

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка

Хіміко-біологічний факультет
Кафедра загальної біології та методики
навчання природничих дисциплін

Бакалаврська робота

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ СУЧАСНОЇ БІОТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ РОДЮЧОСТІ ҐРУНТІВ

Спеціальність 162 Біотехнології та біоінженерія
Освітня програма «Екологічна біотехнологія»

Здобувачки першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти
Дідух Наталії Василівни

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:
доктор біологічних наук, професор
Дробик Надія Михайлівна

РЕЦЕНЗЕНТ: Завідувач кафедри
агробіотехнологій Західноукраїнського
національного університету,
доктор сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник
ШУВАР Антін Михайлович

Тернопіль 2026

РЕЗЮМЕ

Дідух Н. В. Використання методів сучасної біотехнології для підвищення родючості ґрунтів. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 162 Біотехнології та біоінженерія. ТНПУ ім. В. Гнатюка. Тернопіль, 2026. 57 с.

У бакалаврській роботі здійснено аналіз наукових підходів до визначення поняття та класифікації родючості ґрунтів; проаналізовано природні й антропогенні чинники, що зумовлюють її зниження; обґрунтовано роль методів сучасної біотехнології у підтриманні та відновленні родючості ґрунтів.

Проведено експериментальне дослідження впливу біотехнологічного препарату «Байкал ЕМ-1» на процеси мінералізації органічної речовини та динаміку вмісту рухомих форм азоту і фосфору в ґрунт. Здійснено оцінку біологічної реакції рослин салату і редиски на внесення біотехнологічного препарату «Байкал ЕМ-1» у ґрунт. Встановлено, що препарат не лише змінює хімічний склад ґрунту, а й реально покращує умови живлення рослин, що є ключовим критерієм ефективної родючості. Підсумовано, що запропонований підхід може бути адаптований для різних типів ґрунтів, культур і біопрепаратів, що робить його корисним як для наукових досліджень, так і для практики аграрного виробництва

Ключові слова: родючість ґрунтів, біотехнологічні методи, мікробіологічний препарат «Байкал ЕМ-1», агрохімічні показники ґрунту, схожість насіння, ріст рослин, біомаса.

ABSTRACT

Didukh, N. V. The use of modern biotechnology methods to improve soil fertility. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science in the specialization 162 Biotechnology and Bioengineering. V. Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University. Ternopil, 2026. 57 p.

This bachelor's thesis analyses scientific approaches to defining the concept and classification of soil fertility; examines the natural and anthropogenic factors leading to its decline; and substantiates the role of modern biotechnology methods in maintaining and restoring soil fertility.

An experimental study was conducted to investigate the effect of the biotechnological preparation 'Baikal EM-1' on the processes of organic matter mineralisation and the dynamics of the content of mobile forms of nitrogen and phosphorus in the soil. An assessment was carried out of the biological response of lettuce and radish plants to the application of the biotechnological preparation 'Baikal EM-1' to the soil. It was established that the preparation not only alters the chemical composition of the soil but also effectively improves plant nutrition conditions, which is a key criterion for effective fertility. It was concluded that the proposed approach can be adapted for various soil types, crops and biological preparations, making it useful for both scientific research and agricultural practice

Key words: soil fertility, biotechnological methods, 'Baikal EM-1' microbiological preparation, agrochemical soil indicators, seed germination, plant growth, biomass.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. КРИТЕРІЇ РОДЮЧОСТІ ҐРУНТІВ ТА ШЛЯХИ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ	9
1.1. Поняття та класифікація родючості ґрунтів	9
1.2. Проблеми зниження родючості	13
1.3. Роль біотехнологій у підтриманні родючості. Методи сучасної біотехнології	21
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ.....	25
2.1. Об’єкт і місце дослідження.....	25
2.2. Матеріали й методи.....	28
2.3. Постановка експерименту	31
2.4. Методи обробки результатів	34
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	38
3.1. Вплив біотехнологічних методів на родючість ґрунтів	38
3.2. Порівняльна характеристика результатів	43
3.3. Практичне значення	47
ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53
ДОДАТКИ	57

ВСТУП

Сучасний етап розвитку сільського господарства характеризується зростанням антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив, що супроводжується поступовим виснаженням його природних ресурсів, зниженням вмісту органічної речовини та порушенням біологічної рівноваги. Інтенсивне землеробство, орієнтоване переважно на застосування мінеральних добрив і хімічних засобів захисту рослин, упродовж тривалого часу забезпечувало зростання врожайності, однак водночас призвело до деградаційних процесів у ґрунтах, зокрема до зниження гумусового стану, порушення структури та зменшення біологічної активності. За таких умов особливої актуальності набуває пошук альтернативних, екологічно безпечних підходів до підтримання та відновлення родючості ґрунтів, які ґрунтуються на використанні природних механізмів регуляції ґрунтових процесів.

Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є застосування методів сучасної біотехнології, що передбачають цілеспрямоване використання мікроорганізмів та продуктів їх життєдіяльності для оптимізації процесів мінералізації органічної речовини, мобілізації поживних елементів і підвищення їх доступності для рослин. Біотехнологічні методи дозволяють не лише компенсувати втрати поживних речовин, а й активізувати внутрішні резерви ґрунту, забезпечуючи більш раціональне використання органічних ресурсів та сприяючи формуванню стабільних агроєкосистем. У зв'язку з цим, проблема науково обґрунтованого застосування біотехнологій для підвищення родючості ґрунтів є актуальною як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від переважно хімічних методів інтенсифікації землеробства до біологічно орієнтованих технологій, які забезпечують збереження ґрунтового покриву та екологічну безпеку агровиробництва. В умовах зростання вартості мінеральних добрив і загострення екологічних проблем біотехнологічні препарати

розглядаються як ефективний інструмент підтримання родючості ґрунтів, однак їх дія потребує експериментального підтвердження та наукового обґрунтування. Особливо важливим є вивчення впливу таких препаратів на процеси мінералізації рослинних решток і трансформації основних елементів живлення, що безпосередньо визначають продуктивність ґрунту.

Об'єктом дослідження у роботі є ґрунт як складна природно-біологічна система, у межах якої відбуваються процеси трансформації органічної речовини та кругообігу поживних елементів. Ґрунт розглядається як основний компонент агроєкосистеми, що забезпечує умови для росту і розвитку рослин та реагує на вплив біологічних і антропогенних чинників.

Предметом дослідження є процеси мінералізації рослинних решток і зміни показників родючості ґрунту під впливом біотехнологічних методів, зокрема мікробіологічного препарату, спрямованого на активізацію ґрунтової мікрофлори та мобілізацію поживних елементів.

Метою дослідження є науково обґрунтована оцінка впливу мікробіологічного препарату «Байкал ЕМ-1» на родючість ґрунтів шляхом визначення змін у вмісті доступних форм азоту та фосфору, а також аналіз змін біометричних характеристик тестових рослин (схожість насіння, довжина проростків, маса рослин) за впливу цього препарату в умовах лабораторного експерименту.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачалося розв'язання комплексу взаємопов'язаних **завдань**:

- проаналізувати наукові літературні джерела щодо сутності, класифікації та основних показників родючості ґрунтів, а також чинників, що впливають на її зниження;
- охарактеризувати сучасні біотехнологічні підходи до відновлення і підвищення родючості ґрунтів, а також обґрунтувати вибір мікробіологічного препарату «Байкал ЕМ-1» як об'єкта дослідження;

- провести дослідження впливу препарату «Байкал ЕМ-1» на процеси трансформації органічної речовини в ґрунті;
- оцінити зміни під впливом препарату вмісту нітратної та амонійної форм азоту, а також рухомого фосфору;
- оцінити зміни біометричних показників тестових рослин (схожість насіння, довжина надземної частини, маса рослин) як індикаторів ефективної родючості ґрунту;
- провести статистичне опрацювання результатів дослідження та визначити достовірність виявлених змін між контрольним і дослідним варіантами.

Методологічною основою дослідження є поєднання загальнонаукових і спеціальних методів пізнання. У роботі використовувалися методи аналізу та узагальнення наукової літератури, лабораторні агрохімічні методи визначення вмісту мінеральних форм азоту та фосфору, біологічні методи оцінки росту і розвитку рослин, а також методи математичної та статистичної обробки експериментальних даних. Комплексне застосування зазначених методів забезпечило достовірність отриманих результатів і можливість їх наукової інтерпретації.

Наукова новизна дослідження полягає в експериментальному обґрунтуванні впливу біотехнологічного препарату на інтенсивність мінералізації рослинних решток і підвищення доступності основних елементів живлення в ґрунті за модельних умов. У роботі встановлено кількісні зміни агрохімічних показників ґрунту та доведено їх зв'язок із біологічною реакцією рослин, що дозволяє поглибити уявлення про механізми дії біотехнологічних методів у системі ґрунт–рослина.

Теоретичне значення одержаних результатів полягає у доповненні наукових уявлень про роль біологічних процесів у формуванні родючості ґрунтів і можливості їх цілеспрямованої регуляції за допомогою біотехнологій. Отримані дані можуть бути використані в подальших дослідженнях, присвячених

удосконаленню біологічних методів землеробства та вивченню ґрунтових процесів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати дослідження можуть бути використані для обґрунтування доцільності застосування біотехнологічних препаратів у сільськогосподарському виробництві з метою підвищення родючості ґрунтів і зменшення хімічного навантаження. Запропонована експериментальна модель може бути використана в навчальному процесі та для попередньої оцінки ефективності біопрепаратів у лабораторних і виробничих умовах.

Структура дипломної роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, у яких послідовно розкрито теоретичні основи проблеми, матеріали і методи дослідження, результати експерименту та їх аналіз, висновків і списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1. КРИТЕРІЇ РОДЮЧОСТІ ҐРУНТІВ ТА ШЛЯХ И ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

1.1. Поняття та класифікація родючості ґрунтів

Родючість ґрунтів є однією з базових категорій ґрунтознавства, агроекології та землеробства, оскільки саме вона визначає здатність ґрунтового покриву забезпечувати ріст, розвиток і продуктивність рослин за рахунок сукупності фізичних, хімічних, біологічних і фізико-хімічних властивостей. У науковому розумінні родючість ґрунту розглядається як інтегральна властивість природного тіла, що формується в процесі ґрунтоутворення під впливом клімату, рослинності, живих організмів, материнської породи, рельєфу та часу, а також зазнає істотних змін у результаті господарської діяльності людини. Родючість не є статичною характеристикою, вона змінюється в просторі й часі, реагуючи на природні процеси та антропогенне навантаження, що зумовлює необхідність її наукового вивчення, оцінювання та цілеспрямованого регулювання [1].

У широкому значенні родючість ґрунту визначається як здатність забезпечувати рослини водою, елементами мінерального живлення, повітрям і теплом у таких кількостях та співвідношеннях, які є оптимальними для формування врожаю певної культури за конкретних ґрунтово-кліматичних умов. При цьому важливою є не лише наявність поживних речовин, а й їх доступність для кореневих систем рослин, що значною мірою залежить від хімічних форм елементів, активності ґрунтової мікробіоти, реакції ґрунтового розчину та структурного стану ґрунту. Родючість тісно пов'язана з біологічною активністю ґрунтів, оскільки саме мікроорганізми та ґрунтова фауна відіграють ключову роль у трансформації органічних решток, мінералізації поживних елементів і підтриманні гумусового стану [2].

У науковій літературі поняття родючості ґрунтів трактується як багатовимірний категорій, що поєднує природні властивості ґрунту та результати

його антропогенної трансформації. Відповідно до цього підходу, виділяють декілька основних форм родючості, які відображають різні аспекти взаємодії ґрунту і рослин. Природна родючість формується внаслідок ґрунтоутворювальних процесів без безпосереднього втручання людини і визначається запасами гумусу, мінеральним складом, водним режимом і природною біологічною активністю. Вона є характерною для цілинних або слабко порушених ґрунтів і слугує базою для подальшого господарського використання земель. Агрокліматичні зони України представлено на рис. 1.1.



Рис. 1.1 Агрокліматичні зони України (класичний розподіл зон) [6].

