

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Зав. кафедрою екології
доц. _____ Вікторія КАЦЕВИЧ
« _____ » грудня 2025р.

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «магістр»
на тему: «Оптимізація екологічного стану ґрунтів за дії біодеструкторів в
умовах Дніпропетровській області»

Виконав: здобувач вищої освіти 2 курсу, групи
МгЕ-1-24 спеціальності
101 «Екологія»
_____ Долженко Д.В.

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

Дніпро 2025

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Водогосподарської інженерії та екології

Кафедра: Екології

Освітньо-професійна програма: «Екологія»

Спеціальність: 101 «Екологія»

Ступінь вищої освіти: Магістр

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою екології

_____ Вікторія КАЦЕВИЧ

«_____» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на підготовку кваліфікаційної роботи

Долженко Дмитро Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оптимізація екологічного стану ґрунтів за дії біодеструкторів в умовах Дніпропетровській області

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

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

затверджена наказом по ДДАЕУ від «15» жовтня 2025 р. №3074.

2. Термін здачі здобувачем вищої освіти закінченого проекту (роботи):

«16» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: звіти, дані власних експериментів та спостережень

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

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

5 рисунків та 13 таблиць та 61 посилань, Сторінок – 80.

Дата видачі завдання: «3» вересня 2025 р.

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

Завдання прийняв до виконання: _____ / Долженко Д.В.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач _____ / (Долженко Д.В.) /
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Тема дипломної роботи: «Оптимізація екологічного стану ґрунтів за дії біодеструкторів в умовах Дніпропетровської області». Дипломна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг роботи становить 79 сторінок друкованого тексту, включаючи 5 рисунків та 13 таблиць. Перелік посилань містить 61 найменування.

Мета дослідження – з'ясувати особливості розкладання соломи озимої пшениці та соняшнику під дією біодеструкторів і оцінити ефективність препаратів «Біонорма» та «Целюлад» у активізації целюлозоруйнівної мікрофлори за різних кліматичних умов.

Об'єкт дослідження – процес деградації соломи в агроєкосистемах Степової зони Дніпропетровської області. Предмет дослідження – мікробіологічна активність ґрунту, показники деструкції соломи та ефективність дії біодеструкторів «Біонорма» і «Целюлад» на рослинні рештки різного походження.

З метою досягнення визначеної мети сформульовано наступні завдання:

- Дослідити кількість целюлозоруйнівних мікроорганізмів у ґрунті за внесення соломи різного походження.
- Оцінити ефективність біодеструкторів «Біонорма» та «Целюлад».
- Визначити вплив температури й вологості на розкладання соломи.
- Проаналізувати хімічні властивості соломи пшениці й соняшнику.

Методи дослідження: мікробіологічний аналіз ґрунту, визначення кількісного складу целюлозоруйнівних мікроорганізмів.

Ключові слова: СОЛОМА, БІОДЕСТРУКЦІЯ, ЦЕЛЮЛОЗОРУЙНІВНІ МІКРООРГАНІЗМИ, МІКРОБІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ ҐРУНТУ, БІОДЕСТРУКТОРИ, ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ҐРУНТІВ, ГУМУСОУТВОРЕННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОСНОВИ БІОДЕСТРУКЦІЇ РОСЛИННИХ РЕШТОК.	8
1.1 Природна деструкція рослинних решток.	8
1.2 Екологічні аспекти застосування соломи як добрива.	10
1.3 Хімічний склад соломи.	13
1.4 Мікроорганізми біодеструктори соломи.	20
1.5 Вплив соломи на процес відтворення органічної речовини у ґрунті. .	25
1.6 Сезонна активність ґрунтової мікрофлори.	30
1.7 Технологічні схеми застосування соломи.	32
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.	34
2.1 Об'єкт та місце проведення досліджень.	34
2.2 Характеристика особливостей культур.	36
2.3 Ґрунтово-кліматичні умови.	38
2.4 Технологія внесення препаратів.	42
2.5 Методи визначення мікробіологічної активності.	44
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.	46
3.1 Вплив біодеструкторів на швидкість розкладання	46
3.2 Мікробіологічні показники процесу біодеструкції.	50
3.3 Визначення целюлозолітичної активності.	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.	64
4.1 Безпека під час польових робіт.	64
4.2 Безпека роботи з біопрепаратами.	65
4.3 Безпека при лабораторних роботах.	68
ВИСНОВКИ.	70
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.	73

ВСТУП

Ефективне використання рослинних залишків, зокрема соломи, є одним із ключових напрямів забезпечення сталого функціонування агроєкосистем, особливо в умовах сучасного інтенсивного землеробства. Солома виступає вагомим джерелом органічної речовини, яка бере участь у формуванні гумусу, покращує структуру ґрунту, підвищує вологоутримувальну здатність та стабілізує його біологічну активність. У Степовій зоні України, зокрема в Дніпропетровській області, питання ефективного розкладання соломи є надзвичайно актуальним через поєднання кліматичних факторів, що обмежують природну мікробіологічну активність, а також через поступове зниження вмісту гумусу в ґрунтах регіону.

Одним із ключових факторів, що визначають швидкість мінералізації соломи, є її хімічний склад та структурні особливості. Солома озимої пшениці характеризується відносно швидким природним розкладанням, тоді як солом соняшнику через високий вміст лігніну та фенольних сполук є значно стійкішою до мікробіологічної деградації. Це створює необхідність застосування біологічних препаратів-біодеструкторів, здатних активізувати целюлозоруйнівну мікрофлору та прискорювати процеси розкладання рослинних решток. Використання таких препаратів дає можливість регулювати мікробіологічні процеси у ґрунті, забезпечуючи більш рівномірне та ефективне включення соломи в цикл органічної речовини.

Сучасні кліматичні зміни, що проявляються у підвищенні температури повітря, збільшенні тривалості посушливих періодів і зменшенні кількості доступної ґрунтової вологи, суттєво впливають на активність мікробіоти та інтенсивність деструкційних процесів. Для умов Дніпропетровської області характерна виражена сезонність мінералізації соломи, коли максимальна

активність мікроорганізмів спостерігається навесні та восени, а в літній період відбувається значне пригнічення біологічних процесів. Тому впровадження технологій керованої біодеструкції є важливою умовою адаптації агровиробництва до кліматичних викликів та збереження родючості ґрунтів.

Застосування біодеструкторів, таких як «Біонорма» та «Целюлад», створює можливість суттєвого прискорення розкладання соломи, оптимізації структури мікробного угруповання та покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту. Вивчення їх дії в конкретних кліматичних умовах Дніпропетровщини дозволяє обґрунтувати вибір найбільш ефективного препарату, визначити особливості його взаємодії з різними видами соломи та розробити рекомендації щодо інтеграції в систему удобрення та обробітку ґрунту.

