тому надзвичайно важливо виявити межі допустимого впливу гербіцидів на біогенність чорноземів, оцінити зміни мікробіологічних показників і розробити шляхи збереження їхньої екологічної стійкості.

Метою магістерської роботи є виявити вплив гербіцидів на кількісні та якісні характеристики мікробних ценозів чорнозему типового, темно-сірого та ясно-сірого ґрунтів.

Завданням магістерської роботи є дослідити вплив різних за діючою речовиною гербіцидів на ґрунтову мікробіоту та біологічну активність ґрунтів.

Об'єкт дослідження - зміни чисельності основних таксономічних, фізіологічних та еколого-трофічних груп мікроорганізмів за внесення гербіцидів (діюча речовина): ацетохлор, 900 г/л, клопіралід, 300 г/л, бентазон, 480 г/л, пропізохлор, 720 г/л в умовах чорнозему типового, темно-сірого та ясно-сірого ґрунтів.

Предмет дослідження - реакція мікроорганізмів чорнозему типового, темно-сірого та ясно-сірого ґрунтів на внесення різних за діючою речовиною гербіцидів.

Методи дослідження – в Українській лабораторії якості та безпеки продукції агропромислового комплексу НУБіП України проведені мікробіологічні дослідження згідно загальноприйнятих у ґрунтовій мікробіології методик в умовах модельних дослідів. Вплив гербіцидів на процеси трансформації Карбону оцінювали за біомасою ґрунтових мікроорганізмів відповідно до ДСТУ ISO 14240-2:2003 гідно керівних

принципів OECD № 217. Зміни нітрифікаційної здатності визначали за ДСТУ ISO 14238:2003 та ДСТУ 4729:2007, керуючись принципами OECD № 216.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Поняття біогенності ґрунту та її значення

Біогенність ґрунту - це сукупна характеристика, що відображає ступінь розвитку живої фази ґрунту, а також інтенсивність біохімічних процесів, які відбуваються під їхнім впливом. У найширшому розумінні біогенність трактується як потенціал ґрунту до саморегуляції, відновлення та забезпечення кругообігу речовин у біосфері. Вона визначається складом і активністю мікроорганізмів, найпростіших, актиноміцетів та грибів, що формують складну систему трофічних зв'язків [4].

Згідно з класичними уявленнями ґрунтознавства, біогенність є одним із найчутливіших індикаторів родючості ґрунтів. Вона відображає не лише кількість живих організмів, а й швидкість, з якою відбуваються основні біохімічні цикли. Саме мікробіота забезпечує перетворення органічної речовини, мінералізацію залишків, синтез гумусових сполук і стабілізацію структури ґрунтових агрегатів [27]

Висока біогенність притаманна переважно ґрунтам із розвиненим гумусовим горизонтом, сприятливим водно-повітряним режимом і достатнім забезпеченням органічним субстратом. Саме до таких належать чорноземи типові. У цих умовах формуються стійкі симбіотичні системи, де бактерії, гриби й актиноміцети забезпечують збалансований кругообіг елементів живлення.

Оцінку біогенності проводять за комплексом мікробіологічних показників, серед яких найінформативнішими є [6]:

- вміст мікробного вуглецю, що характеризує загальну біомасу мікроорганізмів;
- швидкість базального дихання - індикатор інтенсивності метаболізму;

- ферментативна активність (дегідрогеназа, каталаза, уреаза, фосфатаза), яка свідчить про функціональний стан мікробної спільноти;
- відношення C_{mic}/C_{org} як показник ступеня трансформації органічної речовини.

Біогенність є ключовим інтегральним параметром екологічної стійкості ґрунту. Зниження біогенності свідчить про деградаційні процеси - порушення структури мікробного ценозу, накопичення токсичних сполук, зменшення гумусоутворення [26].

Для чорноземів типових є актуальним збереження високого рівня біогенності, оскільки саме біологічна активність визначає їх гумусовий баланс і стійкість до деградаційних процесів. Біогенність чорноземів у сільськогосподарських угіддях знижується внаслідок тривалої хімізації, а також під впливом гербіцидів і пестицидів.

Зменшення біогенності ґрунтів відображається у сповільненні деструкції органічних решток, накопиченні фітотоксичних метаболітів, зниженні ферментативної активності й порушенні азотного циклу. Натомість, застосування органічних добрив, біопрепаратів, сидератів, мульчування та біоремедіаційних технологій сприяє зростанню мікробної біомаси й відновленню біологічного балансу.

Таким чином, біогенність є не лише показником родючості, а й критерієм екологічного здоров'я ґрунту, який визначає його здатність підтримувати продуктивність агроєкосистем, самовідновлення та опір до антропогенних навантажень.

1.2. Біологічна активність чорноземів типових як показник родючості

Біологічна активність є одним із найважливіших інтегральних показників родючості ґрунту, який відображає інтенсивність перебігу

біохімічних процесів, зумовлених життєдіяльністю мікроорганізмів, ґрунтової фауни та ферментних систем. Вона визначає здатність ґрунту трансформувати органічну речовину, підтримувати баланс елементів живлення й забезпечувати рослини доступними формами азоту, фосфору, сірки та інших біогенних елементів.

Біологічна активність оперативно реагує на будь-які антропогенні зміни - обробіток, удобрення, пестицидне навантаження, ущільнення, ерозію, забруднення важкими металами тощо. Саме тому визначення біологічної активності дає змогу оцінити не лише агрохімічну ефективність систем землеробства, а й потенційну стійкість ґрунтових екосистем до деградаційних процесів [3].

Чорноземи типові належать до найпродуктивніших ґрунтів України та Європи. Їм властивий високий вміст гумусу (4–6 %), насиченість катіонами кальцію і магнію, добре розвинена структура й оптимальний водно-повітряний режим. Основні трофічні групи - це амоніфікуючі, нітрифікуючі, целюлозоруйнівні, фосфатмобілізувальні мікроорганізми, актиноміцети та мікроміцети. Їх взаємодія забезпечує сталість вуглецевого й азотного циклів і сприяє накопиченню гумусових речовин.

Мікробіологічні процеси, що визначають біологічну активність чорноземів, охоплюють:

- мінералізацію органічних решток - розкладання білків, вуглеводів, лігніну під дією бактерій і грибів;
- гуміфікацію - синтез стабільних гумусових сполук актиноміцетами та грибами;
- азотфіксацію - перетворення атмосферного азоту на доступні сполуки завдяки азотфіксувальним бактеріям;
- нітрифікацію - окиснення амонійних сполук до нітратів нітрифікуючими бактеріями;

- ферментативну активність - роботу ферментів (уреаза, каталаза, дегідрогеназа, фосфатаза), що каталізують біохімічні реакції в ґрунті.

Інтенсивність цих процесів залежить від низки чинників: вологості, температури, рН, забезпеченості органічною речовиною та співвідношення вуглецю до азоту (C:N). Оптимальні умови для прояву біологічної активності у чорноземах - нейтральна або слабколужна реакція (рН 6,8–7,4) та достатній рівень доступного органічного вуглецю [22].

Біологічна активність тісно пов'язана з гумусним станом ґрунту: що вищий рівень гумусу, то інтенсивніше відбуваються мікробіологічні процеси. За тривалого застосування мінеральних добрив без внесення органіки активність мікроорганізмів поступово знижується, оскільки ґрунт втрачає джерело вуглецю. Натомість, органічні добрива, сидерація та біопрепарати сприяють зростанню чисельності мікроорганізмів і ферментативної активності, що підтримує родючість чорноземів.

Особливу увагу приділяють впливу пестицидів і гербіцидів, які, потрапляючи в ґрунт, можуть змінювати біохімічний баланс. Встановлено, що при дотриманні регламентів використання більшість гербіцидів чинить короточасний, зворотний ефект, однак за перевищення доз або за тривалого застосування відбувається пригнічення основних трофічних груп мікроорганізмів та порушення нітрифікаційних процесів.

1.3. Мікробна біомаса та її роль у кругообігу речовин

Мікробна біомаса є активною частиною органічної речовини ґрунту, яка визначає інтенсивність біогеохімічних процесів і трансформацію елементів живлення. Вона охоплює сукупність живих мікроорганізмів - бактерій, грибів, актиноміцетів, водоростей, найпростіших, що становлять від 1 до 5 % загального запасу органічного вуглецю та азоту ґрунту.