Ефективна або господарська родючість відображає реальну здатність ґрунту забезпечувати врожайність культур в умовах агровикористання з урахуванням застосування агротехнічних заходів, добрив, меліорації та захисту рослин. Вона є результатом взаємодії природної родючості з технологіями землеробства і значною мірою залежить від рівня науково обґрунтованого управління ґрунтовими процесами. Потенційна родючість характеризує максимально можливу продуктивність ґрунту за умов оптимального

забезпечення рослин усіма необхідними факторами росту і за відсутності лімітуючих чинників. Вона відображає резерви ґрунту, які можуть бути реалізовані шляхом удосконалення агротехнологій і застосування сучасних методів підвищення родючості, зокрема біотехнологічних.

Окреме місце у класифікації займає штучна або створена родючість, яка формується внаслідок цілеспрямованого впливу людини на ґрунт шляхом внесення органічних і мінеральних добрив, використання біопрепаратів, регулювання водного режиму та структурного стану. В умовах інтенсивного землеробства саме цей тип родючості часто визначає рівень урожайності, проте за відсутності науково обґрунтованого підходу може супроводжуватися деградаційними процесами, такими як виснаження гумусу, засолення або закислення ґрунтів [3]. Екологічна родючість розглядається як здатність ґрунту забезпечувати стабільну продуктивність агроєкосистем без порушення екологічної рівноваги, збереження біорізноманіття та ґрунтових функцій, що особливо актуально в контексті сталого розвитку та органічного землеробства.

Оцінювання родючості ґрунтів базується на системі показників, які відображають різні аспекти їх функціонального стану. Одним із ключових показників є вміст гумусу, який визначає рівень енергетичних і поживних ресурсів ґрунту, його буферні властивості та здатність до саморегуляції. Гумус відіграє центральну роль у формуванні ґрунтової структури, водоутримувальної здатності та катіонного обміну, а також є основним джерелом елементів живлення для рослин і мікроорганізмів. Зменшення гумусового вмісту зазвичай супроводжується зниженням родючості та стійкості ґрунтів до ерозійних процесів.

Важливими показниками родючості є забезпеченість ґрунту основними елементами мінерального живлення, насамперед азотом, фосфором і калієм, які беруть участь у ключових фізіолого-біохімічних процесах рослинного організму. Азот визначає інтенсивність росту вегетативної маси та синтез білкових сполук, фосфор відіграє провідну роль у енергетичному обміні та формуванні

генеративних органів, калій регулює водний режим рослин і підвищує їх стійкість до несприятливих умов. Оцінка родючості ґрунтів передбачає визначення як загального вмісту цих елементів, так і їх рухомих, доступних для рослин форм, що є більш інформативним з агрономічної точки зору.

Фізичні властивості ґрунту також мають суттєве значення для прояву родючості, оскільки вони визначають умови росту кореневих систем і водно-повітряний режим. До таких показників належать гранулометричний склад, щільність складання, пористість, структурність і водопроникність. Оптимальне поєднання твердих, рідких і газоподібних фаз ґрунту забезпечує нормальний розвиток коренів, ефективне поглинання поживних речовин і активність ґрунтової мікрофлори. Порушення фізичних властивостей, зокрема ущільнення або руйнування структури, призводить до зниження родючості навіть за достатнього вмісту поживних елементів [4].

Хімічні показники родючості включають реакцію ґрунтового середовища, ємність катіонного обміну, ступінь насиченості основами та вміст токсичних сполук. Реакція ґрунтового розчину істотно впливає на доступність поживних елементів і активність мікроорганізмів, оскільки більшість культурних рослин і ґрунтових біоценозів оптимально функціонують у слабокислих або нейтральних умовах. Відхилення реакції середовища в кислий або лужний бік може обмежувати надходження поживних речовин і негативно впливати на продуктивність агроecosистем.

Біологічні показники родючості відображають інтенсивність мікробіологічних процесів у ґрунті, рівень ферментативної активності та різноманіття ґрунтових організмів. Активність мікроорганізмів визначає швидкість мінералізації органічних решток, кругообіг елементів живлення та формування доступних для рослин сполук. Високий рівень біологічної активності є ознакою екологічно стабільного та родючого ґрунту, тоді як її зниження часто свідчить про деградаційні процеси або надмірний антропогенний тиск.

Комплексний характер родючості ґрунтів зумовлює необхідність інтегрованого підходу до її оцінювання, який передбачає врахування взаємозв'язку між різними групами показників. Родючість не може бути адекватно охарактеризована одним окремим параметром, оскільки навіть високі запаси поживних речовин не гарантують високої продуктивності за несприятливих фізичних або біологічних умов. Саме тому сучасні наукові підходи орієнтовані на системний аналіз ґрунтових властивостей та розробку методів управління родючістю, що базуються на поєднанні агротехнічних, екологічних і біотехнологічних заходів.

У контексті сучасного землеробства поняття родючості набуває особливої актуальності у зв'язку з необхідністю збереження ґрунтових ресурсів і забезпечення продовольчої безпеки. Інтенсифікація агровиробництва, кліматичні зміни та зростання антропогенного навантаження зумовлюють підвищену увагу до якісної оцінки родючості ґрунтів і пошуку ефективних шляхів її підтримання. Розуміння сутності та класифікації родючості, а також системи її показників є теоретичною основою для впровадження сучасних біотехнологічних методів, спрямованих на оптимізацію ґрунтових процесів і підвищення продуктивності агроєкосистем без порушення їх екологічної стійкості [5].

1.2. Проблеми зниження родючості

Зниження родючості ґрунтів є складним багатофакторним процесом, що формується під впливом поєднання природних умов і антропогенних чинників та має системний характер. Родючість ґрунту як інтегральна властивість надзвичайно чутлива до змін навколишнього середовища, оскільки ґрунт функціонує на межі взаємодії літосфери, атмосфери, гідросфери та біосфери. Будь-які порушення у цій взаємодії відображаються на фізичних, хімічних і біологічних процесах, що забезпечують стабільність ґрунтових екосистем. У сучасних умовах проблема зниження родючості набуває особливої актуальності

через інтенсифікацію землекористування, глобальні кліматичні зміни та зростання техногенного навантаження, що призводить до деградації ґрунтового покриву на значних територіях [6].

Природні чинники зниження родючості ґрунтів зумовлені особливостями клімату, рельєфу, гідрологічного режиму та ґрунтоутворювальних процесів. Одним із найвагоміших природних факторів є водна і вітрова ерозія, яка призводить до механічного змиву або видування верхніх, найбільш родючих горизонтів ґрунту. Саме орний шар містить основну частину гумусу, поживних елементів і мікроорганізмів, тому його втрата спричиняє різке зниження продуктивного потенціалу ґрунтів. Ерозійні процеси посилюються в умовах нерівномірного випадання опадів, різких злив, танення снігу, сильних вітрів та значних ухилів рельєфу, що особливо характерно для відкритих ландшафтів із недостатнім рослинним покривом.

Важливу роль у зниженні родючості відіграють кліматичні чинники, зокрема тривалі посухи, підвищення середньорічних температур і зміни режиму зволоження. Дефіцит вологи обмежує мікробіологічну активність ґрунтів, сповільнює процеси гуміфікації та мінералізації органічної речовини, знижує доступність поживних елементів для рослин. За умов надмірного зволоження, навпаки, відбувається вимивання поживних речовин у глибші горизонти, погіршується аерація ґрунту, активізуються відновні процеси, що негативно впливають на кореневі системи та ґрунтову біоту. Кліматичні зміни сприяють зростанню частоти екстремальних погодних явищ, які порушують усталені ґрунтові процеси та знижують стабільність агроecosистем [7]. Середньобаторічні суми опадів в різних адміністративних областях України представлено на рис. 1.2.

Природне закислення або засолення ґрунтів також є чинниками, що обмежують їх родючість. Закислення часто зумовлене вимиванням основних катіонів у вологих кліматичних умовах або накопиченням кислих продуктів ґрунтового метаболізму. У кислих ґрунтах знижується доступність фосфору,

кальцію та магнію, підвищується рухливість токсичних форм алюмінію і марганцю, що негативно впливає на рослини та мікроорганізми. Засолення ґрунтів характерне для посушливих і напівпосушливих регіонів, де випаровування перевищує кількість опадів, що сприяє накопиченню солей у кореневмісному шарі. Надлишок легкорозчинних солей порушує водний баланс рослин, знижує біологічну активність ґрунту і різко обмежує його продуктивність.

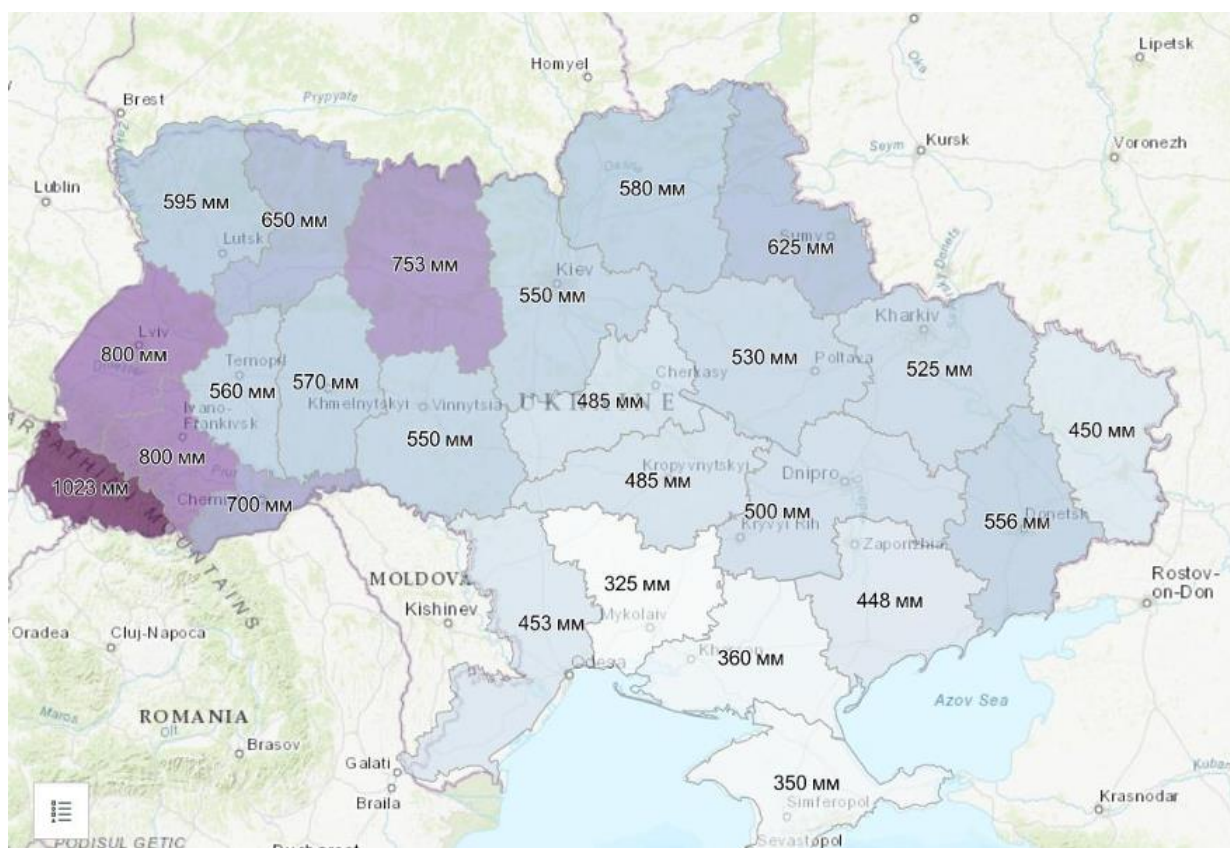


Рис. 1.2. Середньо-багаторічна сума опадів в різних адміністративних областях України

Антропогенні чинники зниження родючості ґрунтів у сучасних умовах мають визначальний характер і значно перевищують за масштабами природні процеси деградації. Інтенсивне землеробство, орієнтоване на отримання високих

урожаїв без урахування екологічних обмежень ґрунту, призводить до виснаження його ресурсів. Тривале вирощування одних і тих самих культур без дотримання науково обґрунтованих сівозмін спричиняє однобічне використання поживних елементів, зниження вмісту гумусу та порушення мікробіологічної рівноваги. Відсутність достатньої кількості органічних надходжень у ґрунт обмежує процеси гумусоутворення і поступово знижує його родючість.