Таким чином, дослідження процесів деструкції соломи та впливу біодеструкторів на мікробіологічну активність ґрунту є важливим напрямом забезпечення екологічної рівноваги агроєкосистем та відновлення їх родючості. Значущість цього дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності використання рослинних решток, так і потребою адаптації технологій землеробства до змін клімату, що визначає наукову й практичну значущість проведених досліджень.

1 ОСНОВИ БІОДЕСТРУКЦІЇ РОСЛИННИХ РЕШТОК

1.1 Природна деструкція рослинних решток

Природна деструкція рослинних решток є одним із ключових процесів трансформації органічної речовини в агроєкосистемах і має визначальне значення для формування родючості ґрунтів. Після збирання врожаю значна частина біомаси залишається на поверхні поля у вигляді соломи, стерні, післяжнивних решток та кореневих залишків. У процесі їх природного розкладання відбувається повернення поживних елементів у ґрунт, включення їх у біогеохімічні цикли та створення умов для формування нової рослинної продукції [1].

Природна деструкція є складним багатоступеневим процесом, що відбувається за участі комплексу ґрунтових мікроорганізмів, ґрунтової фауни та під впливом фізико-хімічних чинників середовища. На початкових етапах розкладання рослинних решток відбувається руйнування легкодоступних органічних сполук — цукрів, амінокислот, органічних кислот, які швидко споживаються гетеротрофними мікроорганізмами. На наступних стадіях у процес деструкції залучаються більш складні сполуки — целюлоза, геміцелюлоза та лігнін, розкладання яких потребує спеціалізованої ферментативної активності [2].

Основну роль у природній деструкції рослинних решток відіграють целюлозоруйнівні бактерії та мікроскопічні гриби, які синтезують комплекс гідролітичних і окиснювальних ферментів. Вони забезпечують поступовий розклад структурних компонентів рослинної клітини та трансформацію органічної речовини у простіші сполуки. Значний внесок у процесі деструкції

роблять також ґрунтові безхребетні — дощові черв'яки, кліщі, личинки комах, які подрібнюють рослинні рештки, збільшуючи площу їх контакту з мікроорганізмами та прискорюючи мікробіологічні процеси [3].

Характер і швидкість природної деструкції значною мірою залежать від хімічного складу рослинних решток. Солома злакових культур відрізняється високим умістом целюлози та лігніну і низьким умістом азоту, що зумовлює її повільне розкладання. Післяжнивні рештки соняшника мають іншу структуру, більшу щільність і підвищений уміст лігнінових сполук, унаслідок чого вони піддаються деструкції ще повільніше. Високе співвідношення вуглецю до азоту (C:N) у таких рештках обмежує розвиток мікроорганізмів на початкових етапах розкладання та може спричиняти тимчасову іммобілізацію мінерального азоту.

Важливим фактором, що визначає інтенсивність природної деструкції рослинних решток, є кліматичні умови. Температура, вологість та аерація ґрунту безпосередньо впливають на активність ґрунтової біоти. Оптимальні умови для розкладання формуються за помірних температур і достатнього зволоження. За дефіциту вологи мікробіологічні процеси різко сповільнюються, а за надмірного зволоження можуть переходити в анаеробний режим із накопиченням недоокиснених продуктів розпаду [4].

Процес природної деструкції має чітко виражений сезонний характер. Найвищу активність він проявляє у весняний та осінній періоди, коли поєднуються оптимальні температурні умови та достатнє зволоження ґрунту. Влітку за високих температур і дефіциту вологи процеси розкладання суттєво уповільнюються, а взимку практично припиняються через низькі температури та фізіологічну неактивність мікроорганізмів. Таким чином, природна деструкція в агроценозах відбувається нерівномірно і значною мірою визначається погодними умовами конкретного року.

У ґрунтово-кліматичних умовах степової зони природна деструкція рослинних решток часто є обмеженою через поєднання високих літніх температур, нерівномірного зволоження та періодичних посух. Це призводить до накопичення значних обсягів післяжнивних решток на поверхні поля та їх

повільного включення у ґрунті біологічні цикли. За таких умов знижується швидкість повернення поживних елементів у ґрунт, послаблюються процеси гумусоутворення й зростає ризик деградації ґрунтового покриву [5].

У процесі природної деструкції частина органічної речовини повністю мінералізується до простих неорганічних сполук, тоді як інша частина трансформується у стабільні гумусові речовини. Саме баланс між процесами мінералізації та гуміфікації визначає напрям змін родючості ґрунту. За несприятливих умов або повільного розкладання рослинних решток відбувається уповільнення гумусоутворення та зниження біологічної активності ґрунту [6].

1.2 Екологічні аспекти застосування соломи як добрива

Застосування соломи як органічного добрива є одним із найважливіших екологічно обґрунтованих напрямів сучасного землеробства, оскільки забезпечує раціональне використання побічної продукції рослинництва та сприяє збереженню родючості ґрунтів. Солома є значним джерелом органічної речовини, яка після надходження до ґрунту включається в біогеохімічні цикли та бере участь у процесах гумусоутворення. У результаті мінералізації соломи поживні елементи поступово переходять у доступні для рослин форми, не спричиняючи різких коливань хімічного складу ґрунтового розчину. Це знижує ризик забруднення ґрунтів і підземних вод нітратами, фосфатами та іншими сполуками, що є характерним для надмірного застосування мінеральних добрив.

Однією з важливих екологічних функцій соломи є її здатність підтримувати сталий баланс органічної речовини в ґрунті. За рахунок повільного розкладання солома забезпечує тривале надходження вуглецю, який є основним енергетичним субстратом для ґрунтової мікрофлори. Це сприяє активізації мікробіологічних процесів, стабілізації гумусового стану ґрунтів і зменшенню деградаційних процесів, зокрема дегуміфікації та вторинної мінералізації.

Органічні рештки також відіграють важливу роль у формуванні агрофізичних властивостей ґрунту, зокрема сприяють поліпшенню його структури, підвищенню водопроникності, вологоємності та аерації [7].

Рівномірне розміщення соломи на площі поля або її загортання у верхній шар ґрунту створює захисний мульчувальний шар, який зменшує інтенсивність фізичного випаровування вологи, перешкоджає перегріванню поверхні ґрунту в літній період та знижує ризик утворення ґрунтової кірки. Таким чином, солома виконує важливу ґрунтозахисну функцію, запобігаючи розвитку водної та вітрової ерозії. Умови під мульчувальним шаром сприяють формуванню стабільнішого мікроклімату, що є сприятливим для розвитку ґрунтових мікроорганізмів і безхребетних [8].

Солома також виконує роль природного екологічного фільтра, перешкоджаючи вимиванню поживних елементів у глибші горизонти ґрунту. Особливо важливим є її бар'єрний ефект щодо міграції нітратного азоту, який за відсутності органічної речовини швидко переміщується профілем ґрунту та потрапляє у ґрунтові води. Присутність соломи в ґрунті сприяє фіксації азоту мікроорганізмами та його включенню до біомаси, що значно зменшує рівень антропогенного забруднення водних екосистем [9].