Незважаючи на відносно невелику частку, саме мікробна біомаса є головним регулятором гумусоутворення, мінералізації органічної речовини та біологічного кругообігу елементів [39].

Мікроорганізми є ключовою ланкою вуглецевого, азотного, фосфорного та сірчаного циклів. Вони розкладають органічні рештки, перетворюючи їх на доступні форми поживних речовин для рослин. Мікробна біомаса виконує роль динамічного резервуару елементів живлення, який швидко реагує на зміни температури, вологості, кислотності та надходження субстрату. Після відмирання клітин мікроорганізмів продукти їхнього розпаду (амінокислоти, полісахариди, фенольні сполуки) переходять у склад гумусових речовин, підвищуючи стійкість органічної частини ґрунту до мінералізації [25].

Особливе значення мікробна біомаса має у трансформації сполук азоту. Амоніфікуючі бактерії й гриби розкладають білки до амонійного азоту (NH_4^+), який потім окиснюється нітрифікуючими бактеріями до нітратів (NO_3^-). Паралельно азотфіксуючі мікроорганізми (*Azotobacter*, *Rhizobium*, *Clostridium*) перетворюють атмосферний азот на доступні сполуки. Рівновага між цими процесами визначає потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту, один з основних показників його біогенності.

У кругообігу фосфору важливу роль відіграють фосфатмобілізувальні бактерії (роду *Bacillus*, *Pseudomonas*), які переводять нерозчинні сполуки фосфатів у доступні форми. Таким чином, мікроорганізми підтримують рівновагу між органічними та мінеральними формами фосфору, сірки й кальцію, сприяючи сталому живленню рослин.

Мікробна біомаса бере участь і в самоочищенні ґрунту від токсикантів, зокрема пестицидів, важких металів і нафтопродуктів. Багато ґрунтових мікроорганізмів здатні до біодеградації токсичних сполук, тому

зміни мікробної біомаси є раннім індикатором порушення екологічного стану ґрунту.

1.4 Гербіциди як фактор антропогенного впливу на мікробну біомасу

Гербіциди - це пестициди, призначені для знищення небажаної рослинності (бур'янів) у посівах сільськогосподарських культур. Вони становлять найбільш чисельну групу агрохімікатів, що широко застосовуються в сучасних технологіях землеробства [37]. За хімічною природою гербіциди поділяють на хлоровані вуглеводні, триазини, похідні сечовини, фосфорорганічні, ацетаніліди, бензойні кислоти тощо.

Найпоширенішими в Україні є препарати на основі ацетохлору, метолахлору, клопіраліду, флорасуламу, гліфосату, які використовуються для контролю однорічних і багаторічних бур'янів у посівах кукурудзи, соняшнику, зернових культур [38]. Механізм їхньої дії полягає у порушенні фотосинтезу, синтезу білків, клітинного поділу або функціонування ферментативних систем рослин.

Потрапляючи в ґрунт, гербіциди вступають у складні фізико-хімічні взаємодії з органо-мінеральною матрицею, сорбуються колоїдами, частково мігрують у ґрунтовий розчин і можуть бути доступними для мікроорганізмів [29]. Саме ґрунт є головним депо, де відбувається трансформація гербіцидів шляхом абіотичних (гідроліз, окиснення, фотоліз) і біотичних процесів - передусім мікробіологічної деградації [32].

Мікроорганізми здатні як до деструкції, так і до часткового використання гербіцидів як джерела вуглецю, азоту або енергії. Однак надмірні дози чи тривале застосування цих препаратів можуть призводити до пригнічення ферментативної активності, зниження чисельності азотфіксувальних бактерій, актиноміцетів, мікроміцетів, порушення мікробної сукцесії та гумусоутворення [31].

Характер впливу гербіцидів визначається низкою чинників:

- хімічними властивостями діючої речовини (розчинність, леткість, стійкість до гідролізу);
- дозою та частотою внесення;
- фізико-хімічними характеристиками ґрунту (вміст гумусу, реакція середовища, гранулометричний склад);
- кліматичними умовами, які визначають швидкість розкладу й біодеградації.

У чорноземах типових завдяки високому вмісту гумусу, оптимальному аераційному режиму та насиченому мікробному ценозу спостерігається відносна стійкість до гербіцидного навантаження. Однак навіть у цих ґрунтах при надмірному використанні препаратів можливі деградаційні процеси - зниження біогенності, зменшення активності нітрифікуючих бактерій, порушення азотного циклу та накопичення токсичних метаболітів.

Таким чином, гербіциди, поряд із агрохімічною ефективністю, є важливим екологічним фактором, який впливає на функціонування ґрунтової біоти. Їхній вплив може бути як короткочасно стимулюючим, так і довготривало пригнічувальним, що визначає необхідність регламентованого застосування, оцінки залишкової токсичності та моніторингу мікробіологічних показників ґрунтової екосистеми [36].

1.5 Вплив гербіцидів на природне середовище

У зв'язку з активною хімізацією сільськогосподарського виробництва, що спричиняє значне забруднення природного середовища, ключовою умовою ефективного використання пестицидів та агрохімікатів є запобігання негативним наслідкам для біосфери. Пріоритет охорони здоров'я населення та захисту навколишнього середовища над

економічною вигодою від застосування хімічних засобів захисту рослин визначено як основний принцип державної політики відповідно до положень Закону України «Про пестициди і агрохімікати» [14].

Окремі пестициди, що використовуються для боротьби з хворобами, бур'янами та шкідниками сільськогосподарських культур, можуть чинити побічний вплив на ґрунтові мікроорганізми. Накопичуючись у ґрунтового середовищі, вони здатні пригнічувати або стимулювати розвиток як корисних мікроорганізмів, так і патогенних форм, які за звичайних умов не мають суттєвого значення. Пестициди можуть змінювати щільність популяцій окремих патогенів, впливати на захисні механізми рослин-господарів, а також порушувати взаємодію між мікоризоутворюючими організмами та кореневою системою рослин [35].

Ґрунтова мікробіота демонструє вибіркочувливість до гербіцидів. Хімічна обробка, як правило, призводить до загибелі чутливих до препарату видів мікроорганізмів, активізації стійких мутантних форм, а також мікроорганізмів, здатних використовувати гербіцид як джерело енергії. Це порушує екологічну рівновагу ґрунтової екосистеми, знижує її здатність до самоочищення, що зазвичай забезпечується послідовною зміною рас мікроорганізмів, і звужує спектр мікробіологічної активності як внаслідок прямої мікробіцидної дії, так і через зміну екологічних умов.

На основі численних вітчизняних та зарубіжних досліджень встановлено, що характер впливу гербіцидів на ґрунтові мікроорганізми залежить від багатьох чинників: дозування і хімічних властивостей препаратів, строків їх внесення, складу мікробіоти, типу ґрунту та кліматичних умов.

Гербіциди, які широко застосовуються у сільському господарстві, є постійним екологічним чинником, що впливає на життєдіяльність ґрунтових мікроорганізмів. У таких умовах аналіз змін у мікробних

угрупованнях ґрунту набуває особливого значення для еколого-агрономічної оцінки наслідків хімічних обробок.

Головним завданням ґрунтово-мікробіологічної оцінки застосування пестицидів є визначення меж, за якими відбувається порушення енергетичних потоків, кругообігу речовин та структурної організації мікробіоценозу [20]. Відповідно, обираються показники, що мають ключове значення у системі функціональних і структурних зв'язків мікроорганізмів з екологічної точки зору.

До таких показників належать:

- Енергетичні процеси: дихання ґрунту, рівень мікробної біомаси;
- Кругообіг речовин: нітрифікаційна та амоніфікаційна здатність, азотфіксація, мінералізація орґанофосфатів, ферментативна активність у циклах азоту, фосфору, вуглецю;
- Структура біоценозу: чисельність основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів;
- Санітарний стан: наявність патогенних форм, антибіотичний потенціал;
- Здатність до самовідродження: персистентність пестицидів, кінетика їх детоксикації.

Перші три групи показників мають еколого-агрономічне значення, останні дві - санітарно-гігієнічне. Їх використання дозволяє сформуванати чітке уявлення про зміни, що відбуваються у ґрунтовій біоті під впливом пестицидів [1].