Надмірне застосування мінеральних добрив без урахування реальних потреб ґрунту і рослин часто призводить до негативних наслідків для ґрунтових систем. Порушення балансу елементів живлення, накопичення нітратів і фосфатів, закислення ґрунтів та пригнічення корисної мікрофлори є типовими проявами хімічного навантаження. Особливо небезпечним є поєднання високих доз мінеральних добрив із недостатнім внесенням органічної речовини, що сприяє мінералізації гумусу і зниженню структурності ґрунту. У таких умовах ґрунт втрачає здатність до саморегуляції та стає більш уразливим до ерозійних і деградаційних процесів [8].

Значний негативний вплив на родючість ґрунтів має застосування пестицидів, гербіцидів і інших засобів хімічного захисту рослин. Тривале використання цих речовин сприяє накопиченню токсичних сполук у ґрунті, пригніченню корисних мікроорганізмів і ґрунтової фауни, що відіграють ключову роль у трансформації органічної речовини та кругообігу поживних елементів. Порушення біологічної рівноваги ґрунтів знижує інтенсивність мікробіологічних процесів і, як наслідок, обмежує доступність поживних речовин для рослин.

Механічний вплив сільськогосподарської техніки також є суттєвим антропогенним чинником деградації ґрунтів. Часте проходження важкої техніки спричиняє ущільнення орного і підорного шарів, зменшення пористості та порушення водно-повітряного режиму. Ущільнений ґрунт характеризується зниженням проникності для води й повітря, що негативно впливає на розвиток кореневих систем і активність мікроорганізмів. Оцінку щільності ґрунту

проводять за відповідними методиками (табл. 1.1). Навіть за достатнього вмісту поживних речовин такі ґрунти втрачають здатність забезпечувати рослини необхідними умовами для росту.

Порушення родючості ґрунтів посилюється внаслідок неправильного зрошення та осушення земель. Нераціональне зрошення може призводити до вторинного засолення, заболочування або вимивання поживних елементів, тоді як надмірне осушення сприяє мінералізації гумусу, окисненню органічної речовини та зниженню біологічної активності ґрунтів. Такі процеси особливо небезпечні для ґрунтів, що мають обмежену стійкість до антропогенних змін і потребують ретельного регулювання водного режиму [9].

Таблиця 1.1

Оцінка щільності ґрунтів за Н. А. Качинським [12]

Щільність ґрунту, г/см ³	Оцінка ґрунту суглинистого та глинистого гранулометричного складу
Менше 1	Ґрунт пухкий або багатий на органічні речовини, наприклад дернина в польових або лісових ґрунтах.
1,0-1,1	Оптимальна для культурної свіжої оранки.
1,2	Оранка ущільнена.
1,3-1,4	Оранка дуже ущільнена.
1,4-1,6	Оптимальна для підорних шарів різних ґрунтів.
1,6-1,8	Дуже ущільнені ілювіальні горизонти, переважно підзолистих ґрунтів і солодей, горизонти червоноземів.

Дуже щільний у сухому стані ґрунт чинить великий опір кореневій системі рослин, потребує додаткових витрат при обробітку. В перезволоженому щільному ґрунті складаються несприятливі умови для рослин через заповнення майже всього об'єму шпарин водою і недостатню аерацію. Щільний ґрунт слабо фільтрує воду.

Межі коливань щільності ґрунту досить широкі. Для мінеральних ґрунтів вони становлять 0,9-2,0 г/см³, а для органічних (торфів) – 0,15-0,40 г/см³. Розрізняють рівноважну і оптимальну щільність ґрунту. Рівноважною вважають

щільність горизонтів, які тривалий час не оброблялись. Показники рівноважної щільності ґрунту наведено в табл. 1.2

Таблиця 1.2

Значення рівноважної щільності ґрунтів України в шарі 0–20 см [6]

Гранулометричний склад	Щільність ґрунту, г/см ³	Гранулометричний склад	Щільність ґрунту, г/см ³
Дерново-підзолистий		Сірий лісовий	
Піщаний	1,50-1,65	Середньосуглинковий	1,25-1,35
Глиносто-піщаний	1,35-1,45	Темно-сірий лісовий	
супіщаний	1,45-1,60	Середньосуглинковий	1,20-1,30
Дерново-карбонатний		Чорнозем опідзолений	
Супіщаний	1,20-1,40	Середньосуглинковий	1,20-1,35
Легкосуглинковий	1,15-1,35	Чорнозем типовий	
Дерново-глеєвий		Середньосуглинковий	1,10-1,30
Важкосуглинковий	1,40-1,55	Чорнозем звичайний	
Лучний		Важкосуглинковий	1,10-1,25
Середньосуглинковий	1,15-1,30	Чорнозем південний	
Торфовище низинне		Важкосуглинковий	1,20-1,30
Ступінь розкладання торфу 35-40 %	0,12-0,18	Легкоглинистий	1,25-1,40
		Темно-каштановий	
Ясно-сірий лісовий		Важкосуглинковий	1,25-1,35
Середньосуглинковий	1,03-1,40	Каштановий	
		Легкоглинистий	1,30-1,40

Оптимальною вважається та щільність ґрунту, при якій за інших рівних умов отримують найвищі врожаї сільськогосподарських культур. Оптимальна щільність за своєю абсолютною величиною індивідуальна для кожного типу ґрунту, для різновидів ґрунтів щодо гранулометричного складу і для біологічних груп сільськогосподарських культур. У легких ґрунтах оптимальна щільність вища, а діапазон її коливань дещо ширший, ніж у ґрунтах середнього і важкого гранулометричного складу. Оптимальні інтервали щільності ґрунту не є константами. Вони змінюються у часі і насамперед через ступінь зволоженості ґрунту. При високій вологості оптимум у межах встановленого діапазону

змінюється у бік низьких показників, а в умовах недостатнього зволоження – до більш високих значень [14].

Щільність ґрунту є динамічним показником, що змінюється під впливом кліматичних чинників, агротехнічних заходів, глибини та строків обробітку ґрунту, часу збирання врожаю та особливостей сівозміни. Для більшості сільськогосподарських культур оптимальні значення щільності ґрунту перебувають у межах 1,10–1,30 г/см³. Особливо чутливими до ущільнення є чорноземні ґрунти. Надмірне ущільнення ґрунту призводить до деградації повітряного режиму, що проявляється у зменшенні аерації, накопиченні недоступної для рослин вологи внаслідок домінування меніскових сил, які перевищують всмоктувальну здатність кореневої системи. Також зростає механічний опір ґрунту для розвитку коренів, погіршується водопроникність та доступність елементів живлення. Водночас надмірно низька щільність призводить до зниження вмісту вологи та поживних речовин у ґрунтовому профілі через зменшення об'ємної концентрації, а також до підвищених втрат води через випаровування [15].

Щільність ґрунту формується під впливом як природних, так і антропогенних чинників. Серед природних чинників основне значення мають гранулометричний склад, вміст органічної речовини (зокрема гумусу), катіонний склад ґрунтового вбирного комплексу та ступінь насиченості ґрунту основами. Серед антропогенних чинників ключову роль відіграють застосування важкої сільськогосподарської техніки, значна кількість проходів машин по полю, обробіток ґрунту у надмірно зволоженому або пересушеному стані, дефіцит внесення органічних добрив, висока насиченість сівозмін просапними культурами, відсутність багаторічних трав у структурі посівів.

Щільність ґрунту має тенденцію до накопичення, тобто її показники з часом зростають. Це підтверджують результати довготривалих стаціонарних досліджень. Зокрема у досліді з вивчення впливу способів обробітку ґрунту в шарі 0–40 см встановлено, що за період з 1974 р. (момент закладання досліді) до

1985 р. щільність ґрунту під оранкою зросла з 1,04 до 1,16 г/см³, тобто на 0,12 г/см³ (11 %). За умов поверхневого дискування (глибина 10–12 см) показник збільшився на 0,16 г/см³ (16 %), з 1,04 до 1,20 г/см³.

Протягом наступного десятиріччя (1986–1995 рр.) щільність ґрунту продовжувала зростати, досягнувши у шарі 0–40 см таких значень: після оранки — 1,20–1,21 г/см³, за плоскорізного розпушування — 1,22–1,23 г/см³, дискування — 1,24–1,25 г/см³, прямої сівби — 1,25–1,27 г/см³. За результатами досліджень, у посушливі роки за умов застосування прямої сівби та дискування на глибину 10–12 см щільність ґрунту систематично перевищувала критичний поріг (1,30 г/см³), досягаючи 1,40–1,43 г/см³, що негативно впливало на продуктивність сільськогосподарських культур [16].

За щільністю виділяють наступні види ґрунтів: розсипчастий - ґрунт сиплеться з лопати; пухкий - ґрунт розсипається на дрібні грудочки, ґрунтовий ніж входить в горизонт без зусиль; щільнуватий - ґрунт розсипається або легко розламується на великі грудки, пластинки, ніж входить з деяким зусиллям; щільний - грудки ґрунту розламуються із зусиллям, ґрунт з лопати падає грудочками і розпадається на дуже великі грудки, ніж входить з великими зусиллями на глибину 5-6 см; дуже щільний або злитий - ґрунт майже не розламується, лопата з великим зусиллям входить на глибину 1 -2 см, а ніж - на 2-3 см. Ґрунти розрізняють також за зв'язністю: дуже зв'язний - прилипає до лопати і ледве відстає від неї; середньозв'язний - легко струшується з лопати; малозв'язний - до лопати не пристає.

Урбанізація, промислове будівництво та видобувна діяльність призводять до фізичного знищення ґрунтового покриву або його глибокої трансформації. Забруднення важкими металами, нафтопродуктами, радіонуклідами та іншими токсичними речовинами істотно знижує родючість ґрунтів і обмежує можливість їх сільськогосподарського використання. Навіть за відсутності видимих змін у структурі ґрунту такі забруднення порушують мікробіологічні процеси та становлять загрозу для екологічної безпеки агроландшафтів.

Отже, зниження родючості ґрунтів є результатом складної взаємодії природних і антропогенних чинників, які впливають на всі компоненти ґрунтової системи. Природні процеси створюють базові умови формування родючості, тоді як господарська діяльність людини здатна як підтримувати, так і суттєво порушувати ці умови. Усвідомлення причин деградації ґрунтів і механізмів зниження їх родючості є необхідною передумовою для розроблення ефективних заходів відновлення та збереження ґрунтових ресурсів. Саме в цьому контексті зростає значення сучасних екологічно орієнтованих підходів, зокрема біотехнологічних методів, які дозволяють мінімізувати негативний антропогенний вплив і спрямувати ґрунтові процеси на відновлення природної родючості та стабільності агроєкосистем.

1.3. Роль біотехнологій у підтриманні родючості. Методи сучасної біотехнології

Роль біотехнологій у підтриманні родючості ґрунтів у сучасних умовах розглядається як один із ключових напрямів екологізації землеробства та забезпечення сталого використання ґрунтових ресурсів. Біотехнологічні підходи ґрунтуються на цілеспрямованому використанні біологічних процесів, властивостей мікроорганізмів, рослин і продуктів їх життєдіяльності для регулювання ґрунтових процесів, оптимізації кругообігу поживних речовин і відновлення природних механізмів родючості. На відміну від традиційних хімічних методів інтенсифікації землеробства, біотехнології орієнтовані на гармонізацію взаємодії між ґрунтом, рослинами та мікробіотою, що дозволяє підтримувати продуктивність агроєкосистем без порушення їх екологічної рівноваги [10].

Сучасне уявлення про родючість ґрунтів дедалі більше пов'язується з біологічною складовою, оскільки саме мікроорганізми відіграють визначальну роль у трансформації органічної речовини, мобілізації поживних елементів і

формуванні доступних для рослин форм живлення. Біотехнологічні методи спрямовані на активізацію цих процесів шляхом внесення в ґрунт корисних мікробних препаратів або створення умов для розвитку аборигенної мікрофлори. Такий підхід дозволяє не лише підвищувати ефективну родючість ґрунтів, а й відновлювати їх потенціал у разі деградації, спричиненої інтенсивним землекористуванням.