Внесення соломи позитивно впливає на розвиток ґрунтової біоти. У ґрунті активізуються популяції целюлозоруйнівних бактерій і мікроскопічних грибів, які відіграють провідну роль у розкладанні рослинних решток. Одночасно зростає чисельність дощових черв'яків, енхітреїд, комах та інших організмів, що залучені до перетворення органічної речовини. Їхня життєдіяльність сприяє формуванню водостійкої грудкуватої структури ґрунту, покращенню його пористості та активізації процесів самоочищення ґрунтового середовища.

Однак, попри очевидні екологічні переваги використання соломи як добрива, в агровиробництві тривалий час застосовується практика її спалювання, яка є одним із найбільш екологічно небезпечних способів утилізації рослинних решток. Під час згоряння соломи формується значне термічне навантаження на

ґрунт, що призводить до руйнування гумусового шару, порушення структури ґрунтових агрегатів та різкого зниження біологічної активності. Температура на поверхні ґрунту під час горіння соломи може сягати критичних значень, за яких відбувається загибель переважної частини мікроорганізмів, а також ґрунтових безхребетних [10].

Термічний вплив спричиняє суттєве зниження активності ферментів, що забезпечують трансформацію органічної матерії, зокрема дегідрогенази, інвертази та поліфенолоксидази. Зменшення їх активності свідчить про пригнічення мікробіологічних процесів, порушення вуглецевого циклу та гальмування гумусоутворення. Відновлення ферментативної активності після спалювання є тривалим і потребує значного часу, що негативно позначається на екологічному стані ґрунту.

Під час спалювання соломи також відбуваються великі втрати органічного вуглецю та азоту, які безповоротно вивільнюються в атмосферу у вигляді газоподібних сполук. Це не лише знижує потенційну родючість ґрунту, а й сприяє посиленню парникового ефекту через емісії діоксиду вуглецю та оксидів азоту та дрібнодисперсних аерозолів. Таким чином, спалювання соломи негативно впливає не тільки на ґрунтову екосистему, а й на якість атмосферного повітря та загальний кліматичний баланс [11].

Крім того, встановлено, що після спалювання соломи змінюється чисельність і співвідношення основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів у верхніх шарах ґрунту. Найбільш чутливими до дії високих температур є органотрофні бактерії та мікроскопічні гриби, які відіграють ключову роль у розкладанні органічної речовини. Їх різке скорочення призводить до порушення природних механізмів самоочищення ґрунту та зниження його біологічної продуктивності. В подальшому відбувається зміна структури мікробного угруповання, зростає частка термостійких форм, які є менш ефективними у процесах гумусоутворення.

Важливим екологічним аспектом є також правове регулювання процесу спалювання рослинних решток. Відповідно до чинного законодавства України

неправомірне випалювання сухих рослинних залишків заборонене та тягне за собою накладення адміністративних санкцій. Спалювання стерні допускається лише у виняткових випадках за умови масового ураження посівів небезпечними хворобами та виключно за рішенням відповідних контролюючих органів. Це свідчить про усвідомлення державою високої екологічної шкоди від цього процесу [12].

1.3 Хімічний склад соломи

Солома є побічною продукцією зернових культур і являє собою сукупність стебел та листків, що залишаються після обмолоту врожаю. Її довжина варіює в досить широких межах — від 30 до 180 см — залежно від біологічних особливостей культури та сорту, погодних умов у період вегетації, а також застосування регуляторів росту, що впливають на висоту рослин. Солома ярих культур, як правило, характеризується більшою м'якістю та меншою міцністю порівняно з соломою озимих, що зумовлює її переважне використання для кормових потреб. Натомість солома озимих культур є більш придатною для застосування як підстилковий матеріал та органічне добриво [13].

Значний вплив на фізичні характеристики соломи має спосіб її збирання. Використання комбайнового збирання з подрібнювальними пристроями істотно змінює її структурні характеристики, полегшуючи рівномірний розподіл уздовж поверхні агрополя, загортання у ґрунт та подальший процес мікробіологічної деструкції [14].

Одним із ключових індикаторів якості соломи є її вологість. За цим параметром розрізняють суху солому (до 14 % вологи), солому середнього ступеня сухості (14–16 %), вологу (16–20 %) та сиру (понад 20 %). Суха солома краще піддається подрібненню, рівномірніше розподіляється на поверхні ґрунту, характеризується високою абсорбційною здатністю при використанні на

підстилку та в процесах компостування. Натомість волога й особливо сира солома ускладнює роботу збиральної техніки, гірше подрібнюється, нерівномірно загортається у ґрунт і потребує попереднього підсушування перед зберіганням або використанням [15].

Крім основних груп органічних сполук, солома містить незначну кількість воску, водорозчинних цукрів, мінеральних солей та нерозчинної золи. Її хімічний склад варіюється в залежності від ґрунтових характеристик і метеорологічних факторів, у яких відбувався ріст і розвиток зернових культур. За даними літературних джерел, найбільший вміст водорозчинних речовин характерний для соломи ярих культур, підвищена кількість зольних елементів — для рису, високий вміст лігніну — для жита та пшениці, а найбільша концентрація α -целюлози властива соломі пшениці та вівса [16].

У таблиці 1.1 представлено дані щодо хімічного складу соломи різних зернових культур (% сухої речовини).

Таблиця 1.1 - Хімічний склад соломи різних зернових культур, % від сухої речовини

Культура	Загальна зола	Водорозчинні речовини	Лігнін	Пектозани	Альфа-целюлоза
Ячмінь	6,4	16,1	14,5	24,7	38,3
Овес	7,2	13,3	17,5	27,8	39,2
Пшениця	5,6	7,4	16,7	28,2	39,6
Жито	4,3	9,4	19,0	30,3	37,8
Рис	16,1	13,3	11,9	24,5	36,2

Органічні сполуки ґрунту відзначаються високою хімічною стійкістю, тому вони не можуть бути безпосередньо використані рослинами для живлення. Щоб перетворитися у доступні для засвоєння форми, ці речовини мають пройти складний процес мікробіологічної трансформації, який здійснюється різними групами ґрунтових мікроорганізмів.

У ході деструкції органічної речовини її складові розкладаються поступово, залежно від їхньої хімічної будови та ступеня стійкості. На початкових стадіях відбувається руйнування найпростіших й найменш стабільних сполук — легкодоступних вуглеводів, такі як моно- та дисахариди. Далі мікроорганізми переходять до розщеплення більш складних полімерів, зокрема целюлози, що потребує спеціалізованих ферментів [17].

На завершальному, найбільш тривалому й енергетично витратному етапі відбувається деструкція лігніну — однієї з найстійкіших органічних речовин рослинного походження. Саме його повільне розкладання визначає темпи гуміфікації та формування родючого шару ґрунту. Таким чином, мікробіологічна трансформація органічної речовини є ключовим процесом, що забезпечує кругообіг елементів живлення та підтримує продуктивність екосистем.