Серед широкого спектра мікробіологічних та агрохімічних показників найбільш інформативними для оцінки впливу агрохімікатів на мікробний ценоз ґрунту є: дихальна активність, вміст вуглецю мікробної біомаси, чисельна динаміка фізіологічних груп мікроорганізмів, концентрація мінеральних форм азоту та рівень рН [2].

Вплив пестицидів на мікроорганізми ґрунту визначається низкою чинників: хімічними та токсикологічними властивостями діючої речовини, дозуванням, швидкістю розкладання, а також фізико-хімічними характеристиками ґрунту - вологістю, температурою, поглинаючою здатністю та окисно-відновним потенціалом. Залежно від цих параметрів, дія ксенобіотиків на мікробіологічні процеси (дихання, нітрифікацію, ферментативну активність) може бути позитивною, негативною або нейтральною. Наприклад, деякі пестициди пригнічують нітрифікацію, що спричиняє накопичення амонію, зменшення втрат азоту та скорочення викидів його летких форм - у такому випадку це розглядається як позитивний ефект. Натомість інгібування азотфіксації є негативним проявом [1].

Різні групи мікроорганізмів мають неоднакову чутливість до зовнішніх чинників і відіграють різну роль у біологічних процесах ґрунту. Зазвичай після внесення стандартних доз пестицидів спостерігається короткочасне пригнічення чутливих видів, однак через 2–3 місяці їх чисельність і активність повертаються до контрольного рівня. Якщо багаторічне застосування препарату не змінює склад мікрофлори та її функціональну активність, він вважається екологічно безпечним. Для зниження ризику токсичного навантаження рекомендується ротація пестицидів - використання препаратів з різними механізмами дії.

Більшість дослідників погоджуються, що короткочасне застосування гербіцидів у виробничих дозах або не має негативного впливу на мікрофлору, або цей вплив швидко компенсується завдяки буферним властивостям ґрунту та стійкості мікробних угруповань. Гербіциди чинять як прямий, так і опосередкований вплив: прямий - через ураження чутливих мікроорганізмів, опосередкований - через знищення бур'янів та зміну агротехнічних умов, що впливає на водно-повітряний режим і розподіл органічної речовини [1].

Загалом гербіциди пригнічують дихальну активність ґрунту, процеси нітрифікації, дегідрогеназну та уреазну активність. Водночас існують дані про стимулюючий ефект малих доз пестицидів на дихання ґрунту, що пов'язано з формуванням стійких мікробних угруповань з високою біомасою. Одноразове внесення пестицидів часто не впливає на активність ферментів, процеси денітрифікації, азотфіксації та розкладання целюлози. Аналогічні результати отримав К. Domsch [30], який дослідив вплив 71 пестициду на 25 ґрунтово-біологічних процесів. Найбільш чутливими до пестицидного навантаження виявилися фосфатазна активність, нітрифікація та розкладання органічної речовини.

Короткочасне застосування гербіцидів у виробничих дозах не викликає суттєвих змін у мікробоценозах орних ґрунтів. Водночас тривале систематичне використання гербіцидів призводить до зниження біологічної активності ґрунту та втрат гумусу. Причинами цього є як пряма токсична дія на чутливі мікроорганізми, так і опосередковані зміни. Зменшити або уникнути негативних наслідків можна шляхом внесення органічних добрив.

Встановлено, що різні таксономічні групи мікроорганізмів по-різному реагують на забруднювачі. Найбільш пригнічуються гриби, зокрема представники родів *Penicillium*, *Fusarium*, *Hemicola*, *Rhizoctonia*, *Phytium*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Trichoderma*. Серед бактерій найбільш стійкими до пестицидів є псевдомонади, корінебактерії, флавобактерії та агробактерії [33].

Внесення пестицидів у ґрунт призводить до пригнічення сапрофітної (зимогенної) мікрофлори та активізації автохтонної мікрофлори. Інгібуються також мікроорганізми, що використовують органічні та мінеральні форми азоту (*Spirillum*, *Azotobacter*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Cellulomonas*), актиноміцети та мікроміцети. Водночас у

більшості випадків застосування різних пестицидів стимулює розвиток автохтонних бактерій - представників родів *Nocardia*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Micromonospora*. Це пояснюється наявністю катаболітичних плазмід, які розширюють спектр метаболізованих субстратів. Виділення чистих культур цих мікроорганізмів свідчить про їх здатність до біодеструкції пестицидів [28].

Процеси самоочищення ґрунту від пестицидів реалізуються через фізико-хімічні (гідроліз, окиснення, фотоліз, сорбція, випаровування) та біологічні (мікробне розкладання, трансформація, акумуляція) механізми. Швидкість зникнення пестицидів із навколишнього середовища залежить від їхнього хімічного класу, концентрації, типу ґрунту, здатності до сорбції органо-мінеральними компонентами, мікробної біомаси та чисельності сапрофітних мікроорганізмів [24].

Існують мікроорганізми, здатні до деструкції пестицидів. Встановлено, що характер і швидкість детоксикації у дерново-підзолистому ґрунті визначаються структурою мікробоценозу. Ефективним способом прискорення цього процесу є внесення органічних субстратів, зокрема соломи зернових культур. У процесі її розкладання формується мікробний консорціум, основу якого складають мікроорганізми, що використовують продукти гідролізу целюлози та геміцелюлози як субстрат для деструкції пестицидів.

На основі наукових досліджень встановлено, що рівень мікробної біомаси може слугувати індикатором здатності ґрунту до самоочищення від пестицидів [36]. Крім того, показники базального та субстрат-індукованого дихання, які прямо залежать від мікробної біомаси, дозволяють оцінити швидкість розкладання пестицидів. Чим вищий рівень мікробної біомаси, тим інтенсивніше відбуваються процеси деградації хімічних речовин у ґрунті. Таким чином, градієнт мікробної біомаси відображає потенціал самоочищення ґрунтового середовища.

У лабораторних умовах, на спеціалізованих поживних середовищах, мікроорганізми здатні розкладати практично всі сучасні пестициди, включаючи високостійкі сполуки типу ДДТ. Проте в природному середовищі ці процеси відбуваються надзвичайно повільно або взагалі не активуються. Мікрокількість стійких пестицидів можуть зберігатися в ґрунті протягом тижнів, місяців, років і навіть десятиліть. Така стабільність пояснюється або відсутністю відповідних мікроорганізмів, або несприятливими умовами для реалізації їх метаболічного потенціалу.

Ускладнення процесу самоочищення пов'язане також із тим, що під дією мікроорганізмів та абіотичних чинників пестициди зазнають трансформацій, у результаті яких утворюються нові речовини з іншими фізико-хімічними властивостями, реакційною здатністю та біологічною активністю. Іноді ці продукти мають вищу токсичність, ніж вихідні речовини. Під дією ферментів вони можуть вступати в реакції між собою, утворюючи нові стабільні та токсичні сполуки. Прикладом таких процесів є конденсація похідних аніліну з утворенням азобензолів та інших високомолекулярних токсичних речовин [1].

У ґрунтах, забруднених токсичними речовинами, спостерігається не лише пригнічення росту культурних рослин, а й загибель корисних мікроорганізмів - азотобактера, целюлозорозкладаючих, бульбочкових та олігонітрофільних форм. Це призводить до порушення мікробного балансу та зміни співвідношення між окремими групами мікроорганізмів. Часто активізується фітопатогенна мікрофлора, яка пригнічує розвиток сапрофітів [16]. У зв'язку з цим особливого значення набуває оцінка змін у мікробному ценозі, що є ключовим чинником формування родючості ґрунту та відіграє роль у мінералізації і нейтралізації ксенобіотичних речовин.

Взаємодія пестицидів з мікроорганізмами не має чіткої закономірності. Реакція мікробної спільноти, пригнічення або стимуляція,

залежить не лише від хімічної природи препарату, а й від його концентрації, поєднання з мінеральними добривами, типу вирощуваної культури, ґрунтово-кліматичних умов та інших екологічних чинників. Для обґрунтування екологічної безпечності агрохімікатів необхідно визначити вплив гранично допустимих норм внесення на функціональний стан ґрунтових мікроорганізмів.

Запобігти можливим негативним наслідкам хімізації можна лише шляхом проведення фундаментальних екотоксикологічних досліджень і розробки на їх основі достовірних прогнозів екологічних ризиків. Такий підхід є запорукою отримання якісної сільськогосподарської продукції та дозволяє своєчасно реагувати на загрози, що виникають у агроєкосистемах внаслідок застосування агрохімікатів [15].

РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення досліджень щодо впливу гербіцидів на ґрунтові мікроорганізми та біологічну активність ґрунту були використані такі гербіциди (діюча речовина):

1. Варіант 1 - ацетохлор, 900 г/л, максимальна виробнича норма 3 л/га;
2. Варіант 2 - клопіралід, 300 г/л, максимальна виробнича норма 0,5 л/га;
3. Варіант 3 - пропізохлор, 720 г/л, максимальна виробнича норма 3 л/га;
4. Варіант 4 - бентазон, 480 г/л, максимальна виробнича норма 3 л/га.

Відповідно до плану, проводилися дослід з оцінки впливу гербіцидів на:

- мікробний ценоз ґрунту, зокрема чисельність основних таксономічних, еколого-трофічних і фізіологічних груп мікроорганізмів;
- біомасу ґрунтових мікроорганізмів;
- потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту.

Дослідні ґрунти підбирали виходячи із агровиробничої зони поширення сільськогосподарських культур, на яких препарат рекомендується до застосування.

2.1 Характеристика ґрунтів:

Чорнозем типовий, був відібраний в «Агрономічній дослідній станції» НУБіП України: с. Пшеничне Васильківського району Київської області. Вміст гумусу – 4,9%, загального азоту – 0,14%, лужногідролізованого азоту – 185,2 мг/кг, нітратного азоту – 6,0 мг/кг, амонійного азоту – 58,7 мг/кг, рухомого фосфору – 100,3 мг/кг, рН водної витяжки – 7,6.

Темно-сірий опідзолений ґрунт було відібрано в с. Чабани, Києво-Святошинського району, Київської області. Вміст гумусу – 3,7%, загального азоту – 0,10%, лужногідролізованого азоту – 137,4 мг/кг, нітратного азоту – 4,3 мг/кг, амонійного азоту – 43,6 мг/кг, рухомого фосфору – 78,5 мг/кг, рН водної витяжки – 7,2.

Ясно-сірий ґрунт відібрано на території Голосіївського лісу м. Київ. Вміст гумусу – 0,8 %, лужногідролізованого азоту – 54,2 мг/кг, нітратного азоту – 0,8 мг/кг, амонійного азоту – 9,6 мг/кг, рухомого фосфору – 15,8 мг/кг, рН водної витяжки – 5,1.

2.2 Визначення чисельності мікроорганізмів основних таксономічних та еколого-трофічних груп:

Мікробний ценоз ґрунту представлений мікроорганізмами різних таксономічних (бактерії, мікроміцети та актиноміцети) та еколого-трофічних груп (педотрофні, амоніфікуючі, амілолітичні, гуматрозкладаючі, оліготрофні та фосформобілізуючі мікроорганізми, целюлорозкладаючі). Важливе агрономічне значення також мають азотфіксуючі мікроорганізми – олігоазотрофи та азотобактер [2].

Для визначення чисельності ґрунтової мікробіоти вищезазначених груп, після компостування з кожного варіанту відбирали в колби по 10 г ґрунту та, додаючи 90 мл води, диспергували мікроорганізми з ґрунтових часточок. Після цього, готували ряд стерильних розведень, з яких проводили висів ґрунтової суспензії на агаризовані поживні середовища.

2.3 Склад та характеристика поживних середовищ

Характеристика поживних середовищ [5] ;

- ґрунтовий агар (ПА) - для педотрофів;
- картопляно-глюкозний агар (КГА) - для актиноміцетів;
- середовище Чапека - для мікроміцетів;

- м'ясо-пептонний агар (МПА) - для амоніфікаторів;
- голодний агар (ГА) - для оліготрофів;
- крохмало-аміачний агар (КАА) - для амілолітичних форм.

Склад середовищ – загальноприйнятий в ґрунтовій мікробіології [5,7]:

- МПА: м'ясний екстракт 3,0 г; пептон 10,0 г; NaCl 5,0 г; агар 15–20 г; дистильована вода 1000 мл; рН 7,0–7,2.
- Чапека: сахароза 30,0 г; NaNO₃ 3,0 г; K₂HPO₄ 1,0 г; MgSO₄·7H₂O 0,5 г; KCl 0,5 г; FeSO₄ 0,01 г; агар 20 г; вода 1000 мл; рН 7,0.
- ПА: пептон 10,0 г; м'ясний екстракт 3,0 г; NaCl 5,0 г; агар 15–20 г; вода 1000 мл; рН 7,2 ± 0,2.
- КГА: крохмаль 10,0 г; глюкоза 10,0 г; пептон 5,0 г; K₂HPO₄ 1,0 г; MgSO₄·7H₂O 0,5 г; NaCl 5,0 г; агар 15–20 г; дистильована вода 1000 мл; рН 7,0 ± 0,2.
- КАА: крохмаль 20,0 г; (NH₄)₂SO₄ 2,0 г; K₂HPO₄ 1,0 г; MgSO₄·7H₂O 0,5 г; NaCl 0,5 г; CaCO₃ 3,0 г; агар 15–20 г; дистильована вода 1000 мл; рН 7,0 ± 0,2.
- ГА: агар 15,0–20,0 г; дистильована вода 1000 мл; рН 7,0 ± 0,2.

2.4 Підготовка ґрунту і постановка дослідів:

Для проведення мікробіологічних аналізів відбирали наважки ґрунту масою 300 г та поміщали їх у стерильні стаканчики у трикратному повторенні. З метою стабілізації мікробіологічних процесів відібрані наважки зволожували до 55-70% ПВ та компостували протягом 3 діб. Після цього, ґрунтові зразки обробляли водним розчином досліджуваного гербіциду у нормі, еквівалентній максимальній виробничій нормі в перерахунку на 300 г ґрунту. У якості контролю використовували відповідний тип ґрунту, зволожений еквівалентним об'ємом стерильної

дистильованої води. Дослідні і контрольні зразки компостували протягом 7 діб, підтримуючи вологість на рівні 55-70% ПВ. Після інкубації визначали чисельність основних таксономічних, фізіологічних та еколого-трофічних груп та активність біологічних процесів ґрунту за стандартизованими та загальноприйнятими методами [7].

Після засіву біологічного матеріалу на живильні середовища в чашки Петрі, їх інкубували при температурі 28°C протягом 5-10 діб (в залежності від швидкості росту відповідних груп мікроорганізмів). Кількість колоній, що вирости на середовищах, підраховували, виходячи з припущення, що кожна колонія утворена однією життєздатною клітиною. Результати подані в колонієутворюючих одиницях (КУО) на один грам абсолютно сухого ґрунту з урахуванням коефіцієнту вологості та розведення ґрунтової суспензії.

Посіви проводили у трикратній повторності, отримані дані обробляли методом математичної статистики, розраховуючи довірчий інтервал кількості мікроорганізмів.

2.5 Місце проведення досліджень:

Мікробіологічні дослідження виконували в Українській лабораторії якості та безпеки продукції агропромислового комплексу (УЛЯБП АПК) при Національному університеті біоресурсів і природокористування України. Лабораторія оснащена сучасним науково-аналітичним обладнанням, що забезпечує проведення широкого спектра мікробіологічних, фізико-хімічних та ґрунтово-екологічних досліджень. Для роботи використовували автоклави, стерильні бокси, ламінарні шафи, інкубатори, аналітичні ваги, мікроскопи та спектрофотометричні прилади, що гарантує точність і відтворюваність експериментальних результатів [21].

Відбір і підготовку ґрунтових зразків здійснювали згідно із загальноприйнятими методиками ґрунтової мікробіології [5,14]. У лабораторних умовах проводили мікробіологічний посів, культивування та кількісно-якісний аналіз мікроорганізмів різних еколого-трофічних груп [19].

Таким чином, експериментальна база УЛЯБП АПК НУБіП України забезпечила можливість проведення комплексних досліджень щодо оцінки впливу гербіцидів на біологічну активність, мікробну біомасу та структурно-функціональні показники ґрунтової мікробіоти, що має важливе значення для встановлення рівня біогенності чорноземів типових.

2.6 Статистична обробка результатів

Статистичну обробку даних для встановлення достовірності розбіжностей між варіантами виконували за допомогою програми Microsoft Excel.