Одним із найбільш поширених напрямів сучасної ґрунтової біотехнології є біоудобрення, яке базується на використанні мікроорганізмів, здатних забезпечувати рослини елементами мінерального живлення за рахунок природних біохімічних процесів. Азотфіксувальні мікроорганізми відіграють особливо важливу роль у підтриманні азотного балансу ґрунтів, оскільки вони здатні перетворювати атмосферний азот у форми, доступні для рослин. Завдяки цьому зменшується потреба у внесенні синтетичних азотних добрив, що знижує ризик закислення ґрунтів, накопичення нітратів і негативного впливу на навколишнє середовище. Фосфатмобілізувальні мікроорганізми забезпечують перехід важкорозчинних сполук фосфору в доступні форми, що особливо актуально для ґрунтів із високим вмістом фіксованого фосфору. Їх застосування підвищує коефіцієнт використання фосфору рослинами та сприяє більш раціональному використанню природних ресурсів [11].

Важливе місце серед біотехнологічних методів підтримання родючості займає використання мікоризних асоціацій, які формуються між кореневими системами рослин і ґрунтовими грибами. Мікориза істотно розширює поглинальну поверхню коренів, покращує надходження води та мінеральних елементів, зокрема фосфору, мікроелементів і важкодоступних форм азоту. У результаті підвищується ефективність живлення рослин, їх стійкість до стресових факторів і здатність адаптуватися до несприятливих ґрунтово-кліматичних умов. Мікоризні гриби також відіграють важливу роль у структуроутворенні ґрунту, сприяючи стабілізації ґрунтових агрегатів і зменшенню ерозійних процесів, що безпосередньо впливає на збереження

родючості. Біодеструктори органічних решток є ще одним важливим інструментом сучасної біотехнології, спрямованим на оптимізацію процесів розкладання рослинних залишків і повернення поживних елементів у ґрунтовий обіг. Використання спеціалізованих мікробних препаратів дозволяє прискорювати мінералізацію соломи, післяжнивних решток та інших органічних матеріалів, що зменшує ризик накопичення фітопатогенів і сприяє збагаченню ґрунту доступними формами азоту, фосфору та калію. Водночас такі процеси супроводжуються утворенням гумусових сполук, які є основою довготривалої родючості ґрунтів. Регульована мінералізація органічної речовини за участю біодеструкторів дозволяє уникати різких втрат гумусу та підтримувати баланс між процесами розкладання і гумусоутворення [12].

Особливу увагу в сучасній ґрунтовій біотехнології приділяють використанню консорціумів мікроорганізмів, які представляють собою комплекси взаємодіючих штамів із різною функціональною спрямованістю. Такий підхід дозволяє охопити широкий спектр ґрунтових процесів, зокрема азотфіксацію, фосфатмобілізацію, синтез фітогормонів, пригнічення фітопатогенів і стимуляцію росту рослин. Консорціуми мікроорганізмів характеризуються вищою стабільністю та ефективністю порівняно з монокультурами, оскільки між їх компонентами встановлюються взаємовигідні зв'язки, що забезпечують адаптацію до різних ґрунтових умов. Використання таких біопрепаратів сприяє формуванню функціонально активної мікробіоти ґрунту, яка є основою його біологічної родючості.

Значну роль у підтриманні родючості ґрунтів відіграють біоіндикатори та молекулярно-біологічні методи, які дозволяють оцінювати стан ґрунтових екосистем і ефективність застосування біотехнологічних заходів. Біоіндикація ґрунтів ґрунтується на аналізі реакції живих організмів на зміни умов середовища, що дає змогу виявляти ранні ознаки деградації або відновлення родючості. Молекулярні методи, зокрема аналіз мікробного різноманіття та функціональної активності ґрунтової мікрофлори, забезпечують більш глибоке

розуміння процесів, що відбуваються в ґрунті на мікрорівні. Використання таких підходів дозволяє обґрунтовано підбирати біотехнологічні препарати та оптимізувати стратегії управління родючістю з урахуванням специфіки конкретних ґрунтів [13].

Застосування біотехнологій в органічному землеробстві має особливе значення, оскільки ця система виробництва орієнтована на відмову від синтетичних добрив і пестицидів та ґрунтується на використанні природних механізмів підтримання родючості. Біотехнологічні методи забезпечують органічне землеробство ефективними інструментами для живлення рослин, захисту ґрунтів від деградації та збереження біорізноманіття. Вони сприяють формуванню стабільних агроєкосистем, у яких родючість ґрунту підтримується за рахунок внутрішніх ресурсів і біологічних взаємодій, а не зовнішніх хімічних впливів. Це дозволяє поєднувати економічну доцільність виробництва з екологічною безпекою та довготривалим збереженням ґрунтового потенціалу.

Узагальнюючи роль біотехнологій у підтриманні родючості ґрунтів, слід зазначити, що вони забезпечують перехід від екстенсивного використання ґрунтових ресурсів до науково обґрунтованого управління ґрунтовими процесами. Біотехнологічні методи дозволяють не лише компенсувати втрати поживних елементів, а й відновлювати порушені біологічні зв'язки в ґрунті, підвищувати його стійкість до деградаційних чинників і адаптаційну здатність до змін клімату. У сучасних умовах саме інтеграція біотехнологічних підходів у систему землеробства розглядається як перспективний шлях збереження та підвищення родючості ґрунтів, що відповідає принципам сталого розвитку та забезпечує довготривалу продуктивність агроландшафтів [14].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

2.1. Об'єкт і місце дослідження

Об'єктом дослідження в даній роботі є ґрунт як складна природно-біологічна система, що формується в результаті тривалих ґрунтоутворювальних процесів і виконує важливу роль у функціонуванні агроєкосистем. Ґрунт розглядається не лише як фізичне середовище для закріплення рослин, а як багатокомпонентна система, у якій відбуваються інтенсивні фізичні, хімічні та біологічні процеси, що безпосередньо визначають рівень його родючості. У межах дослідження основна увага приділяється орному шару ґрунту, оскільки саме цей горизонт характеризується найбільшою біологічною активністю, активними процесами трансформації органічної речовини та накопиченням доступних форм поживних елементів. Орний шар зазнає найбільшого антропогенного впливу внаслідок обробітку ґрунту, внесення добрив і вирощування сільськогосподарських культур, тому зміни його властивостей безпосередньо відображають ефективність застосованих агротехнологій та біотехнологічних заходів [15].

У межах даного дослідження ґрунт розглядається як об'єкт, у якому вивчаються процеси мінералізації рослинних решток, трансформації основних елементів живлення, зокрема азоту та фосфору, а також зміни показників, що характеризують його родючість. Особлива увага приділяється біологічній складовій ґрунтової системи, зокрема активності ґрунтових мікроорганізмів, які беруть участь у розкладанні органічної речовини та формуванні доступних для рослин форм поживних елементів. Такий підхід дозволяє розглядати ґрунт як динамічну систему, у якій біохімічні процеси можуть змінюватися під впливом біотехнологічних препаратів і факторів навколишнього середовища.

Місце дослідження обиралося з урахуванням необхідності забезпечення контрольованих умов для вивчення ґрунтових процесів. Експеримент проводився в лабораторних умовах, що дозволяло обмежити вплив зовнішніх факторів та створити стабільні параметри середовища для дослідження дії біотехнологічного препарату на ґрунтову систему. Лабораторний формат дослідження забезпечував можливість регулювання температурного режиму, вологості ґрунту та умов аерації, що є визначальними чинниками перебігу мікробіологічних процесів. Використання контрольованих умов дозволяло простежити динаміку змін показників ґрунту протягом експериментального періоду та отримати більш точні результати щодо інтенсивності мінералізації органічної речовини [16].

Ґрунтові зразки для дослідження відбиралися з ділянки сільськогосподарського призначення, яка використовується в умовах традиційного землеробства та характеризується типовими для регіону ґрунтово-кліматичними умовами. Вибір такої ділянки зумовлений необхідністю забезпечення практичної значущості результатів дослідження та можливості їх подальшого застосування в агровиробництві. Дослідна ділянка не зазнавала інтенсивного хімічного навантаження, що дозволило уникнути впливу залишкових кількостей агрохімікатів або токсичних сполук на результати експерименту. Це створювало передумови для об'єктивної оцінки впливу біотехнологічного препарату на природні ґрунтові процеси

Відбір ґрунтових зразків здійснювався з орного горизонту на глибині 0–20 см, який є основною зоною розвитку корневих систем більшості сільськогосподарських культур і характеризується високою біологічною активністю. Саме в цьому шарі відбувається основна частина процесів мінералізації органічної речовини та трансформації поживних елементів у форми, доступні для рослин. Для забезпечення репрезентативності дослідного матеріалу відбір проводився з урахуванням однорідності ділянки, після чого ґрунт ретельно перемішувався для отримання середнього зразка.

Природно-кліматичні умови місця відбору ґрунту характеризуються помірно континентальним кліматом із вираженою сезонністю. У теплий період року спостерігається підвищення температури та активізація мікробіологічних процесів у ґрунті, що сприяє інтенсивній мінералізації органічної речовини та мобілізації поживних елементів. У холодний період активність ґрунтової мікрофлори знижується, що уповільнює біохімічні процеси. Врахування кліматичних особливостей є важливим для правильного трактування результатів дослідження, оскільки температурний режим і зволоження істотно впливають на активність мікроорганізмів.

У лабораторних умовах проведення дослідження створювалися параметри середовища, максимально наближені до умов періоду активної вегетації рослин. Температурний режим підтримувався на рівні 22–25 °С, що є оптимальним для розвитку більшості ґрунтових мікроорганізмів і забезпечує активний перебіг аеробних процесів мінералізації органічної речовини. Вологість ґрунту регулювалася на рівні приблизно 60–70 % від повної польової вологості, що створює сприятливі умови для мікробіологічної діяльності та забезпечує достатню доступність води для мікроорганізмів. Для підтримання стабільних умов упродовж експерименту проводився регулярний контроль вологості з подальшим зволоженням ґрунту дистильованою водою у разі її зниження.

Аерація ґрунту забезпечувалася шляхом вільного доступу повітря до дослідних ємностей, що сприяло підтриманню аеробних умов середовища. Наявність кисню є необхідною умовою для функціонування більшості ґрунтових мікроорганізмів, які беруть участь у розкладанні органічних решток і перетворенні органічних сполук на доступні для рослин мінеральні форми. Таким чином, об'єкт і місце дослідження були визначені з урахуванням необхідності комплексного вивчення ґрунту як динамічної біологічної системи в умовах, що поєднують репрезентативність ґрунтового матеріалу з можливістю контролю основних параметрів середовища. Використання лабораторного формату дослідження створює науково обґрунтовані передумови для аналізу

впливу біотехнологічних методів на процеси мінералізації органічної речовини та зміну показників родючості ґрунту [17].

2.2. Матеріали й методи

У межах проведеного дослідження застосовано комплекс матеріалів і методичних підходів, що забезпечують об'єктивну оцінку впливу біотехнологічного препарату на процеси мінералізації органічних решток та зміну показників родючості ґрунту. Методологічна основа роботи ґрунтується на поєднанні агрохімічних, біологічних і лабораторно-аналітичних методів дослідження, які дозволяють простежити динаміку трансформації поживних елементів у ґрунтовому середовищі та оцінити їх доступність для рослин [1, 18]. Матеріальною основою дослідження були зразки орного шару ґрунту, відібрані з ділянки сільськогосподарського призначення [24].

Після транспортування до лабораторії ґрунтові зразки підлягали попередній підготовці. Підготовка включала очищення від великих рослинних решток, камінців та інших механічних домішок. Далі ґрунт висушували до повітряно-сухого стану за кімнатної температури та просіювали через лабораторне сито з діаметром отворів 1 мм для забезпечення однорідності матеріалу [14]. Отриманий ґрунтовий матеріал ретельно перемішувався для формування середньої проби, що дозволяло мінімізувати вплив природної неоднорідності ґрунтового покриву та забезпечувало репрезентативність результатів аналізу [13]. Як органічний субстрат використовувалися подрібнені рослинні рештки польових культур, які імітували післяжнивні залишки.

Рослинний матеріал попередньо висушувався та подрібнювався до дрібної фракції розміром приблизно 2–3 мм. Подрібнення забезпечувало рівномірний розподіл органічної речовини у ґрунтовій масі та створювало сприятливі умови для контакту рослинних решток із ґрундовою мікрофлорою. Внесення рослинного субстрату дозволяло змодельовати природні процеси

гуміфікації та мінералізації органічної речовини, що відбуваються в агроєкосистемах після збирання врожаю [11].