У таблиці 1.2 наведено дані про концентрацію поживних елементів у соломі.

Таблиця 1.2 - Концентрація поживних елементів у соломі

Солома	Суха речовина, %	Органічні речовини, %	Азот, % сухої маси	Фосфор	Калій	Кальцій	Магній	Відношення C:N
				% сухої маси				
Пшениця	86	82	0,45	0,07	0,64	0,21	0,07	80–90
Жито	86	82	0,34	0,07	0,52	0,33	0,05	100–110
Ячмінь	86	82	0,50	0,18	0,90	0,36	0,10	70–80
Вівсяна	86	82	0,42	0,13	1,12	0,24	0,07	80–90
Кукурудзяна	85	82	0,46	0,16	1,26	0,32	0,14	80–90
Рисова	85	80	0,53	0,11	0,85	0,81	0,16	60–70
Зернобобових культур	86	80	1,29	0,16	1,07	0,91	0,16	20–25

У більшості рослинних решток, за винятком соломи зернобобових культур, спостерігається широке співвідношення вуглецю до азоту. Швидкість розкладання соломи безпосередньо залежить від цього показника: що менше співвідношення C:N, то інтенсивніше відбувається її мінералізація.

У таблиці 3.3 наведено дані про категорії якості рослинних залишків щодо доступності до розкладання.

Таблиця 1.3 - Категорії якості рослинних залишків щодо доступності до розкладання

Розкладання	Якість	Індекс якості	
		C/N	Лігнін/ N
Швидке	Висока	< 18	<5
Помірне	Середня	18-27	5-7
Повільне	Низька	28-60	7,5-15
Слабке	Дуже низька	> 60	>15

У середньому вміст у соломі становить приблизно 0,5 % азоту, 0,2 % фосфору, 0,8–1 % калію, 35–40 % органічного вуглецю, приблизно 0,3 % кальцію та 0,15 % магнію і сірки, а також певну кількість мікроелементів.

Разом із однією тонною соломи та кореневими рештками у ґрунт надходить приблизно 8,5 кг азоту, 3,8 кг фосфору, 13 кг калію, 4,2 кг кальцію, 0,7 кг магнію і різні мікроелементи. У соломі їх зазвичай накопичується більше, ніж у зерні: заліза — 10–30 г/т, марганцю — 15–70 г/т, міді — 2–5 г/т, цинку — 20–50 г/т, молібдену — 0,2–0,4 г/т, бору — 2–5 г/т.

Після внесення соломи в ґрунт відбуваються два основні напрями трансформації органічної речовини: мінералізація — розкладання до кінцевих продуктів (вуглекислоти, води та мінеральних форм елементів), гуміфікація — утворення стійких гумусових сполук.

Ці процеси взаємопов'язані й можуть чергуватися залежно від умов середовища: вологості, аерації, температури та інших факторів. Вони визначають доступність елементів живлення та формування цінних фізичних

властивостей ґрунту, таких як структура, водопроникність, щільність і вологоємність. У середньому близько 90 % свіжої органічної маси мінералізується, а лише приблизно 10 % переходить у гумус або зв'язується у стабільних формах.

Темпи розкладання залежать як від умов ґрунтового середовища (типу ґрунту, клімату, вологості, температури, рН, вмісту кисню та поживних речовин), так і від властивостей самої соломи. Значну роль відіграє ступінь подрібнення: більші частинки розкладаються повільніше, тоді як подрібнена маса швидше мінералізується. Не менш важливий хімічний склад: найшвидше розщеплюються вуглеводи, білки та водорозчинні сполуки, тоді як лігнін, ліпіди, воски, смоли й фенольні сполуки характеризуються високою стійкістю. Молоді рослини, багаті легкорозкладними речовинами, мінералізуються протягом приблизно 30 днів. Натомість солома, зібрана у фазі повної стиглості, розкладається значно довше: для мінералізації 62 % біомаси ячменю потрібно понад 108 днів. Така повільність пов'язана з підвищеним вмістом ароматичних фенольних речовин і ширшим співвідношенням C:N у зрілої соломи. У середньому за 2,5–4 місяці руйнується до 46 % соломи, за 1,5–2 роки — приблизно 80 %, а решта — пізніше.

Швидкість розкладання також визначається хімічним і мінералогічним складом ґрунту. У ґрунтах, збагачених вторинними мінералами, процеси мінералізації сповільнюються, оскільки ці мінерали здатні адсорбувати органічні сполуки, ускладнюючи їх подальше перетворення.

В умовах інтенсивного землеробства напрям і темпи трансформації свіжої органічної речовини дедалі більше залежать від антропогенних чинників. Одним із найважливіших є застосування мінеральних добрив, які стимулюють активний розвиток мікроорганізмів і, відповідно, прискорюють мінералізацію. Це особливо помітно на легких за гранулометричним складом ґрунтах. Найбільш вагому роль відіграють азотні добрива: їх високі дози значно прискорюють розкладання соломи, одночасно знижуючи коефіцієнт гуміфікації. Важливою є також форма азотних сполук, оскільки вони в ґрунті послідовно переходять у

карбонат амонію, а потім — в аміак, впливаючи на перебіг процесів мінералізації.

Азот, що міститься в цих рештках, переходить у ґрунтовий розчин поступово, переважно у формі амонію, що сприяє активному утворенню гумусу. На ґрунтах із недостатньою кількістю рухомих фосфатів сумісне внесення фосфорних добрив із соломою прискорює її деструкцію, посилюючи процеси амоніфікації та мінералізації органічних форм фосфору. Додавання мікроелементів — марганцю, молібдену, бору, міді — також стимулює розкладання соломи, оскільки мікроорганізми активно поглинають бор і марганець під час розкладу целюлози.

Важливим чинником, що впливає на трансформацію соломи в ґрунті, є рівень вологості. Найактивніше клітковина руйнується за вологості близько 70% від повної вологоємності ґрунту. Надмірне зволоження, навпаки, уповільнює мінералізацію, проте підвищує частку гумусоутворення. Зміна оптимального зволоження періодичними фазами нестачі води сприяє накопиченню гумусу.

Температурний режим також має суттєве значення: інтенсивність розкладання зростає зі збільшенням температури. Оптимальною для перетворення клітковини вважають температуру 28–30 °С. За 5–9 °С процес проходить дуже повільно, а при температурах нижчих за нуль фактично зупиняється.