2.7 Державні стандарти:

Визначення біомаси ґрунтових мікроорганізмів проводили регідратаційним методом за Панніковим з наступним окисленням вуглецю мікробної біомаси біхроматом калію за ДСТУ ISO 14240-2:2003 [12].

Вивчення біологічної активності ґрунту передбачало визначення впливу гербіциду на процеси мінералізації азоту та нітрифікації в ґрунтах за процедурою описаною в ДСТУ ISO 14238:2003 [11].

Потенційну нітрифікаційну здатність визначали за різницею кількісного вмісту нітратного азоту до та після компостування ґрунту із гербіцидом, який вимірювали фотометричним методом із дисульфифеноловою кислотою за ДСТУ 4729:2007 [10].

Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Вивчення впливу гербіцидів на мікробні ценози ґрунтів

Внесення в ґрунт екзогенних хімічних речовин суттєво впливає на структурно-функціональні характеристики ґрунтової мікрофлори, її чисельність, різноманіття та ферментативну активність. Мікроорганізми є ключовою ланкою формування родючості ґрунту, адже саме вони забезпечують трансформацію органічної речовини, беруть участь у біогеохімічних циклах основних біогенних елементів і сприяють стабілізації агрегатної структури. Тому рівень мікробіологічної активності доцільно розглядати як інформативний показник діагностики екологічного стану та потенційної родючості ґрунтів [39, 40].

Пестициди, як фізіологічно активні сполуки, можуть чинити подвійний вплив на мікробіоценоз ґрунту. З одного боку, за рахунок пригнічення фітопатогенної мікробіоти, вони здатні опосередковано стимулювати розвиток агрономічно корисних мікроорганізмів, активізувати ферментативні процеси та підвищувати врожайність культур. З іншого - надмірне або тривале застосування таких речовин порушує трофічну рівновагу мікробного угруповання, спричиняє зростання кількості токсикоутворювальних видів і зменшує стійкість екосистеми.

Отже, важливо встановити закономірності функціонування ґрунтового мікробного ценозу за умов пестицидного навантаження, оскільки саме цей показник може бути використаний як критерій екологічної оцінки стану ґрунту. Необхідним є також мікробіологічне обґрунтування безпечного використання пестицидів у межах рекомендованих норм внесення, що забезпечують збереження екологічної рівноваги та стабільності агроекосистем.

Результати експериментальних досліджень щодо впливу гербіцидів на чисельність основних агрономічно цінних груп мікроорганізмів наведено у таблиці 3.1.1 та 3.1.2

Таблиця 3.1.1

Вплив гербіцидів на чисельність основних таксономічних, фізіологічних та еколого-трофічних груп ґрунтових мікроорганізмів

Варіанти дослідів	Тип ґрунту	Чисельність мікроорганізмів, млн КУО/г ґрунту		
		амоніфікуючі	оліготрофні	актиноміцети
Контроль (без гербіциду)	чорнозем типовий	6,5±1,13	9,1±0,33	0,1±0,02
Варіант 1		12,0±0,89	3,5±0,04	0,1±0,03
Варіант 2		32,5±5,42	1,8±0,04	0,3±0,01
Контроль (без гербіциду)	темно сірий	1,2±0,32	0,2±0,04	0,04±0,01
Варіант 1		0,9±0,04	0,8±0,14	0,03±0,01
Варіант 2		0,8±0,14	1,0±0,03	0,1±0,03

Таблиця 3.1.2

Вплив гербіциду на чисельність основних таксономічних, фізіологічних та еколого-трофічних груп ґрунтових мікроорганізмів

Варіанти	Тип	Чисельність мікроорганізмів, млн. КУО/г ґрунту
----------	-----	--

дослід	грунту	амоніфікуючі	амілолітичні	педотрофні	оліготрофні	актиноміцети
Контроль (без гербіциду)	Чорнозем типовий	7,3±0,53	8,9±0,61	8,6±0,62	9,6±0,75	2,6±0,44
Варіант 3		10,9±1,08	6,8±0,37	11,0±2,10	12,4±0,26	2,4±0,13
Варіант 4		4,0±0,25	7,9±0,53	12,9±0,45	15,2±0,61	2,6±0,44
Контроль (без гербіциду)	ясно-сірий	0,6±0,06	0,5±0,04	0,2±0,02	0,5±0,05	0,1±0,01
Варіант 3		0,4±0,05	0,4±0,05	0,4±0,09	0,5±0,07	0,1±0,01
Варіант 4		0,5±0,11	0,4±0,01	0,4±0,21	0,5±0,05	0,1±0,01

Аналіз отриманих результатів показав, що застосування гербіцидів істотно впливає на мікробіологічну активність чорноземів типових і темно-та ясно-сірих ґрунтів. У варіантах дослідження спостерігалася як стимулююча, так і пригнічувальна дія залежно від типу ґрунту та концентрації препарату.

У чорноземі типовому внесення гербіциду у помірних дозах сприяло зростанню чисельності амоніфікуючих і педотрофних мікроорганізмів на 30–60 % порівняно з контролем, що свідчить про активацію процесів мінералізації органічної речовини. Водночас у варіантах із підвищеною

дозою спостерігалось пригнічення оліготрофів і амілолітичних бактерій, що може вказувати на порушення трофічної рівноваги мікробного ценозу.

У темно- та ясно-сірих ґрунтах дія гербіцидів виявилася менш сприятливою: чисельність більшості мікроорганізмів знизилась у 1,3–2,5 рази відносно контролю. Найчутливішими виявилися актиноміцети та оліготрофні форми, тоді як амоніфікуючі бактерії проявили відносну толерантність до пестицидного навантаження.

Отже, вплив гербіцидів на ґрунтову мікробіоту має диференційований характер: у родючих чорноземах за оптимальних доз можливе короткочасне стимулювання біогенної активності, тоді як у менш гумусованих ґрунтах переважає пригнічувальний ефект. Виявлені зміни у структурі мікробного ценозу свідчать про необхідність регламентованого застосування гербіцидів та моніторингу їхнього впливу на біологічну активність ґрунтів.

3.2 Дослідження впливу гербіцидів на чисельність мікроміцетів

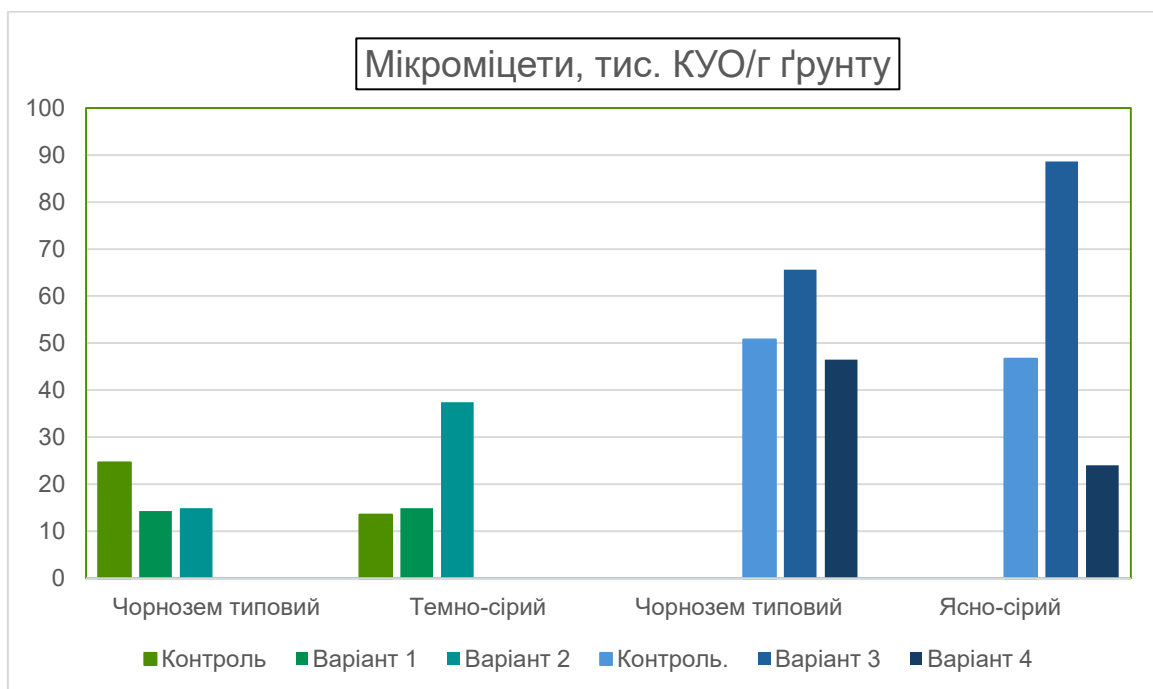


Рис.1 Вплив гербіцидів на чисельність мікроміцетів, тис. КУО/г ґрунту

Згідно з отриманими результатами зобразили графік чисельності мікроміцетів (рис.1), що суттєво варіювала залежно від типу ґрунту та внесеного гербіциду. У чорноземі типовому контрольний варіант характеризувався найвищою кількістю мікроміцетів (понад 20 тис. КУО/г), тоді як у варіантах 1 і 2 відмічено помірне зниження активності грибів до 13–14 тис. КУО/г, що може свідчити про короткочасний пригнічувальний ефект пестицидів на мікробіоту.