Біотехнологічним компонентом дослідження був мікробіологічний *препарат «Байкал ЕМ-1»*, який широко використовується в аграрній практиці як біологічний засіб для активізації ґрунтових процесів [26]. До складу препарату входить комплекс ефективних мікроорганізмів, серед яких молочнокислі бактерії, фотосинтезуючі бактерії, азотфіксуючі бактерії, цукроміцети та актиноміцети, здатні активізувати процеси розкладання органічної речовини та покращувати біологічну активність ґрунту. Дані мікроорганізми сприяють прискоренню мінералізації рослинних решток, мобілізації поживних елементів і формуванню доступних для рослин форм азоту та фосфору [28].

Перед використанням препарат розводили дистильованою водою у співвідношенні 1:1000, після чого отриманий робочий розчин рівномірно вносили у ґрунтову масу. Внесення здійснювалося шляхом зволоження ґрунту розчином препарату з подальшим ретельним перемішуванням для забезпечення рівномірного розподілу мікроорганізмів у всьому об'ємі дослідного зразка. Використання біологічного препарату дозволяло оцінити потенціал керованої інтенсифікації процесів мінералізації органічної речовини та зміну агрохімічних показників ґрунту [19, 26].

Для підтримання оптимального рівня вологості використовували дистильовану воду, що виключало вплив сторонніх мінеральних домішок на результати аналізів. Вологість ґрунту підтримували на рівні приблизно 60–70 % від повної польової вологоємності, що створює сприятливі умови для життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів. Контроль вологості здійснювали шляхом періодичного зважування лабораторних контейнерів із ґрунтом за допомогою електронних аналітичних терезів з точністю до 0,01 г [25]. У разі зниження вологості проводили додаткове зволоження ґрунту дистильованою водою [13].

Аналітична частина дослідження передбачала визначення основних агрохімічних показників, що характеризують рівень родючості ґрунту. Вміст нітратної форми азоту визначався методом сольової екстракції з використанням 1% розчину калій хлориду (KCl) з подальшим фотометричним визначенням концентрації нітратів. Отримані витяжки аналізували за допомогою лабораторного фотоколориметра або спектрофотометра, що дозволяло встановити концентрацію рухомого азоту в ґрунтовому зразку. Амонійну форму азоту визначали методом хімічної екстракції з подальшим визначенням за допомогою реактиву Несслера, який утворює характерне забарвлення у присутності іонів амонію [14]. Інтенсивність забарвлення вимірювали фотометричним методом, що забезпечує достатню точність і відтворюваність результатів. Обидві форми азоту мають важливе значення для живлення рослин і є показниками інтенсивності процесів мінералізації органічної речовини в ґрунті [20, 27].

Визначення рухомого фосфору проводили за методом Чирікова, який широко застосовується в агрохімічних дослідженнях. Метод передбачає екстракцію доступних форм фосфору розчином оцтової кислоти з подальшим фотометричним визначенням концентрації фосфат-іонів. Отримані витяжки аналізували за допомогою фотоколориметра, що дозволяло визначити кількість рухомого фосфору в мг на кг ґрунту. Оцінка вмісту рухомого фосфору дає можливість визначити рівень забезпеченості ґрунту доступними формами цього елемента та оцінити потенційні умови живлення рослин [28].

Для комплексної оцінки впливу біотехнологічного препарату на родючість ґрунту застосовували біологічний тест із використанням швидкорослих культур, зокрема салату або редиски, які часто використовуються в лабораторних біотестах [30]. Насіння висівали у підготовлений ґрунт, після чого рослини вирощувалися у лабораторних умовах за температури приблизно 22–24 °C та достатнього рівня освітлення. У процесі вегетації проводили

спостереження за схожістю насіння, інтенсивністю росту, розвитком кореневої системи та формуванням надземної маси рослин [17, 35].

Вимірювання довжини коренів і пагонів проводили за допомогою міліметрової лінійки, а масу рослинної біомаси визначали шляхом зважування на лабораторних електронних терезах. Усі аналітичні визначення проводили з дотриманням вимог лабораторної точності та повторюваності вимірювань. Перед проведенням аналізів ґрунтові зразки доводили до повітряно-сухого стану, просіювали через сито та зберігали у герметичних контейнерах, що запобігало зміні їх хімічного складу. Визначення агрохімічних показників виконували у кількох повторностях для підвищення достовірності результатів. Використання стандартизованих методик забезпечувало порівнянність отриманих даних із результатами інших наукових досліджень у галузі ґрунтової біотехнології [11, 12, 32].

Комплекс застосованих матеріалів і методів дозволив отримати достовірні дані щодо змін агрохімічних показників ґрунту під впливом біотехнологічного препарату та оцінити його ефективність у моделюванні процесів підвищення родючості [31, 32].

2.3. Постановка експерименту

Постановка експерименту в цьому дослідженні ґрунтувалася на створенні контрольованої моделі ґрунтової системи, що дозволяє простежити вплив біотехнологічного препарату на процеси мінералізації органічних решток і зміну показників родючості за умов, максимально наближених до функціонування агроєкосистеми, але водночас достатньо стабільних для отримання відтворюваних результатів [13, 22]. Експеримент був спроектований таким чином, щоб максимально ізолювати дію досліджуваного біологічного чинника від впливу сторонніх факторів та забезпечити можливість порівняльного аналізу

природного перебігу ґрунтових процесів і процесів, інтенсифікованих біотехнологічним засобом [22, 24].

В основу експериментальної моделі було покладено принцип ідентичності умов для всіх варіантів досліду, за винятком застосування біотехнологічного препарату. Для проведення експерименту використовувався однаковий за походженням та фізико-хімічними характеристиками ґрунтовий матеріал, що попередньо був підготовлений та ретельно перемішаний. Підготовлений ґрунт розподілявся у лабораторні ємності однакового об'єму, у кожен з яких вносилися однакова маса ґрунту. Такий підхід дозволяв мінімізувати вплив природної неоднорідності ґрунту та забезпечував коректність порівняння отриманих результатів.

Для моделювання природного надходження органічної речовини в ґрунт до кожної дослідної ємності вносилися подрібнені рослинні рештки, що імітували післяжнивні залишки сільськогосподарських культур. Рослинний матеріал попередньо висушувався та подрібнювався до дрібної фракції для забезпечення рівномірного розподілу в ґрунтовій масі. Внесення органічного субстрату створювало умови для активізації діяльності ґрунтових мікроорганізмів і дозволяло оцінити швидкість процесів мінералізації органічної речовини під впливом біотехнологічного препарату [23, 32].

Експериментальна схема передбачала два основні варіанти досліду. *Перший варіант* – контроль, що відображав природний перебіг ґрунтових процесів без застосування біологічних стимуляторів. У цьому випадку ґрунт зволожувався лише дистильованою водою, що дозволяло простежити фонову інтенсивність мінералізації органічної речовини та формування доступних форм поживних елементів. *Другий варіант* передбачав внесення біотехнологічного препарату «Байкал ЕМ-1» у вигляді водного розчину. Робочий розчин препарату рівномірно вносився у ґрунтову масу з подальшим перемішуванням, що забезпечувало рівномірний розподіл мікроорганізмів у дослідному субстраті.

Режим зволоження ґрунту підтримувався на рівні приблизно 60–70 % від повної польової вологості, що є оптимальним для розвитку більшості аеробних ґрунтових мікроорганізмів. Контроль вологості здійснювався шляхом регулярного зважування дослідних ємностей і компенсації втрат води шляхом додаткового зволоження дистильованою водою [24]. Температурний режим експерименту підтримувався в межах 22–25 °С, що відповідає умовам активної біологічної діяльності ґрунтової мікрофлори. Такі параметри забезпечували сприятливе середовище для розвитку мікроорганізмів, відповідальних за розкладання органічної речовини та трансформацію поживних елементів [24, 32].

Аерація ґрунту забезпечувалася шляхом вільного доступу повітря до поверхні ґрунтових зразків. Це створювало умови для функціонування аеробних мікроорганізмів, які відіграють основну роль у процесах розкладання органічних сполук. Підтримання аеробних умов дозволяло уникнути розвитку анаеробних процесів, які можуть змінювати характер мінералізації органічної речовини та ускладнювати інтерпретацію результатів дослідження [11, 24].

Тривалість експерименту становила 30 діб, що є достатнім періодом для адаптації внесених мікроорганізмів до умов ґрунтового середовища та прояву їх біологічної активності. Протягом цього часу відбувалися процеси розкладання органічних решток, трансформації сполук азоту та фосфору, а також накопичення доступних форм поживних елементів. Відбір ґрунтових зразків проводився на початковому етапі дослідження для визначення вихідного стану ґрунту та після завершення інкубаційного періоду для оцінки змін, що відбулися під впливом досліджуваного препарату [13, 25]. Для комплексної оцінки впливу експериментальних умов на родючість ґрунту до постановки досліду було включено біологічний компонент у вигляді вирощування швидкорослих рослин. У якості тестових культур використовувалися редис та салат, які характеризуються коротким періодом проростання та швидким ростом. За сприятливих умов насіння цих культур починає проростати вже через 3–5 днів,

що дозволяє швидко оцінити вплив змінених ґрунтових умов на розвиток рослин [17].

Насіння висівали у підготовлений ґрунт контролю дослідних ємностях. Протягом вегетаційного періоду підтримувалися однакові умови освітлення, температури та зволоження для всіх варіантів досліду. У процесі росту рослин проводили спостереження за швидкістю проростання насіння, інтенсивністю росту рослин, розвитком кореневої системи та формуванням надземної біомаси [17].

Порівняння ростових показників рослин дозволяло оцінити реальну доступність поживних елементів у ґрунті та біологічну ефективність застосування біотехнологічного препарату. Таким чином, постановка експерименту була спрямована на створення науково обґрунтованої моделі ґрунтової системи, що дозволяє дослідити вплив біотехнологічного препарату на ключові процеси, які визначають родючість ґрунтів. Контрольовані умови проведення досліду, чітке розмежування експериментальних варіантів та використання біологічного тесту із швидкорослими культурами забезпечили достовірність отриманих результатів і створили основу для подальшого аналізу ефективності застосування біотехнологічних методів у сучасному землеробстві [26, 30].

2.4. Методи обробки результатів

Обробка результатів дослідження була спрямована на узагальнення отриманих експериментальних даних та встановлення закономірностей змін агрохімічних і біологічних показників ґрунту під впливом біотехнологічного препарату [1, 32]. Аналіз результатів розглядався як завершальний етап дослідження, що дозволяє об'єктивно оцінити ефективність застосованого біотехнологічного підходу та визначити його вплив на процеси мінералізації

органічної речовини й формування доступних для рослин форм поживних елементів [11, 30].

На початковому етапі всі результати лабораторних визначень систематизувалися та приводилися до єдиних одиниць вимірювання. Отримані дані перевірялися на коректність та відповідність умовам експерименту. Така перевірка дозволяла виявити можливі випадкові похибки, які могли виникнути під час відбору ґрунтових проб, підготовки зразків або проведення лабораторних аналізів. Для кожного показника формувалися окремі масиви даних, що відображали вихідний стан ґрунту на початку експерименту та зміни, які відбулися після завершення інкубаційного періоду. Це створювало основу для подальшого порівняльного аналізу показників між варіантами досліду [27, 32].

Кількісна обробка результатів передбачала визначення середніх значень досліджуваних показників для кожного варіанту експерименту. Обчислення середніх величин дозволяло зменшити вплив випадкових коливань і отримати узагальнену характеристику стану ґрунтової системи. Разом із середніми значеннями оцінювалася варіабельність показників, що характеризує ступінь однорідності дослідного матеріалу та стабільність перебігу ґрунтових процесів. Аналіз мінливості результатів дозволяв оцінити надійність отриманих даних та визначити ступінь впливу досліджуваного чинника на агрохімічні властивості ґрунту [28].