До недоліків соломи належить її пригнічувальний вплив на культури, під які її вносять. Окрім високого співвідношення C:N, інгібуюча дія пов'язана також із наявністю розчинних органічних речовин, зокрема саліцилової та дегідростеаринової кислот, а також ваніліну. Токсичні продукти розкладу можуть викликати затримку росту коренів, порушення обміну речовин і хлороз. Особливо багато таких сполук утворюється під час анаеробного розкладу. В аеробних умовах і за високої біологічної активності ґрунту вони руйнуються значно швидше. Дослідження показують, що зменшити депресивний ефект соломи допомагає достатня кількість азоту: його підвищені дози різко послаблюють токсичну дію екстрактів соломи. Найкращий результат

спостерігається, коли сульфат амонію вносять за тиждень до загортання соломи. При цьому важливо дотримуватися співвідношення C:N близько 20:1. Як засоби зниження депресивного ефекту, крім азотних добрив, можуть використовуватися кальцієві та фосфорні матеріали — вапнякове або доломітне борошно, простий і подвійний суперфосфат, гіпс.

Мінеральні елементи, що містяться в соломі, також впливають на перебіг деструкції, адже потреби мікроорганізмів у поживних речовинах подібні до потреб вищих рослин. Зазвичай їх вмісту в рослинних рештках достатньо для нормального розкладу, тому вони, на відміну від азоту, зазвичай не обмежують цей процес.

Щодо фосфору, то при співвідношенні C:P у межах 150–200:1 рослинні рештки розкладаються без уповільнення, тому при вмісті фосфору 0,2–0,3 % ризик його біологічного зв'язування обмежений. Якщо прийняти, що у соломі зернових міститься приблизно 0,25 % фосфору та близько 40 % вуглецю, то співвідношення C:P становитиме 350–400:1. За таких умов для безперешкодного розкладу соломи, внесеної у кількості 5 т/га, потрібно додатково внести близько 16 кг P₂O₅ на гектар.

Внесення соломи в ґрунт, особливо разом із мінеральними добривами, покращує його агрофізичні властивості, зменшує ерозійну небезпеку, підвищує біологічну активність та загальний рівень родючості. Використання соломи та інших рослинних решток як органічного добрива сприяє покращенню агрохімічних, фізико-хімічних і біологічних характеристик типового чорнозему не гірше, ніж внесення гною. За високих доз соломи (10–15 т/га) важкі ґрунти стають більш пухкими й швидше підсихають, що навесні дозволяє раніше розпочинати польові роботи.

Більшість ґрунтів із низьким вмістом гумусу зазвичай характеризуються слабкою структурою. Навіть добре гумусовані ґрунти поступово втрачають структурність, якщо їх регулярно не поповнювати свіжою органічною речовиною. Тому поряд з іншими методами органічного удобрення доцільно

рекомендувати заорювання соломи та інших рослинних решток як ефективний спосіб поліпшення структури ґрунту.

Важливим показником родючості є також повітряний режим ґрунту. Органічні добрива, а особливо рослинні залишки виконують значну роль у його регулюванні. Встановлено, що систематичне внесення соломи зменшує щільність ґрунту та збільшує частку некапілярних пор.

Використання соломи як добрива позитивно позначається і на фізико-хімічних властивостях ґрунтів: підвищується їх поглинальна здатність, а тривале внесення соломи на кислих ґрунтах поступово знижує їхню кислотність.

Додавання соломи активізує процеси азотфіксації, забезпечуючи мікроорганізми необхідними поживними речовинами. Без активної участі ґрунтової мікробіоти доступність окремих елементів живлення була б значно обмежена. Завдяки стимулюванню симбіотичної та несимбіотичної фіксації атмосферного азоту заорювання соломи може суттєво покращити азотний баланс орних земель. Окрім помітного покращення азотного режиму, внесення соломи сприяє зростанню вмісту мобільних форм фосфору й калію [18].

Солому застосовують і для удобрення овочевих культур у захищеному ґрунті. Додавання її до тепличних субстратів знижує щільність ґрунтової маси, підвищує ефективність мінеральних добрив і зменшує надмірне накопичення солей. Крім того, у тепличних умовах солома може виконувати функцію джерела CO₂, сприяючи регулюванню газового режиму й покращенню умов для росту рослин.

1.4 Мікроорганізми біодеструктори соломи

Розкладання соломи в ґрунті є складним мікробіологічним процесом, у якому ключову роль відіграють целюлолітичні мікроорганізми домену Bacteria. Значна частина таких мікроорганізмів здатна синтезувати ферменти, що

розщеплюють целюлозу. Серед них зустрічаються організми аеробного, анаеробного та факультативно анаеробного типу та термофільні бактерії, кожна з яких виконує специфічні функції в процесах біодеструкції рослинних решток [19].

Аеробні целюлолітичні бактерії руйнують целюлозу шляхом секреції целюлаз у навколишнє середовище. У деяких випадках вони здатні прикріплюватися до частинок субстрату, хоча таке приєднання не є обов'язковою вимогою активного гідролізу. Ці мікроорганізми, так само як і целюлолітичні гриби, належать до органогетеротрофів і одержують енергію під час аеробного дихання. Саме аероби становлять основну частку мікробіоти, що бере участь у розкладанні клітковини, тоді як анаероби забезпечують лише близько 5–10 % її деградації.

На відміну від аеробних форм, анаеробні целюлолітичні мікроорганізми проявляють більш повільні темпи росту та клітинного поділу. При цьому целюлоза розкладається шляхом бродіння з утворенням етанолу, органічних кислот, водню та вуглекислого газу. Для багатьох з них важливим є прикріплення до субстрату, оскільки їхні целюлазні системи часто локалізовані на поверхні клітин або в матриксі клітинного глікокаліксу [20].

Найпоширенішими серед анаеробних целюлолітичних бактерій вважаються представники родини *Bacillaceae*, зокрема рід *Clostridium*, які зустрічаються у ґрунтах різного типу, компості, мулі та стічних водах. Значну групу становлять і факультативно анаеробні мікроорганізми, серед яких мезофільні *Cellulomonas uda*, *Cellulomonas terrae*, *Telmatobacter bradns*, *Paenibacillus cellulosilyticus*, *Paenibacillus cellulositrophicus* та термофільний вид *Melioribacter roseus*. До продуцентів целюлаз також належать бактерії родів *Paenibacillus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, а також антагоністи фітопатогенних мікроорганізмів.

Продукти руйнування целюлози залежать від умов: при аеробному гідролізі утворюються переважно CO₂ та H₂O з невеликими кількостями органічних кислот, тоді як за анаеробних умов продуктами є різні кислоти

(оцтова, молочна, мурашина, масляна), етанол, водень та вуглекислий газ. Участь мезофільних і термофільних бактерій роду *Clostridium* в анаеробній деградації визначає формування специфічних кінцевих продуктів метаболізму.

До групи мікроорганізмів-деструкторів належать також міксобактерії порядку *Myxobacteriales* — роди *Myxococcus*, *Archangium*, *Sorangium* та *Polyangium*, що здатні існувати у широкому діапазоні екологічних умов і брати участь у деструкції складних полімерів.