Для темно-сірого ґрунту спостерігалася інша тенденція - у варіанті 2 чисельність мікроміцетів зросла майже втричі (до 37 тис. КУО/г), порівняно з контролем (близько 13 тис. КУО/г). Це може бути зумовлено реакцією грибів на стресове середовище, коли окремі види активізуються за рахунок інших мікробних груп.

Найбільші показники мікроміцетів зафіксовано у ясно-сірому ґрунті, де у варіанті 3 чисельність грибів зросла до 88–90 тис. КУО/г, тоді як у варіанті 4 вона знизилась до 25 тис. КУО/г. Така амплітуда пояснюється різною реакцією мікробного комплексу на концентрацію гербіциду: за нижчих доз гриби активізуються, тоді як за перевищення порогу токсичності - їх активність різко зменшується.

Загалом, результати свідчать, що мікроміцети є чутливими біоіндикаторами стану ґрунту, здатними швидко реагувати на гербіцидне навантаження. Їх чисельність зростає за умов помірного стресу та знижується за надмірного впливу, що відображає баланс між адаптацією і токсичним ефектом.

3.3 Дослідження впливу гербіцидів на мікробну біомасу

Оскільки чисельність мікроорганізмів не завжди є достатньо точним критерієм для оцінки впливу агрохімікатів, а характер змін (зростання або зниження) не завжди має однозначне трактування, було проведено дослідження впливу гербіцидів на мікробну біомасу як інтегрального показника біогенності ґрунту.

Дані щодо впливу гербіцидів на біомасу мікроорганізмів у дослідних ґрунтах наведено в таблиці 3.2.1 та 3.2.2

Таблиця 3.2.1

Вплив гербіцидів на біомасу ґрунтових мікроорганізмів, мкг С/г сухого ґрунту

Варіант дослідження	Тип ґрунту	
	чорнозем типовий	темно-сірий
Контроль (без гербіциду)	252,9 ± 13,56	70,2 ± 0,10
Варіант 1	221,8 ± 6,80	75,8 ± 3,17
Варіант 2	248,7 ± 6,80	93,3 ± 3,17

Таблиця 3.2.2

Вплив гербіцидів на біомасу ґрунтових мікроорганізмів, мкг С/г сухого ґрунту

Варіант дослідження	Тип ґрунту	
	чорнозем типовий	ясно-сірий
Контроль (без гербіциду)	240,2 ± 48,03	45,8 ± 2,85
Варіант 3	253,7 ± 50,73	49,0 ± 2,83
Варіант 4	253,7 ± 50,73	30,6 ± 6,12

Результати досліджень показали, що застосування гербіцидів суттєво впливає на мікробну біомасу ґрунтів, при цьому характер змін залежить від типу ґрунту та норми внесення препарату.

У чорноземі типовому дія гербіцидів виявилась менш шкідливою, ніж у сірих ґрунтах. Так, у порівнянні з контролем (252,9–240,2 мкг С/г) у варіантах досліджу відзначено незначне зниження біомаси (до 221,8 мкг С/г) або навіть стабілізацію показника на рівні 248–254 мкг С/г, що свідчить про високу буферність і саморегуляційні властивості чорноземів.

Натомість у темно-сірому та ясно-сірому ґрунтах виявлено більш виражене пригнічення мікробної біомаси. У варіантах із максимальним гербіцидним навантаженням її вміст знижувався до 30,6–45,8 мкг С/г, що становить лише 40–60 % від контрольних значень. Це свідчить про високу чутливість малогумусних ґрунтів до хімічного навантаження та зниження їхньої біогенності.

Таким чином, встановлено, що гербіциди по-різному впливають на біомасу мікроорганізмів в залежності від типу ґрунту: у чорноземах типовий ефект є короткочасним і слабким, тоді як у сірих ґрунтах спостерігається істотне пригнічення мікробіоти. Це підтверджує важливість урахування ґрунтово-кліматичних умов при регламентуванні норм внесення гербіцидів і необхідність моніторингу їхнього впливу на біологічну активність ґрунту.

3.4 Вивчення впливу гербіцидів на потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту

Внесення ксенобіотиків у ґрунтове середовище може опосередковано впливати на біогеохімічні цикли елементів, зокрема на цикл азоту, який є одним із ключових біофільних елементів. Дослідження процесів трансформації азотовмісних сполук дає змогу оцінити загальний стан родючості та спрямованість впливу пестицидів на функціонування ґрунтової екосистеми.

Як показник азотного режиму було визначено потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту, що характеризує його спроможність до накопичення мінеральних форм азоту. Процес нітрифікації здійснюється спеціалізованими мікроорганізмами, активність яких істотно залежить від забезпеченості поживними речовинами, реакції середовища та рівня токсичності ґрунту. Висока чутливість нітрифікуючих мікроорганізмів до зовнішніх чинників дає підстави розглядати їх фізіологічну активність як індикатор впливу пестицидів на ступінь ґрунтової родючості

Результати проведених еколого-токсикологічних досліджень впливу гербіциду з діючою речовиною ацетохлор на нітрифікаційну здатність свідчать про незначні зміни фізіологічної активності нітрифікуючих мікроорганізмів, що відображено у таблиці 3.3.1 та 3.3.2

Таблиця 3.3.1

Вплив гербіцидів на потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту, мг N-NO₃/кг ґрунту

Варіант	Тип ґрунту	
	чорнозем типовий	темно-сірий
до компостування (вихідний вміст)		
Контроль (без препарату)	23,4 ± 3,50	14,8 ± 2,21
Варіант 1	24,9 ± 3,74	13,9 ± 2,08
Варіант 2	20,1 ± 3,02	13,6 ± 2,04
14-й день		
Контроль (без препарату)	255,8 ± 38,38	139,1 ± 20,87

Варіант 1	197,5 ± 29,62	155,7 ± 23,37
Варіант 2	255,8 ± 38,38	139,1 ± 20,87
28-й день		
Контроль (без препарату)	296,7 ± 44,51	127,6 ± 19,15
Варіант 1	247,7 ± 37,15	126,5 ± 18,98
Варіант 2	242,4 ± 36,36	125,1 ± 18,76

Таблиця 3.3.2

Вплив гербіцидів на потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту, N-NO₃ мг/кг ґрунту

Варіант	Тип ґрунту	
	чорнозем типовий	ясно-сірий
до компостування (вихідний вміст)		
Контроль (без препарату)	21,8 ± 3,27	5,1 ± 0,77
Варіант 3	21,6 ± 3,24	4,7 ± 0,70
Варіант 4	23,8 ± 3,54	4,7 ± 0,71
14-й день		
Контроль (без препарату)	289,1 ± 43,37	3,5 ± 0,33
Варіант 3	295,3 ± 44,30	3,4 ± 0,42
Варіант 4	286,5 ± 43,01	3,7 ± 0,35
28-й день		

Контроль (без препарату)	329,0 ± 49,34	3,1 ± 0,46
Варіант 3	333,5 ± 50,02	2,6 ± 0,30
Варіант 4	332,4 ± 49,88	3,4 ± 0,39

Вплив гербіцидів на динаміку вмісту N-NO₃ в ґрунті наведено в табл. 3.4.1 та табл. 3.4.2.