Подальший етап обробки результатів передбачав порівняння показників між контрольним і дослідним варіантами. Досліджували зміни вмісту нітратної та амонійної форм азоту, які є основними індикаторами інтенсивності мінералізації органічної речовини в ґрунті. Аналіз цих показників дозволяв оцінити активність ґрунтових мікроорганізмів і швидкість перетворення органічних сполук азоту у мінеральні форми, доступні для рослин. Подібний підхід застосовувався і до оцінки вмісту рухомого фосфору, який характеризує рівень мобілізації фосфатів у ґрунтовому середовищі. Порівняння результатів

між варіантами дозволяло встановити, чи сприяє застосування біотехнологічного препарату підвищенню доступності основних елементів живлення.

Для перевірки достовірності отриманих результатів застосовувалися елементи статистичної обробки експериментальних даних [24]. Зокрема використовувалися методи варіаційної статистики, що дозволяють оцінити характер розподілу отриманих значень і визначити ступінь надійності виявлених відмінностей між дослідними варіантами. Статистичні розрахунки дозволяли встановити, чи є зафіксовані зміни наслідком впливу досліджуваного біотехнологічного чинника, чи вони можуть бути пояснені випадковими коливаннями експериментальних даних. Застосування статистичних методів забезпечує наукову обґрунтованість зроблених висновків та відповідає загальноприйнятим вимогам до агрохімічних досліджень [29].

Окрему частину аналізу становила обробка результатів біологічного тесту, що передбачав оцінку росту і розвитку тестових рослин [30, 31]. Для цього визначалися основні біометричні показники, зокрема відсоток схожості насіння, довжина кореневої системи, висота надземної частини рослин та маса сформованої біомаси. Отримані дані узагальнювали для кожного варіанту дослідження та порівнювалися між собою. Біометричні показники розглядали як інтегральний показник стану ґрунтового середовища, оскільки вони відображають сумарний вплив усіх факторів живлення на розвиток рослин.

Інтерпретацію результатів здійснювали на основі комплексного аналізу агрохімічних і біологічних показників. Зміни вмісту поживних елементів у ґрунті розглядали у взаємозв'язку з показниками росту рослин, що дозволяло оцінити не лише кількісні зміни в ґрунтовому середовищі, але й їх практичне значення для рослинного організму. Такий підхід дає змогу повніше оцінити ефективність застосування біотехнологічного препарату та його вплив на функціонування ґрунтової системи.

Під час інтерпретації результатів враховували особливості лабораторного характеру дослідження. Контрольовані умови проведення експерименту

дозволяли мінімізувати вплив зовнішніх факторів і зосередитися на вивченні дії біотехнологічного препарату. Це створювало можливість чітко відокремити ефект препарату від інших факторів середовища, що характерні для польових умов. Водночас отримані результати розглядалися з точки зору їх потенційного практичного застосування в агровиробництві [10, 30].

Таким чином, застосовані методи обробки результатів дозволили систематизувати експериментальні дані, встановити характер змін агрохімічних показників ґрунту та оцінити реакцію рослин на зміну умов живлення. Поєднання кількісного аналізу лабораторних показників із біологічною оцінкою росту рослин забезпечило комплексне дослідження ґрунтової системи та створило наукову основу для формулювання узагальнених висновків щодо ефективності використання біотехнологічних методів для підвищення родючості ґрунтів [26, 30, 32].

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Вплив біотехнологічних методів на родючість ґрунтів

Вплив біотехнологічних методів на родючість ґрунтів у межах проведеного дослідження проявився через сукупність змін агрохімічних і біологічних показників, що відображають інтенсивність ґрунтових процесів і функціональний стан ґрунтової системи [1]. Отримані результати свідчать про те, що застосування біотехнологічного препарату, спрямованого на активізацію мікробіологічних процесів, істотно вплинуло на перебіг мінералізації органічних решток і трансформацію поживних елементів у ґрунті. Зміни, зафіксовані в дослідному варіанті, відрізнялися від природної динаміки ґрунтових процесів, яка спостерігалася у контрольному варіанті без застосування біологічного засобу [13, 30].

Результати агрохімічного аналізу ґрунту на початку та після завершення експерименту свідчать про суттєві зміни поживного режиму під впливом біотехнологічного препарату. Для об'єктивної оцінки динаміки показників родючості було проведено визначення мінеральних форм азоту та фосфору у ґрунті контрольного і дослідного варіантів. Узагальнені результати наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Зміна вмісту мінеральних форм азоту в ґрунті в процесі експерименту

Варіант досліджу	NO ₃ ⁻ , мг/кг (початок)	NO ₃ ⁻ , мг/кг (кінець)	NH ₄ ⁺ , мг/кг (початок)	NH ₄ ⁺ , мг/кг (кінець)
Контрольний	18,2 ± 1,6	22,1 ± 1,8	12,0 ± 1,1	14,3 ± 1,2
Дослідний	18,4 ± 1,5	35,4 ± 2,1	12,1 ± 1,0	21,2 ± 1,6

Аналіз наведених у таблиці даних показує, що на початку експерименту вміст нітратної та амонійної форм азоту в обох варіантах був практично однаковим, що підтверджує ідентичність вихідних умов досліду. Після завершення інкубаційного періоду у контрольному варіанті спостерігалось помірне зростання концентрації мінеральних форм азоту, що відповідає природному перебігу процесів мінералізації органічної речовини [16, 24]. Водночас у ґрунті дослідного варіанту зафіксовано інтенсивніше накопичення як нітратної, так і амонійної форм азоту, що свідчить про активізацію мікробіологічних процесів під впливом біотехнологічного препарату [35]. Отримані результати підтверджують, що застосування біотехнологічних методів сприяє прискоренню трансформації органічно зв'язаного азоту в доступні для рослин форми, що є важливим показником підвищення ефективної родючості ґрунту [30, 32].

Оцінка змін фосфатного режиму ґрунту є не менш важливою, оскільки фосфор належить до елементів, доступність яких часто обмежена. Результати визначення загального та рухомого фосфору наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Зміна фосфатного режиму ґрунту в процесі експерименту

Варіант досліду	Загальний фосфор, мг/кг (початок)	Загальний фосфор, мг/кг (кінець)	Рухомий фосфор, мг/кг (початок)	Рухомий фосфор, мг/кг (кінець)
Контрольний	810 ± 25	805 ± 27	45,2 ± 2,3	48,0 ± 2,4
Дослідний	812 ± 24	808 ± 26	45,4 ± 2,2	62,3 ± 2,7

Наведені дані свідчать, що вміст загального фосфору протягом експерименту суттєво не змінювався в жодному з варіантів, що є закономірним з огляду на коротку тривалість досліду. Водночас у дослідному варіанті

спостерігалось істотне зростання вмісту рухомого фосфору порівняно з контрольним ґрунтом. Це вказує на мобілізацію фосфору з важкодоступних форм у результаті діяльності мікроорганізмів, активізованих біотехнологічним препаратом. Отже, біотехнологічний метод сприяв не збільшенню загального запасу фосфору, а підвищенню його доступності для рослин, що є ключовим критерієм агрономічної ефективності [11, 12].

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що біотехнологічні методи позитивно впливають на поживний режим ґрунту, активізуючи мінералізаційні процеси та підвищуючи вміст доступних форм азоту і фосфору, що безпосередньо визначає рівень його родючості [26].

Аналіз агрохімічних показників показав, що у ґрунті, обробленому біотехнологічним препаратом, відбулися інтенсивніші зміни форм азоту, порівняно з контрольним варіантом. Зростання вмісту нітратної та амонійної форм азоту свідчить про активізацію мінералізації органічної речовини та посилення діяльності мікроорганізмів, які беруть участь у розкладанні рослинних решток [34]. У контрольному ґрунті ці процеси також відбувалися, однак їх інтенсивність була значно нижчою, що вказує на обмежену швидкість природної мінералізації за відсутності додаткової біологічної стимуляції. Отримані результати узгоджуються з сучасними уявленнями про роль мікробіологічних препаратів у регулюванні азотного режиму ґрунтів і підтверджують їх здатність прискорювати перехід органічно зв'язаного азоту у доступні для рослин форми [26, 31, 35].

Зміни фосфатного режиму ґрунту в дослідному варіанті також мали позитивну спрямованість. Підвищення вмісту рухомого фосфору свідчить про мобілізацію важкодоступних сполук цього елемента та їх включення в ґрунтовий обіг [14, 18]. Такий ефект може бути пояснений активізацією фосфат-мобілізуючих мікроорганізмів, які продукують органічні кислоти та ферменти, здатні переводити фосфор із нерозчинних форм у доступні для рослин. У контрольному ґрунті подібні зміни мали менш виражений характер, що

підтверджує залежність фосфатного режиму від біологічної активності ґрунту. З огляду на те, що фосфор є одним із найбільш лімітуючих елементів живлення в багатьох ґрунтах, зафіксоване підвищення його доступності має суттєве значення для оцінки впливу біотехнологічних методів на родючість.

Порівняльний аналіз результатів дозволив встановити, що застосування біотехнологічного препарату не лише прискорює мінералізацію органічних решток, а й сприяє збалансованішому колообігу поживних елементів у ґрунті. Активізація мікробіологічних процесів призводить до швидшого включення азоту і фосфору в ґрунтовий розчин, що підвищує їх доступність для рослин на ранніх етапах росту. Водночас відсутність різкого зниження вмісту органічної речовини свідчить про те, що мінералізація відбувається без порушення загального гумусового балансу, що є важливим аспектом збереження довготривалої родючості ґрунтів [15, 16, 32].

Результати біологічного тесту підтвердили дані агрохімічного аналізу та дозволили оцінити практичну значущість зафіксованих змін. Рослини, вирощені у ґрунті дослідного варіанту, характеризувалися вищими показниками схожості, більш інтенсивним ростом, а також більшим накопиченням надземної і кореневої маси. Така реакція рослин свідчить про поліпшення умов живлення та загального фізіологічного стану ґрунтового середовища [17]. У контрольному варіанті ріст рослин відбувався повільніше, що корелює з нижчим рівнем доступних форм поживних елементів. Біотест дозволив зробити висновок, що зміни агрохімічних показників у ґрунті мають не лише кількісний характер, а й безпосередньо впливають на продуктивність рослин [26, 31].

Важливим аспектом отриманих результатів є пояснення механізмів, через які біотехнологічні методи впливають на родючість ґрунтів. Основним чинником є зростання чисельності та активності корисної мікрофлори, яка бере участь у деструкції органічних решток і трансформації поживних елементів [29]. Внесення біотехнологічного препарату створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів, здатних ефективно використовувати органічний субстрат і включати продукти його

розкладання в біогеохімічні цикли. У результаті ґрунт переходить у більш активний біологічний стан, що проявляється у підвищенні інтенсивності мінералізаційних процесів і зростанні рівня доступності поживних речовин [30, 33].

Отримані дані свідчать про те, що біотехнологічні методи можуть розглядатися як ефективний інструмент підтримання і підвищення родючості ґрунтів, особливо в умовах обмеженого застосування мінеральних добрив або необхідності зменшення хімічного навантаження на агроєкосистеми [1, 12]. Порівняння контрольного і дослідного варіантів чітко показує, що природний перебіг ґрунтових процесів не забезпечує такої ж інтенсивності мінералізації та мобілізації поживних елементів, як за умов цілеспрямованої біологічної стимуляції. Це підтверджує доцільність використання біотехнологічних препаратів як складової сучасних систем управління родючістю [30, 32].

Поряд із цим, результати дослідження свідчать про необхідність науково обґрунтованого застосування біотехнологічних методів з урахуванням властивостей ґрунту, типу органічного субстрату та умов середовища. Ефект від застосування препарату проявляється найбільш чітко за наявності достатньої кількості органічної речовини, яка слугує джерелом енергії для мікроорганізмів. Це підкреслює важливість поєднання біотехнологічних методів із заходами, спрямованими на підтримання органічної складової ґрунту, такими як повернення рослинних решток і використання органічних добрив [11, 34].

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що застосування біотехнологічних методів сприяє підвищенню ефективної родючості ґрунтів за рахунок активізації мікробіологічних процесів, прискорення мінералізації органічних решток і збільшення доступності основних елементів живлення для рослин. Зафіксовані зміни мають не лише лабораторне, а й практичне значення, оскільки вони безпосередньо відображаються на рості та розвитку рослин [17]. Отримані результати дозволяють стверджувати, що застосований біотехнологічний метод є дієвим інструментом підтримання родючості ґрунтів і може бути рекомендований як складова екологічно орієнтованих систем землеробства.