В аеробних ґрунтах важливу роль відіграють представники роду *Cellulomonas* — грампозитивні рухливі паличкоподібні бактерії, здатні як до аеробного, так і до анаеробного розкладання целюлози. Вони переважно трапляються у ґрунтах, багатих на мінеральні форми азоту [21].

Значна кількість целюлолітичних бактерій функціонує в термофільних умовах, що дозволяє їм брати участь у деструкції соломи під час її компостування. Серед них виділяють помірно термофільні (50–65 °С), екстремально термофільні (65–80 °С) та гіпертермофільні (>80 °С) мікроорганізми. Вони представлені бактеріями порядків *Clostridiales*, *Actinomycetales*, *Flavobacteriales*, *Thermotogales*, *Spirochaetales*, *Ignavibacteriales*, *Ktedonobacteriales* та ін. Екстремальні та гіпертермофільні форми належать до філумів *Firmicutes*, *Spirochaetes*, *Thermotogae* та *Dictyoglomi*.

Слід зазначити, що бактерії продукують меншу різноманітність целюлолітичних ферментів порівняно з грибами. У той час як гриби синтезують комплекси з трьох типів целюлаз (ендоглюканази, целобіогідролази, целобіази), бактеріальні системи представлені переважно ендоглюканазами, які часто малоактивні щодо кристалічної целюлози. Однак для багатьох анаеробних бактерій характерне формування спеціалізованих мультимолекулярних ферментних комплексів — целюлосом, що значно підвищує ефективність розкладання рослинних полісахаридів.

У ґрунтового середовищі, поряд із бактеріями, важливу роль у розкладанні рослинних решток відіграють гриби, представлені представниками всіх основних таксонів: фікоміцетами, аскоміцетами, базидіоміцетами та

дейтеромицетами. Вони відрізняються за екологічною приуроченістю, особливостями живлення та характером взаємодії з іншими організмами. У ґрунтах активно функціонують сапротрофи, що розкладають рослинні й тваринні залишки, факультативні або облігатні паразити рослин, мікоризоутворювальні види та гриби-хижаки [22].

Гриби є ключовими агентами у трансформації складних органічних сполук — целюлози, лігніну та пектинових речовин. Вони беруть участь у процесах амоніфікації та активно впливають на інші групи мікроорганізмів завдяки синтезу біологічно активних метаболітів: амінокислот, ферментів, антибіотиків, вітамінів, стимуляторів росту та токсичних сполук. Завдяки міцеліальній будові, швидкому апікальному росту та здатності продукувати антагоністичні речовини, гриби ефективно колонізують субстрат і витісняють конкурентів. Із вичерпанням доступної органічної речовини їх метаболічна активність знижується, і вони формують структури спокою — хламідоспори, склероції та інші. Спори, легко поширюючись у середовищі, забезпечують високий рівень пристосованості грибів до змін екологічних умов.

Розкладання рослинних залишків у природі відбувається поетапно. Спершу активізуються факультативні паразити, що проникають у корені та інші тканини рослин. Після відмирання рослин до процесу долучаються сапротрофні мікроміцети, які споживають легкодоступні вуглеводи — прості цукри, крохмаль і геміцелюлози. Оскільки целюлоза та лігнін є складнішими для гідролізу, гриби-целюлолітики вступають у процес на завершальних етапах і характеризуються повільнішим розвитком. Найчастіше целюлолітичні гриби представлені аскомицетами та дейтеромицетами: *Penicillium*, *Stachybotrys*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*. Лігніноруйнівні властивості притаманні переважно базидіоміцетам, хоча деякі види дейтеромицетів (*Trichoderma*, *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*) також здатні окиснювати лігнін.

У процесі руйнування деревини та рослинних решток важливими є два етапи. Первинні деструктори — представники Ascomycota та анаморфних грибів — споживають внутрішньоклітинні субстрати, не руйнуючи клітинні стінки. Їх

діяльність часто супроводжується зміною забарвлення деревини (деревофарбуючі гриби), що спричинено утворенням меланінів (*Ceratocystis*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Aureobasidium*). Оптимальними умовами для їх розвитку є температура 5–30 °C і підвищена вологість.

Найбільш тривалий і складний етап деструкції зумовлений активністю лігніно- та целюлозоруйнівних грибів — ксилотрофів, серед яких значну групу становлять трутовики, що спричиняють бурі та білі гнилі. Гриби бурої гнилі переважно руйнують целюлозу, тоді як представники білої — лігнін. Завершальна стадія деструкції триває десятиліттями й включає участь як спеціалізованих ксилотрофів, так і сапротрофних видів [23].

Серед грибів, здатних до розщеплення целюлози, особливе місце займають базидіоміцети, що синтезують повний комплекс целюлаз, а також аскоміцети та анаморфні гриби. Важливу роль відіграють види родів *Fusarium*, *Chaetomium*, *Stachybotrys*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Myrothecium*, *Rhizoctonia* та *Trichoderma*. Не всі целюлолітики здатні руйнувати кристалічну целюлозу, адже більшість грибів продукує лише частину ферментного комплексу. Повноцінну систему, що включає ендо-, екзоглюканазу та β-глюкозидази, синтезують здебільшого *Trichoderma viride*, *T. reesei*, *T. koningii*, *Penicillium funiculosum* та *Fusarium solani*.

Одним із найперспективніших для практичного використання є рід *Trichoderma*, відомий високою целюлолітичною активністю, здатністю до глибокої деструкції клітинних стінок і вираженим антагонізмом щодо фітопатогенів (*Fusarium oxysporum*, *Phytophthora parasitica* тощо). Ці мікроміцети широко застосовують у біотехнологічних процесах і в складі біологічних препаратів. *Trichoderma viride* та *T. harzianum* — одні з найактивніших деструкторів рослинних решток, які швидко колонізують субстрат завдяки густому міцелію та інтенсивному спороношенню.

Значну активність у руйнуванні целюлози проявляють також представники роду *Chaetomium*, що характеризуються високою конкурентоспроможністю та здатністю до продукції ефективних целюлазних

систем. Рівень активності окремих ферментів відрізняється між різними родами: наприклад, максимальна продукція ендоглюканаз характерна для *Trichoderma*, тоді як висока активність целобіаз спостерігається у *Aspergillus*. Крім того, целюлази *Aspergillus versicolor* відзначаються термостабільністю, ферментні препарати *Trichoderma reesei* — ефективною адсорбцією на субстраті, а ферменти *Actinomyces diastaticus* та *Aspergillus fumigatus* — низькою чутливістю до інгібіторів гідролізу [24].

Целюлолітичні гриби надзвичайно поширені в природі та зустрічаються в найрізноманітніших екологічних умовах, у тому числі екстремальних, що підкреслює їхню високу адаптивність і важливу роль у біогеохімічному циклі.