Таблиця 3.4.1

Вплив гербіцидів на динаміку вмісту N-NO₃ в ґрунті, мг/кг ґрунту

Варіант	Тип ґрунту	
	чорнозем типовий	темно-сірий
14-й день		
Контроль (без препарату)	232,4 ± 34,88	124,3 ± 18,66
Варіант 1	172,6 ± 25,88	141,8 ± 21,29
Варіант 2	235,7 ± 35,36	125,5 ± 18,83
28-й день		
Контроль (без препарату)	273,3 ± 41,01	112,8 ± 16,94
Варіант 1	222,8 ± 33,41	112,6 ± 16,9
Варіант 2	222,3 ± 33,34	111,5 ± 16,7

Таблиця 3.4.2

Вплив гербіцидів на динаміку вмісту N-NO₃ в ґрунті, мг/кг ґрунту

Варіант	Тип ґрунту	
	чорнозем типовий	ясно-сірий
14-й день		
Контроль (без препарату)	267,3 ± 40,1	1,6 ± 0,44
Варіант 3	273,7 ± 41,06	1,3 ± 0,28
Варіант 4	262,7 ± 39,47	1 ± 0,36
28-й день		
Контроль (без препарату)	307,2 ± 46,07	2 ± 0,31
Варіант 3	311,9 ± 46,48	2,1 ± 0,40
Варіант 4	308,6 ± 46,34	1,3 ± 0,32

Результати досліджень засвідчили, що дія гербіцидів у максимальних виробничих дозах справляє різноспрямований вплив на потенційну нітрифікаційну здатність ґрунтів, що залежить від їхнього типу, гранулометричного складу, рівня гумусованості та буферної здатності.

У вихідному стані (до компостування) вміст нітратного азоту в чорноземі типовому становив 20,1–24,9 мг N–NO₃/кг, тоді як у темно-сірому та ясно-сірому ґрунтах цей показник був суттєво нижчим - 13,6–14,8 та 4,7–5,1 мг/кг відповідно. Це свідчить про вищу біогенність чорноземів, зумовлену їхнім значним запасом органічної речовини, оптимальною структурою та активною мікробною спільнотою.

На 14-й день експозиції у чорноземах типовий спостерігалось істотне підвищення нітрифікаційної здатності - до 197,5–255,8 мг N–NO₃/кг, що перевищувало вихідні показники у 8-10 разів. Це може бути результатом

активації процесів окиснення амонійного азоту нітрифікуючими бактеріями після адаптації до гербіцидного навантаження. У темно-сірих ґрунтах тенденція була подібною, проте значення показників залишались у межах 139–156 мг/кг, що свідчить про обмежену мікробіологічну активність у порівнянні з чорноземом.

Через 28 днів спостережень у чорноземах типовий нітрифікаційна здатність сягала 296,7 мг N–NO₃/кг у контролі та 242–248 мг/кг у варіантах із гербіцидами, що свідчить про стабілізацію азотного обміну та відновлення мікробної активності. У темно-сірих ґрунтах, навпаки, показники залишалися на рівні 125–127 мг/кг, тобто активність мікроорганізмів залишалась пригніченою.

Загалом встановлено, що вплив гербіцидів на процеси нітрифікації має тимчасовий характер у чорноземах типовий, де мікробний ценоз швидко адаптується до присутності пестицидів і відновлює функціональну активність. Натомість у сірих ґрунтах спостерігається стійке пригнічення активності нітрифікуючих бактерій, що свідчить про зниження їхньої біогенності та потенціалу самоочищення.

Отже, гербіциди в регламентованих дозах не справляють істотного негативного впливу на нітрифікаційні процеси у чорноземах типових, однак можуть спричинити порушення азотного циклу у ґрунтах із низьким вмістом органічної речовини. Це підтверджує необхідність адаптації агрохімічних технологій до конкретних ґрунтово-кліматичних умов і моніторингу мікробіологічної активності при хімічному навантаженні.

ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є комплексною системою правових, соціально-економічних, організаційно-технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі науково-дослідної діяльності. Під час виконання магістерської роботи на тему «Вплив гербіцидів на біогенність чорнозему типового» особливу увагу приділялося питанням безпеки при поводженні з токсичними речовинами, реагентами та гербіцидами.

Експериментальні дослідження проводилися на базі Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу НУБіП України (УЛЯБП АПК), що відповідає вимогам сучасних стандартів безпечної наукової діяльності. Лабораторні приміщення обладнані системою припливно-витяжної вентиляції, витяжними шафами, аварійними душами, аптечками першої допомоги, засобами пожежогасіння та освітленням відповідно.

Усі дослідники забезпечувалися засобами індивідуального захисту (халати, рукавички, респіратори, захисні окуляри). Робота проводилася при оптимальних параметрах мікроклімату температурі 18–22 °С і вологості 40–60 %.

4.1 Вимоги безпеки при роботі з гербіцидами

Робота з гербіцидами відноситься до категорії підвищеної небезпеки, тому особлива увага приділялася суворому дотриманню регламентів безпеки. Приготування робочих розчинів гербіцидів проводилося під витяжною шафою, із застосуванням дозаторів та захисного одягу.

Під час роботи заборонялося вживати їжу, напої або палити. У разі потрапляння препарату на шкіру уражену ділянку промивали великою

кількістю води; при потраплянні в очі промивали протягом не менше 10–15 хвилин і зверталися за медичною допомогою.

Відходи, що містили залишки гербіцидів, збиралися у спеціальні контейнери й утилізувалися відповідно до вимог ДСТУ 4513:2008. Злив хімічних залишків у каналізацію або на ґрунт був заборонений [9].

4.2 Пожежна та електробезпека

У лабораторії УЛЯБП АПК дотримуються вимоги Правил пожежної безпеки в Україні. Приміщення обладнане вогнегасниками, знаками евакуації та аварійним освітленням. Працівники інструктовані щодо дій у разі займання або аварійної ситуації [18].

Усі електроприлади (ваги, центрифуги, термостати, мікроскопи) регулярно проходять технічну перевірку, мають заземлення та ізоляцію. Заборонено використовувати обладнання з пошкодженими шнурами або без заземлення.

4.3 Організаційні заходи з охорони праці

Перед початком експериментальних робіт усі учасники пройшли первинний інструктаж з охорони праці та безпеки роботи з хімічними речовинами. Повторні інструктажі проводилися не рідше одного разу на шість місяців і фіксувалися у спеціальному журналі.

Керівник лабораторії та науковий керівник несли відповідальність за організацію безпечних умов праці, забезпечення дослідників необхідними засобами захисту, наявність аптечок і справність вентиляційних систем.

4.4 Висновки

У процесі виконання магістерської роботи було створено безпечні умови праці, що відповідають чинним санітарним, технічним та екологічним нормам. Дотримання регламентів з охорони праці, хімічної та

біологічної безпеки забезпечило захист здоров'я дослідників і знизило ризики негативного впливу гербіцидів на людину та довкілля.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської роботи на тему «Вплив гербіцидів на біогенність чорнозему типового» проведено комплексні мікробіологічні дослідження, спрямовані на оцінку змін біологічної активності, мікробної біомаси та потенційної нітрифікаційної здатності ґрунтів під впливом гербіцидного навантаження.

Встановлено, що гербіциди по-різному впливають на ґрунтову мікробіоту залежно від типу ґрунту, його гранулометричного складу, рівня гумусованості та дози препарату. У чорноземі типовому дія гербіцидів у межах регламентованих норм виявилася переважно короткочасною та помірною: чисельність амоніфікуючих і педотрофних мікроорганізмів зростала на 30–60 %, тоді як оліготрофні та амілолітичні бактерії проявляли тенденцію до зниження активності. Це свідчить про часткову активацію мінералізаційних процесів і збереження біогенної рівноваги ґрунту.

У темно- та ясно-сірих ґрунтах спостерігалася більш виражене пригнічення мікробної активності: кількість основних таксономічних груп зменшувалася в 1,3-2,5 рази, а мікробна біомаса - до 40-60% від контрольних значень. Це зумовлено нижчим вмістом органічної речовини та меншою буферною здатністю цих ґрунтів, що призводить до зниження їхньої біогенності.