3.2. Порівняльна характеристика результатів

Порівняльна характеристика результатів дослідження ґрунтувалася на зіставленні показників, отриманих у контрольному та дослідному варіантах, що дало змогу виявити характер, спрямованість і ступінь впливу біотехнологічного методу на перебіг ґрунтових процесів та рівень родючості [13, 14]. Основою для порівняння слугували дані агрохімічного аналізу ґрунту та результати біологічного тестування рослин, які в сукупності відображають як кількісні зміни вмісту поживних елементів, так і їх функціональну доступність для рослинного організму. Такий підхід дозволив не обмежуватися фіксацією окремих змін показників, а простежити загальну трансформацію ґрунтового середовища під впливом біотехнологічного препарату [26].

Для поглибленого аналізу ефективності біотехнологічного препарату було проведено порівняння змін агрохімічних показників між контрольним і дослідним варіантами. Узагальнена різниця між кінцевими показниками наведена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Порівняльна характеристика змін агрохімічних показників ґрунту

Показник	Контрольний варіант	Дослідний варіант
Приріст NO_3^- , мг/кг	+3,9	+17,0
Приріст NH_4^+ , мг/кг	+2,3	+9,1
Приріст рухомого фосфору, мг/кг	+2,8	+16,9

Порівняльний аналіз показує, що приріст вмісту доступних форм поживних елементів у дослідному варіанті у кілька разів перевищував відповідні показники контрольного ґрунту [24]. Це свідчить про те, що без застосування біотехнологічного препарату мінералізація рослинних решток відбувається значно повільніше і не забезпечує інтенсивного надходження

поживних елементів у ґрунтовий розчин. Отже, різниця між варіантами має не випадковий, а закономірний характер і зумовлена дією біотехнологічного чинника. Для підтвердження агрохімічних результатів було проведено біологічну оцінку ґрунту з використанням швидкорослих культур [30]. Біометричні показники рослин наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Біометричні показники рослин у біотесті

Показник	Контрольний варіант	Дослідний варіант
Схожість насіння, %	78 ± 4	92 ± 3
Довжина надземної частини, см	$8,1 \pm 0,7$	$12,4 \pm 0,9$
Маса рослини, г	$2,6 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,4$

Аналіз біометричних показників підтверджує, що покращення агрохімічного стану ґрунту в дослідному варіанті супроводжувалося позитивною реакцією рослин [35]. Вища схожість насіння та інтенсивніший ріст свідчать про покращення умов живлення і підвищення ефективної родючості ґрунту. Таким чином, біотехнологічний препарат впливає не лише на хімічні показники, а й на біологічну продуктивність ґрунтової системи [12].

Порівняння вихідних і кінцевих показників у контрольному варіанті засвідчило, що за відсутності біологічної стимуляції процеси мінералізації органічних решток відбуваються повільно й характеризуються обмеженим накопиченням доступних форм поживних елементів. У такому ґрунті спостерігалася лише помірна динаміка вмісту нітратної та амонійної форм азоту, що відповідає природному рівню активності ґрунтової мікрофлори за лабораторних умов. Аналогічна ситуація відзначалася щодо фосфатного режиму, де зміни вмісту рухомого фосфору були незначними й не виходили за межі природних коливань. Це свідчить про те, що без додаткового втручання біологічні процеси в ґрунті не забезпечують достатньо швидкого переходу

поживних елементів у доступні для рослин форми, особливо за умов обмеженого надходження свіжої органічної речовини [34].

На відміну від контрольного варіанту, у ґрунті, обробленому біотехнологічним препаратом, простежувалися чітко виражені позитивні зміни, що дозволяє робити висновок про істотний вплив застосованого методу на родючість. Порівняльний аналіз показав, що в дослідному варіанті інтенсивність накопичення мінеральних форм азоту була значно вищою, що вказує на активізацію мікробіологічних процесів і прискорення розкладання органічних решток. Така різниця між варіантами не може бути пояснена лише природною мінливістю ґрунтових властивостей, оскільки умови проведення експерименту були ідентичними, а є прямим наслідком дії біотехнологічного препарату. Порівняння змін фосфатного режиму також підтвердило ефективність біотехнологічного підходу. У дослідному ґрунті спостерігалось помітніше зростання вмісту рухомого фосфору, що свідчить про залучення цього елемента з важкодоступних резервів. У контрольному варіанті подібний ефект був слабо вираженим, що підкреслює роль мікроорганізмів у процесах мобілізації фосфору. Така різниця має важливе практичне значення, оскільки фосфор часто є лімітуючим фактором продуктивності ґрунтів, а його доступність значною мірою визначає ефективність живлення рослин.

Порівняльна характеристика результатів біологічного тесту дозволила поглибити інтерпретацію агрохімічних даних і підтвердити їх практичну значущість. Рослини, вирощені у ґрунті дослідного варіанту, демонстрували рівномірну та дружну схожість, інтенсивніший ріст надземної частини й краще розвинену кореневу систему. У контрольному варіанті ці показники були нижчими, що відображає обмежену доступність поживних елементів і менш сприятливі умови живлення. Важливо зазначити, що різниця між варіантами проявлялася не лише на початкових етапах росту, а зберігалася протягом усього періоду спостережень, що свідчить про стійкий характер позитивного впливу біотехнологічного препарату [35].

Порівняння результатів дозволяє зробити висновок, що зміни в агрохімічних показниках ґрунту мають безпосередній вплив на продуктивність рослин і не є лише формальним зростанням концентрацій поживних елементів. У дослідному варіанті поживні речовини перебували у формах, доступних для поглинання кореневою системою, що підтверджується біометричними показниками рослин. У контрольному ґрунті навіть за наявності певних запасів поживних елементів їх реальна доступність була обмеженою, що призводило до менш вираженої реакції рослин. Порівняльний аналіз також дозволив пояснити причини виявлених відмінностей між варіантами. Основним чинником, що зумовив позитивні зміни в дослідному ґрунті, є активізація ґрунтової мікрофлори під впливом біотехнологічного препарату. Зростання чисельності та функціональної активності мікроорганізмів сприяло більш інтенсивному розкладанню органічних решток і включенню продуктів цього розкладання в біогеохімічні цикли. У контрольному варіанті подібна активізація не відбувалася, що обмежувало швидкість трансформації поживних елементів. Таким чином, різниця між варіантами має чітке біологічне пояснення і не є випадковою.

Порівняльна характеристика результатів дозволяє також оцінити ефективність біотехнологічного методу з позицій практичного землеробства. Отримані дані свідчать про те, що застосування препарату сприяє підвищенню ефективної родючості ґрунту без необхідності внесення додаткових мінеральних добрив. Це особливо важливо в умовах зростання вартості агрохімічних ресурсів і необхідності зменшення антропогенного навантаження на ґрунтові екосистеми. Порівняння контрольного і дослідного варіантів показує, що біотехнологічний метод дозволяє повніше використовувати внутрішні резерви ґрунту, зокрема органічну речовину і важкодоступні форми поживних елементів [35].

Узагальнюючи порівняльні результати, можна стверджувати, що застосований біотехнологічний препарат має чітко виражений позитивний вплив на родючість ґрунтів, який проявляється як на рівні агрохімічних показників, так і на рівні росту та розвитку рослин. Порівняння з контрольним варіантом

переконливо доводить, що за відсутності біологічної стимуляції ґрунт не демонструє такої ж інтенсивності мінералізаційних і мобілізаційних процесів. Отримані результати дають підстави вважати, що використаний метод є дієвим інструментом підвищення родючості ґрунтів і може бути рекомендований для практичного застосування як складова сучасних, екологічно орієнтованих систем землеробства.

3.3. Практичне значення

Практичне значення проведеного дослідження полягає в експериментальному підтвердженні можливості використання біотехнологічного препарату для прискорення мінералізації рослинних решток і підвищення ефективної родючості ґрунту. На відміну від теоретичних узагальнень, у межах роботи було реалізовано модельний лабораторний експеримент, який дозволив кількісно оцінити зміни агрохімічних показників ґрунту та простежити їхній вплив на ріст і розвиток рослин.

Перед початком експерименту з кожного варіанту було відібрано ґрунтові зразки для визначення вихідних агрохімічних показників. Початковий аналіз показав, що вміст нітратної форми азоту в ґрунті контрольного і дослідного варіантів становив у середньому близько 18 мг/кг ґрунту, а вміст амонійної форми азоту перебував на рівні близько 12 мг/кг. Рухомий фосфор на початку експерименту становив приблизно 45 мг/кг ґрунту, що характерно для середнього рівня забезпеченості. Таким чином, вихідний стан ґрунту в обох ящиках був практично ідентичним, що підтверджує коректність постановки дослідів [33].

Статистичне опрацювання експериментальних даних здійснювалося з метою перевірки достовірності відмінностей між контрольним і дослідним варіантами та кількісного підтвердження ефективності застосованого біотехнологічного препарату. Для цього використовували методи варіаційної статистики, зокрема порівняння середніх значень показників із застосуванням t-

критерію Стюдента, який є загальноприйнятим для аналізу результатів лабораторних агрохімічних і біологічних досліджень. Статистичну значущість відмінностей оцінювали на рівні ймовірності $p \leq 0,05$.

Результати агрохімічного аналізу ґрунту після завершення експерименту узагальнено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Агрохімічні показники ґрунту після завершення експерименту

Показник	Контрольний варіант, $\bar{x} \pm s$	Дослідний варіант, $\bar{x} \pm s$
Нітратний азот, мг/кг	$22,1 \pm 1,8$	$35,4 \pm 2,1$
Амонійний азот, мг/кг	$14,3 \pm 1,2$	$21,2 \pm 1,6$
Рухомий фосфор, мг/кг	$48,0 \pm 2,4$	$62,3 \pm 2,7$

Примітка. $\bar{x}$ – середнє арифметичне значення показника; s – середньоквадратичне відхилення.

Аналіз наведених у таблиці даних свідчить про суттєве зростання вмісту доступних форм азоту та фосфору в ґрунті дослідного варіанту порівняно з контрольним. Для перевірки статистичної значущості цих відмінностей застосовувався t-критерій Стюдента, який розраховувався за формулою:

$t = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2| / \sqrt{(s_1^2 / n_1 + s_2^2 / n_2)}$ де $\bar{x}_1$ і $\bar{x}_2$ – середні арифметичні значення показника у контрольному та дослідному варіантах відповідно, s_1 і s_2 – середньоквадратичні відхилення, n_1 і n_2 – кількість повторень у кожному варіанті.

Розраховані значення t перевищували табличне значення критерію для відповідної кількості ступенів вільності при рівні значущості $p \leq 0,05$, що свідчить про статистично достовірний характер відмінностей між контрольним і дослідним варіантами. Таким чином, зафіксоване підвищення вмісту нітратної та амонійної форм азоту, а також рухомого фосфору є результатом дії біотехнологічного препарату, а не випадкових коливань.

Таблиця 3.2

Біометричні показники рослин у біотесті

Показник	Контрольний варіант, $\bar{x} \pm s$	Дослідний варіант, $\bar{x} \pm s$
Схожість насіння, %	78 ± 4	92 ± 3
Довжина надземної частини, см	$8,1 \pm 0,7$	$12,4 \pm 0,9$
Маса однієї рослини, г	$2,6 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,4$

Примітка. $\bar{x}$ – середнє арифметичне значення показника; s – середньоквадратичне відхилення.

Статистичний аналіз біометричних показників рослин показав, що всі відмінності між контрольним і дослідним варіантами є статистично достовірними на рівні $p \leq 0,05$. Підвищення схожості насіння у ґрунті, обробленому біотехнологічним препаратом, свідчить про покращення стартових умов проростання. Збільшення довжини надземної частини та маси рослин відображає інтенсивніший ріст і розвиток, що безпосередньо пов'язано з підвищенням доступності поживних елементів у ґрунті.

Поєднання агрохімічних показників, підтверджених статистичною обробкою, з результатами біологічного тестування дозволяє зробити науково обґрунтований висновок про ефективність застосованого біотехнологічного методу. Достовірні відмінності між контрольним і дослідним варіантами підтверджують, що препарат дійсно прискорює мінералізацію рослинних решток, підвищує доступність основних елементів живлення та забезпечує реальне зростання ефективної родючості ґрунту, що має безпосереднє практичне значення для сучасного землеробства. Отримані експериментальні дані дозволяють зробити практично значущий висновок про те, що застосування біотехнологічного препарату дійсно сприяє прискоренню мінералізації рослинних решток і підвищенню доступності основних елементів живлення. Різниця між контрольним і дослідним варіантами має чітке кількісне вираження і підтверджується як агрохімічними аналізами, так і результатами біологічного

тестування. Це дає підстави вважати використаний метод ефективним інструментом підвищення родючості ґрунтів.