1.5 Вплив соломи на процес відтворення органічної речовини у ґрунті

Гумусовий стан ґрунту є головним показником його потенційної родючості, тому збереження, підтримання та відновлення запасів гумусу належать до пріоритетних завдань сучасного землеробства. Вміст гумусу виступає одним із найважливіших критеріїв оцінки родючості ґрунтів, оскільки він визначає рівень продуктивності сільськогосподарських угідь. Саме з гумусом пов'язані такі ґрунтові властивості, як структура, ємність поглинання, буферність, водний режим і фізичні параметри. Гумус також є основним джерелом елементів живлення: у чорноземах його внесок становить приблизно 98 % загального азоту та понад половина запасів фосфору. Крім того, він впливає на ферментативну активність ґрунтів, процеси утворення вуглекислого газу у приземному шарі атмосфери і є одним із ключових резервуарів сонячної енергії, виконуючи важливі біосферні функції [25].

Дані проведених досліджень підтверджують існування тісної взаємозв'язку між врожайністю сільськогосподарських культур і вмістом гумусу. Вплив органічного гумусу на ростові процеси рослин має

опосередкований характер, однак рівень цієї залежності залишається надзвичайно високим.

Сучасний стан гумусового горизонту ґрунтів сформувався внаслідок тривалої еволюції під дією антропогенних факторів. Баланс гумусу може залишатися бездефіцитним (компенсованим), якщо кількість новоутвореного гумусу за певний період, наприклад протягом культурного року, відповідає обсягам мінералізованого. Він може бути від'ємним, коли синтез гумусу відстає від його мінералізації, або додатним, якщо надходження нових гумусових сполук перевищує їх втрати [26].

Щорічні втрати гумусу становлять: у зоні Полісся — 0,7–0,8 т/га, у Лісостепу — 0,6–0,7 т/га, у Степу — 0,5–0,6 т/га; у середньому по Україні — 0,6–0,7 т/га. За результатами вітчизняних дослідників, у всіх природно-кліматичних зонах фактичний вміст гумусу є істотно нижчим за оптимальні значення.

У таблиці 1.4 наведено дані про фактичний та оптимальні рівні вмісту гумусу в ґрунтах України.

Таблиця 1.4 - Фактичний та оптимальні рівні вмісту гумусу в ґрунтах України.

Зона	Вміст гумусу, %		
	фактичний	оптимальний	різниця
Степ	3,5	4,3	0,8
Лісостеп	3,3	4,3	1,0
Полісся	1,9	2,6	0,7
По Україні	3,1	4,0	0,9

Щоб підтримувати бездефіцитний баланс гумусу, щорічно слід вносити певні обсяги органічних добрив: у Степовій зоні це в середньому 8,8 т/га, у Лісостеповій — 10,7 т/га, у зоні Полісся — 14,3 т/га, тоді як середній показник по Україні становить 10,4 т/га.

Скорочення вмісту органічної матерії та погіршення якісних характеристик гумусу можуть бути зумовлені низкою чинників. Насамперед це

відсутність стабільного поповнення органічної маси за рахунок рослинних решток та органічних добрив, що компенсують поточні втрати, спричинені біологічною мінералізацією. Крім того, значну роль відіграє порушення сталого співвідношення між мінералізацією свіжої органічної речовини та утворенням і стабілізацією нових гумусових сполук у ґрунті [27].

Нині підтримання дефіцитного гумусового балансу на прийнятному рівні можливе переважно завдяки використанню пожнивних решток. Культурні рослини залишають значні обсяги післяжнивних і кореневих залишків, кількість яких прямо залежить від величини врожаю: зі зростанням урожайності загальна маса решток збільшується, але їхня частка в загальній біомасі зменшується.

Разом із урожаєм зернових культур та однорічних трав відбирається 60–65 % біомаси, кукурудзи та картоплі — 70–73 %, а сіна багаторічних трав — приблизно 40 %. Суха маса поживно-корневих залишків, залежно від агротехнічних умов і продуктивності культур, може складати 45–75 ц/га і більше, інколи досягаючи 100–200 ц/га. За рівнем накопичення рослинних решток у нечорноземній зоні культури розташовуються у такому порядку: кукурудза — 56 %, озимі зернові — 50 %, ярові зернові — 39 %, зернобобові — 28 %, картопля — 20 %. У чорноземній зоні структура накопичення рослинних решток має дещо інший порядок: озима пшениця — 48 %, кукурудза — 38 %, ярові зернові — 37 %, соняшник — 36 %, зернобобові — 35 %, цукровий буряк — 31 %.

У ґрунті одночасно відбуваються два протилежні за напрямом процеси трансформації органічної речовини — мінералізація та гуміфікація. Після внесення свіжої органічної маси 70–80 % її кількості мінералізується протягом двох років, тоді як 20–30 % переходить у гумус. Інтенсивність цих процесів істотно залежить від співвідношення вуглецю й азоту (C:N) у складі органічної речовини. Зокрема, у залишках конюшини воно становить 12–25:1, картоплі — 14–20:1, буряку — 14–15:1, кукурудзи — 30–40:1, пшениці — 35–40:1, зернових культур — 40–50:1. Оптимальним для активної гуміфікації вважається співвідношення C:N у межах 15–25:1.

За гумусним еквівалентом 37 ц соломи прирівнюються до 100 ц підстилкового гною або 270 ц зеленої маси сидератів. Розрахунки свідчать, що зі 50 ц/га сухої соломи до ґрунту надходить близько 5 ц/га органічної речовини; з пожнивних решток — близько 10 ц/га; а з 25 ц/га кореневої маси — приблизно 4 ц/га.

Важливо підкреслити роль свіжих рослинних решток та зелених добрив у процесах мобілізації ґрунтового азоту. Органічна маса з низьким співвідношенням C:N, наприклад горох (близько 7:1), значно активніше зумовлює більший викид азоту порівняно з зеленою масою вівса, для якої це співвідношення становить приблизно 30:1. У той час як мінералізація відбувається інтенсивніше за наявності легкорозкладних решток, процеси гуміфікації проявляються з протилежною тенденцією: в гумусовому горизонті дерново-підзолистих ґрунтів від горохової маси зберігається близько 22 %, тоді як у чорноземах — до 47 %. У випадку з вівсом частка гуміфікованих решток є значно більшою — 67–82 % [28].

Високе відношення вуглецю до азоту в соломі є однією з причин зниження врожайності культур, під які її загортають. Це пов'язано з тим, що ґрунтові мікроорганізми, які беруть участь у розкладі соломи, активно споживають мінеральний азот, створюючи конкуренцію культурним рослинам. Тому при внесенні соломи рекомендується додатково забезпечувати ґрунт 10–12 кг азоту (в перерахунку на діючу речовину) на кожен тону соломи. Це необхідно не лише для підтримання життєдіяльності мікроорганізмів, а й для стимулювання утворення гумусу, оскільки безазотисті гумусоподібні продукти швидко піддаються мінералізації та розкладаються до CO₂ і H₂O.