Дослідження потенційної нітрифікаційної здатності засвідчили, що у чорноземі типовому гербіциди не спричиняли суттєвого порушення азотного циклу. Навпаки, через 14-28 днів після внесення спостерігалася стабілізація активності нітрифікуючих мікроорганізмів, що вказує на адаптаційні можливості мікробного ценозу. У сірих ґрунтах

нітрифікаційна здатність залишалась пригніченою, що підтверджує їхню високу чутливість до ксенобіотиків.

Чисельність мікроміцетів також варіювала залежно від типу ґрунту та концентрації гербіцидів. У чорноземі типовому спостерігалось короткочасне зниження кількості грибів, тоді як у темно-сірому ґрунті відзначено стимуляцію їхнього росту, що може бути наслідком стресової реакції мікробного комплексу.

Отже, гербіциди за дотримання агрохімічних регламентів не чинять критичного негативного впливу на біогенність чорнозему типового, однак у менш гумусованих сірих ґрунтах їхня дія може спричинити деградаційні зміни мікробної біоти. Це підтверджує необхідність адаптації системи застосування гербіцидів до ґрунтово-кліматичних умов і впровадження постійного мікробіологічного моніторингу для забезпечення екологічної стійкості агроландшафтів.

Список використаної літератури

1. Агроекологічна оцінка мінеральних добрив та пестицидів: монографія / За ред. В.П. Патики. – К.: Основа, 2005. – 300 с.
2. Андреюк К. І., Іутинська Г. О., Антипчук А. Ф. та ін. *Функціонування мікробних угруповань ґрунту в умовах антропогенного навантаження*. Київ : Обереги, 2001. 239 с.
3. Білявська Л. Г., Орел Л. А. Біологічна активність ґрунтів південного степу України за різних систем землеробства. *Вісник аграрної науки Південного регіону*. 2020. № 2(66). С. 45–52.
4. Біогенність ґрунту / словник-довідник. Сайт «Словник агронома» // SuperAgronom.com. — URL: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/biogennist-gruntu-id20032>
5. Волкогон В. В., Надкернична О. В., Токмакова Л. М. та ін. *Експериментальна ґрунтова мікробіологія : монографія*. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.
6. Волкогон В. В. Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2024. Вип. 39. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.39.3-21>
7. Грицаєнко З.М. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів / З.М. Грицаєнко, А.О. Грицаєнко, В.П. Карпенко. – К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. – с. 224.
8. Ґрунт // Вікіпедія : вільна енциклопедія. — URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Ґрунт>
9. ДСТУ 4513:2008. Відходи. Класифікація, утворення та утилізація. — К.: Держспоживстандарт України, 2008.
10. ДСТУ 4729:2007 Якість ґрунту. Визначання нітратного азоту в модифікації ННЦ ІГА ім. О.Н. Соколовського.

11. ДСТУ ISO 14238:2003 Якість ґрунту. Біологічні методи. Визначання мінералізації азоту і нітрифікації в ґрунтах та впливу хімічних речовин на ці процеси.
12. ДСТУ 14240-2:2003 Якість ґрунту. Визначення ґрунтової мікробної біомаси. Частина 2: Фумігаційно-екстракційний метод. – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 8 с.
13. Дубовенко Е.К. Живлення та удобрення сільськогосподарських культур / Е.К. Дубовенко. – 1964. – С. 29-32.
14. Закон України «Про пестициди і агрохімікати»//Відомості Верховної Ради України, 1995 р., № 14
15. Ібрагімова Е.Е. Методичні підходи до екоотоксичної оцінки пестицидів / Е.Е. Ібрагімова // Вісник аграрної науки. – 2007. – №1. – С.69-71.
16. Іутинська Г.І. Стійкість мікробних угруповань ґрунту до токсичної і мутагенної дії пестицидів за різних агротехнологій вирощування сільськогосподарських культур / Г.І. Іутинська, Н.А. Ямборко // Науковий вісник НАУ. – № 81. – 2005. – С. 21-25.
17. Москалець Т.З. Еколого-функціональні особливості розвитку мікробіоценозу дерново-середньопідзолистого ґрунту/ Т.З. Москалець / "Вісник Білоцерківського національного аграрного університету"– 2009 р.
18. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. — К.: МВС України, 2014.
19. Резнік С. В. Вплив різних систем землеробства на еколого-трофічні угруповання мікроорганізмів чорноземів типових в умовах лівобережного лісостепу України. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2021. Вип. 33. С. 62–71.
20. Сухарев С.М. Основи екології та охорони довкілля. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів/ С.М. Сухарев,

- С.Ю. Чудак, О.Ю. Сухарев. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 394 с.
21. Українська лабораторія якості і безпеки продукції АПК. URL: <http://quality.ua/>
22. Ходаківська О. В., Корчинська С. Г., Матвієнко А. П. Еколого-економічні аспекти відтворення родючості ґрунтів. *Землеробство*. 2017. Вип. 1. С. 16–21. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemlerobstvo_2017_1_5
23. Шерстобоева О. В., Колісник Т. П. Зміни мікробіологічної активності ґрунтів під впливом техногенного навантаження. *Ґрунтознавство і агрохімія*. 2021. Т. 92, № 1. С. 63–70.
24. Anderson J.P.E. Herbicide degradation in soil: influence of microbial biomass/ J.P.E. Anderson *Soil Biol. Biochem.* – 1984. – V. 16. – 6. – P. 483-489.
25. Bargali S. S. Soil microbial biomass: a crucial indicator of soil health. *Current Agriculture Research Journal*. 2024. Vol. 12, № 1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.12944/CARJ.12.1.01>
26. Bhaduri D., Singh R., Christensen B. «A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration capabilities». *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. Article 938481. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9428492/>
27. Castrejón-Godínez, M. L., et al. (2021). *Glyphosate Pollution Treatment and Microbial Degradation*. PMC. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8625783/>
28. Changes in soil microbial community and activity caused by herbicide application (2022). *Frontiers in Microbiology*. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8211737/>

29. Chen, J. (2021). *Effects of Herbicides on the Microbial Community and Soil Health: A Review*. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 56(8), 673-685. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/6649498>
30. Domsch K. Principles of pesticide microbe interactions in soil / K. Domsch // Soil nBiol Conserv. Biosphere. – Budapest, 1984. – P. 179-184.
31. Environmental Microbiome (2024). *Herbicide-treated soil as a reservoir of beneficial bacteria: Effects on soil bacterial community composition and plant growth-promoting traits*. URL: <https://environmentalmicrobiome.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40793-024-00654-6>
32. Frontiers in Microbiology (2022). *Changes in soil microbial community and activity caused by herbicide application*. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8211737/>
33. Herbicide-treated soil as a reservoir of beneficial bacteria: Effects on soil bacterial community composition and plant growth-promoting traits. Environmental Microbiome (2024). URL: <https://environmentalmicrobiome.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40793-024-00654-6>
34. Impact of Agrochemicals on Soil Microbiota and Management / Meena R.S., et al. *Land*, 2020, 9(2): 34. URL: <https://www.mdpi.com/2073-445X/9/2/34>
35. Impact of pesticides on soil health: identification of key soil microbial indicators. *Scientific Reports*, 2024. Vol. 14, Article 12574. DOI: [10.1038/s41598-024-12574-9](https://doi.org/10.1038/s41598-024-12574-9)
36. Margesin R. Monitoring of bioremediation by soil biological activities / R. Margesin, A. Zimmerbauer, F. Schinner // *Chemosphere*. – 2000. – № 40. – P. 339-346.

37. Michael, I., Abamba, E. E., Chikukula, A., Dugeri, D. R., Ibeneme, O. J., & Okpro, O. (2024). *Herbicides Effects on Soil Functions: A Review*. Asian Soil Research Journal, 8(4), 34-41. DOI:10.9734/asrj/2024/v8i4160.
38. Ockleford, C., et al. (2023). *Impact of pesticides on soil health: identification of key soil microbial indicators*. Scientific Reports, 14, Article 12574. DOI:10.1038/s41598-024-12574-9.
39. Seybold C.A. Soil resilience: a fundamental component of soil quality / C.A. Seybold, J.F. Herrick, J.J. Brejd. // Soil Sci. – 1999. – №164. – P. 224-234.
40. Zhukova N., Kovalenko O. Microbial biomass as an indicator of soil degradation under anthropogenic impact. *Environmental Research and Technology Journal*. 2022. Vol. 9, № 2. P. 56–63.