Практичне значення експерименту полягає також у можливості його використання як універсальної моделі для попередньої оцінки біотехнологічних препаратів у виробничих умовах. Запропонований підхід може бути адаптований для різних типів ґрунтів, культур і біопрепаратів, що робить його корисним як для наукових досліджень, так і для практики аграрного виробництва.

Отримані результати підтверджують, що біотехнологічні методи є реальним і дієвим засобом підтримання родючості ґрунтів і можуть бути рекомендовані для впровадження в системи екологічно орієнтованого землеробства.

ВИСНОВКИ

Проведено оцінку впливу мікробіологічного препарату «Байкал ЕМ-1» на родючість ґрунтів шляхом визначення змін у вмісті доступних форм азоту та фосфору, а також аналіз змін біометричних характеристик тестових рослин (схожість насіння, довжина проростків, маса рослин) за впливу цього препарату в умовах лабораторного експерименту. Підтверджено ефективність препарату «Байкал ЕМ-1» в регулюванні ґрунтових процесів; встановлено прямий зв'язок між змінами агрохімічних показників ґрунту та біологічною реакцією рослин. Отримані дані свідчать про реальну ефективність біотехнологічного методу як засобу підвищення родючості ґрунтів та підтверджують перспективність його використання в сучасних агробіотехнологіях.

1. Встановлено, що вміст загального фосфору протягом експерименту суттєво не змінювався і в досліді, і в контролі, що є закономірним з огляду на коротку тривалість досліду. Водночас у дослідному варіанті спостерігалось істотне зростання вмісту рухомого фосфору – у 6 разів порівняно з контролем. Це вказує на мобілізацію фосфору з важкодоступних форм у результаті діяльності мікроорганізмів, активізованих мікробним препаратом. Отже, біотехнологічний метод сприяв не збільшенню загального запасу фосфору, а підвищенню його доступності для рослин, що є ключовим критерієм агрономічної ефективності.

2. Виявлено, що під кінець експерименту у контрольному варіанті спостерігали помірне зростання концентрації мінеральних форм азоту, що відповідає природному перебігу процесів мінералізації органічної речовини. Водночас у ґрунті дослідного варіанту зафіксовано інтенсивніше накопичення як нітратної – у 4 рази, порівняно з контролем так і амонійної – у 4,4 рази порівняно з контролем, форм азоту. Це свідчить про активізацію

мікробіологічних процесів під впливом біотехнологічного препарату «Байкал ЕМ-1».

3. Порівняльний аналіз показує, що приріст вмісту доступних форм поживних елементів у дослідному варіанті у кілька разів перевищував відповідні показники у контролі. Отже, без застосування біотехнологічного препарату мінералізація рослинних решток відбувається значно повільніше і не забезпечує інтенсивного надходження поживних елементів у ґрунтовий розчин.

4. Рослини, вирощені у ґрунті з препаратом (дослідний варіант), демонстрували більшу схожість насіння, інтенсивніший ріст надземної частини й краще розвинену кореневу систему, порівняло з контролем. Відмінності між варіантами проявлялася не лише на початкових етапах росту, а зберігалася протягом усього періоду спостережень, що свідчить про стійкий характер позитивного впливу препарату «Байкал М2».

5. Проведене дослідження підтверджує розуміння того, що біотехнологічні методи є інструментами підтримання та підвищення родючості ґрунтів, а запропонований підхід може бути адаптований для різних типів ґрунтів, культур і біопрепаратів, що робить його корисним як для наукових досліджень, так і для аграрного виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Супутник агронома : довідник / Є. М. Білецький, М. А. Бобро, С. Ю. Булигін та ін. ; за ред. С. Ю. Булигіна. – Харків : ХНАУ, 2022. – 256 с.
2. Зміна клімату та сільське господарство в Україні: що варто знати фермерам? – 2022. – Режим доступу: <https://climateadapt.enefcities.org.ua/wp-content/uploads/2022/10/zmina-klimatu-ta-silske-gospodarstvo-v-ukrayini.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).
3. Примак І. Д., Адаменко Т. І., Єщенко В. О. Метеорологічні небезпечні явища і несприятливі умови в землеробстві України : навчальний посібник. – Вінниця : Нілан-ЛТД, 2023. – 400 с.
4. Характеристика Полісся України. – 2024. – Режим доступу: https://allref.com.ua/uk/skachaty/Harakteristika_Polissya (дата звернення: 19.02.2026).
5. Провідні ланки систем землеробства Лісостепу України. – 2023. – Режим доступу: <http://www.tsatu.edu.ua/ros1/wp-content/uploads/sites/20/lekcija-13.providni-lanky-system-zemlerobstva-lisostepu-.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).
6. Степова зона України: клімат, води, ґрунти, рослинність і тваринний світ. – 2024. – Режим доступу: https://geoknigi.com/book_view.php?id=815 (дата звернення: 19.02.2026).
7. Географія врожаїв. Північний Степ: агрокліматичні особливості. – 2025. – Режим доступу: <https://agravery.com> (дата звернення: 18.02.2026).
8. Клімат України та відображення його показників на кліматичній карті. – 2023. – Режим доступу: <https://storymaps.arcgis.com/stories/7c1e5428b65e4514bbb266983b54832c> (дата звернення: 18.02.2026).
9. Адаменко Т. І. Агрокліматичне зонування території України з урахуванням змін клімату. – Київ : РІА-БЛІЦ, 2024. – 20 с. – Режим доступу:

https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee_files/idmp-cee/idmp-agroclimatic.pdf (дата звернення: 19.02.2026).

10. Під ударом стихії: міграція кліматичних зон в Україні. – 2025. – Режим доступу: <https://landlord.ua/wp-content/page/pid-udarom-stykhii-iak-mihruut-klimatychni-zony-v-ukraini> (дата звернення: 19.02.2026).
11. Камінський В. Ф., Гадзало Я. М., Сайко В. Ф., Корнійчук М. С. Землеробство ХХІ століття: проблеми та шляхи вирішення. – Київ : Едельвейс, 2022. – 272 с.
12. Балюк С. А., Медведєв В. В., Носко Б. С. Адаптація агротехнологій до змін клімату: ґрунтово-агрохімічні аспекти. – Харків, 2023. – 364 с.
13. Практикум із загального і меліоративного землеробства / Ю. В. Будьонний, С. І. Попов, Н. І. Бухало та ін. ; за ред. Ю. В. Будьонного, С. І. Попова. – Харків : ХНАУ, 2022. – 286 с.
14. Практикум з ґрунтознавства : навчальний посібник / за ред. Д. Г. Тихоненка. – Харків : Майдан, 2023. – 447 с.
15. Аналіз і захист ґрунту. – 2024. – Режим доступу: <https://www.vaderstad.com/ua/know-how-agroporady/osnova-agronomii/analiz-i-zahust-grynty> (дата звернення: 19.02.2026).
16. Черячукін М., Семеняка І., Мащенко Ю., Матях А. Вплив добрив і сівозмін на агрофізичні властивості ґрунту. – 2025. – Режим доступу: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/24430-vplyv-dobryv-i-sivozmin-na-ahrofizychni-vlastyivosti-gruntu.html> (дата звернення: 19.02.2026).
17. Структура ґрунту як визначальний фактор розвитку кореневої системи буряків. – 2024. – Режим доступу: <http://www.ukrsugar.com/uk/post/struktura-gruntu-e-viznacalnim-faktorom-u-pravilnomu-rozvitku-korenevoi-sistemi-burakiv> (дата звернення: 19.02.2026).

18. Агрофізично орієнтоване районування земель за властивостями ґрунтів / В. В. Медведєв, Т. М. Лактіонова, І. В. Пліско та ін. – Харків : Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського, 2022. – 96 с.
19. Агрофізична характеристика та структура ґрунтів. – 2023. – Режим доступу: <http://www.tsatu.edu.ua/ros1/wp-content/uploads/sites/20/lekcija-12-ahrofizychna-harakterystyka-ta-struktura-hruntiv.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).
20. Пластичність ґрунту. – 2024. – Режим доступу: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/plastichnist-gruntu-id22755> (дата звернення: 19.02.2026).
21. Липкість ґрунту. – 2024. – Режим доступу: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/lipkist-gruntu-id22756> (дата звернення: 19.02.2026).
22. Сій у грязь – будеш князь? – 2025. – Режим доступу: <http://olgopol.com.ua/posts/siy-u-hryaz-budesh-knyaz> (дата звернення: 19.02.2026).
23. Період між настанням фізіологічної стиглості ґрунту та строками сівби скорочується. – 2025. – Режим доступу: <https://superagronom.com/news/18586-period-mij-nastannyam-fiziologichnoyi-stiglosti-gruntu-ta-strokami-sivbi-skorochuyetsya> (дата звернення: 19.02.2026).
24. Назаренко І. І., Смага І. С., Польчина С. М., Черлінка В. Р. Землеробство та меліорація : підручник. – Чернівці : Книги-XXI, 2022. – 543 с.
25. Визначення вологості ґрунту термостатно-ваговим методом. – 2024. – Режим доступу: <https://jak.koshachek.com/articles/viznachennja-vologosti-gruntu-termostatno-vagovij.html> (дата звернення: 19.02.2026).
26. Іваненко О. В. Біотехнологічні засоби підвищення родючості ґрунтів у системах органічного землеробства / О. В. Іваненко, Л. П. Марченко // Аграрна наука України. – 2023. – Вип. 2. – С. 55–65.

27. Ковальчук В. І., Петренко С. М. Вплив мікробіологічних препаратів на фізико-хімічні властивості ґрунтів Лісостепу України / В. І. Ковальчук, С. М. Петренко // Ґрунтознавство та агрохімія. – 2024. – Т. 45, № 1. – С. 112–124.
28. Бондаренко Т. Л. Роль асоціацій мікоризних грибів у підвищенні доступності фосфору для рослин / Т. Л. Бондаренко // Вісник біотехнології та агросферних досліджень. – 2025. – Вип. 11. – С. 88–102.
29. Мельник Ю. О., Савченко І. В. Використання комплексних мікробних препаратів для активації мінералізації рослинних решток / Ю. О. Мельник, І. В. Савченко // Технології живлення рослин. – 2023. – № 3. – С. 23–39.
30. Клименко О. М. Практичне застосування біопрепаратів у системах землеробства: оцінка ефективності та вплив на родючість ґрунтів / О. М. Клименко // Агрономія: наукові тенденції, виклики і рішення. – Харків : ХНАУ, 2022. – С. 150–169.
31. Сидоренко Л. Г. Біоудобрення та фітоімунна стимуляція культур в умовах зміни клімату / Л. Г. Сидоренко // Екологічні аспекти сталого землеробства. – Львів : Видавництво ЛНАУ, 2024. – С. 45–61.
32. Грищенко В. П. Мікробіологічні препарати в сучасних системах землеробства: теорія і практика / В. П. Грищенко // Агроекологія. – 2025. – Т. 12, № 4. – С. 5–22.
33. Панасюк І. М., Лук'яненко К. І. Мікориза як біотехнологічний засіб підвищення родючості чорноземних ґрунтів / І. М. Панасюк, К. І. Лук'яненко // Наукові вісті УААН. – 2023. – Вип. 59, Т. 1. – С. 200–215.
34. Заболотний А. Ф. Біодеструктори органічних решток у технології вирощування зернових культур / А. Ф. Заболотний // Техногенно-екологічні проблеми агропромислового комплексу. – 2024. – № 8. – С. 134–147.
35. Литвиненко М. В. Вплив внесення мікроорганізмів-азотфіксаторів на ріст і продуктивність бобових культур / М. В. Литвиненко // Біотехнології в сільському господарстві. – 2025. – Вип. 6. – С. 77–91.

ДОДАТКИ

Додаток А

Підготовлений ґрунт з рослинними в експериментальному горщику



Пластичність ґрунту