За умови заробки соломи в ґрунт рекомендовано застосовувати азотні добрива переважно у аміачній формі, а не у вигляді нітратів. У практиці землеробства норма внесення азоту під основний обробіток повинна встановлюватися з урахуванням обсягу пожнивних решток, що залишилися на полі. Так, ґрунти після вирощування культури суцільного посіву потребують більшої кількості азоту, ніж площі після цукрових буряків. Такий

диференційований підхід сприяє поліпшенню гумусового стану ґрунтів і водночас зменшує непродуктивні втрати азоту через денітрифікацію.

Слід зазначити, що мінералізації піддається не тільки внесена органічна маса, а й сам гумус, хоча розкладається він значно повільніше — щороку втрачається приблизно 1,5–2 % його запасів. Швидкість перебігу цього процесу залежить від характеристик ґрунту та вмісту гумусу: у суглинках вона становить 1,5–1,6 %, у супіщаних — 1,7–1,8 %, у піщаних — 1,9–2,0 %, у чорноземах і темно-сірих лісових ґрунтах — 0,5–0,7 %, а в сірих — 0,8–1,0 %.

Інтенсивність мінералізації також різниться під різними культурами: під просапними вона у 2–3 рази вища, ніж під культурами суцільного висіву. Якщо в ґрунті бракує доступної органічної речовини, мікроорганізми починають розкладати гумус, що знижує його запаси. Активний обробіток ґрунту посилює доступ повітря і, відповідно, прискорює розклад органічної речовини.

Для регулювання гумусового балансу необхідно: збільшувати надходження свіжої органічної маси (рештки, органічні добрива); застосовувати заходи, що уповільнюють мінералізацію органіки [39].

Основні принципи регулювання гумусового стану полягають у впровадженні ґрунтоохоронних сівозмін, розширенні площ під багаторічними та бобовими культурами, вирощуванні сидератів і зайнятих парів. Надмірна частка просапних культур у сівозмінах прискорює мінералізацію, тому для збереження родючості слід зменшувати їхню частку й оптимізувати структуру посівів.

Дослідження ННЦ «Інститут землеробства НААН» показали, що за 1987–2002 рр. заорювання соломи без мінеральних добрив формувало позитивний баланс гумусу — його вміст зростав на 7,7–13,1 ц/га. Збільшити гуміфікацію та зменшити мінералізацію до 50 % допомагає глибоке загортання органіки, тоді як поверхневий або мілкий обробіток посилює розклад.

Нормативи гуміфікації: гній і торф — 30 %, бобові, багаторічні трави, льон — 25 %, силосні культури — 17 %, солома — 15 %, рештки картоплі, буряків, овочів і сидератів — 12 %. Для легших ґрунтів коефіцієнти знижуються, збільшення дози добрив понад норму зменшує гуміфікацію.

На типових чорноземах для бездефіцитного балансу потрібно ~10 т/га органіки; зменшення площ просапних культур та введення багаторічних трав і загортання побічної продукції знижує потребу в добривах на 30–90 %. Глибина загортання суттєво впливає на гуміфікацію: 0–10 см — на 25 % менше, 15–20 см — середній рівень, 20–30 см — на 60 % більше [30].

1.6 Сезонна активність ґрунтової мікрофлори

Ґрунтові мікроорганізми, здатні до гідролізу клітковини, виконують важливу функцію у процесах обміну та мінералізації вуглецевих сполук, оскільки целюлоза є одним із найпоширеніших компонентів органічної речовини в природі. Ефективність її розкладу залежить від багатьох факторів: структури ґрунту, хімічного складу, вмісту органічних речовин, внесення добрив, початкового мікробного складу, а також від умов навколишнього середовища — рН, температури, вологості та аерації. Через це целюлолітичну активність часто використовують як показник стану ґрунту у процесі внесення органічних та мінеральних добрив [31].

Вологість ґрунту належить до основних факторів, що визначають розвиток целюлолітичних бактерій і грибів. Зниження вологості пригнічує їх активність, оскільки вода необхідна для надходження поживних речовин та виділення продуктів метаболізму. Мінімальна вологість для бактерій складає 20–30 %, для грибів — 10–15 %, проте навіть за відносно посушливих умов мікроорганізми зберігають значну активність [32].

На процеси гідролізу целюлози впливає її фізико-хімічна структура: ступінь кристалічності, питома поверхня та поляризація. Зменшення кристалічності та збільшення питомої поверхні підвищує ефективність гідролізу, тоді як фрагментація субстрату не має вирішального значення.

Целюлолітичні мікроорганізми присутні як в аеробних, так і в анаеробних умовах, хоча більшість розщеплювачів функціонують в присутності кисню. В умовах кислих лісових ґрунтів ключову роль у процесі розкладу целюлози виконують мікроміцети родів *Trichoderma*, *Fusarium*, *Myrothecium*, *Penicillium*. У степових і лугових ґрунтах основними деградувальними агентами є міксобактерії (*Archangium*, *Polyangium*), цитофаги (*Cytophaga*, *Sporocytophaga*) та бактерії родів *Vibrio*, *Achromobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*. Значну роль у аеробному розкладі виконують також актиноміцети (*Streptomyces*, *Micromonospora*, *Streptosporangium*). В анаеробних умовах целюлозу розкладають переважно бактерії роду *Clostridium*, зокрема *Cl. omelianskii* та термофільні види (*Cl. thermocellum*) [33].

Температура є критичною для активності мікроорганізмів. Більшість целюлолітичних бактерій є мезофілами, оптимум росту яких становить 25–35 °С, при цьому *Cl. omelianskii* росте найкраще при 30–40 °С. Термофіли здатні розвиватися при 60–65 °С. Психрофіли, поширені у холодних ґрунтах і середовищах, серед целюлолітичних мікроорганізмів не зустрічаються [34].

Водневий показник ґрунтового середовища також впливає на активність целюлолітичних ферментів: оптимальні значення — кисле та нейтральне середовище, тоді як алкалофіли серед целюлолітичних мікроорганізмів не виявлені.

Сезонна активність ґрунтової мікрофлори визначається комплексом факторів: вологою, температурою, рН, фізико-хімічними властивостями субстрату та мікробним складом ґрунту. Вивчення целюлолітичних бактерій та грибів дозволяє оцінювати процеси гумусоутворення та ефективність використання органічних добрив [35].

1.7 Технологічні схеми застосування соломи

Солому слід вносити переважно на збіднені ґрунти, віддалені від тваринницьких ферм більш ніж на 5 км, а також за нестачі гною в господарстві. Вона може застосовуватися під усі сільськогосподарські культури — просапні, кормові, зернові та зернобобові, найбільш ефективно — під основний обробіток ґрунту для вирощування кукурудзи на зерно і зелений корм. Подрібнена солома довжиною 5–10 см повинна розподілятися рівномірно на площі не менше 75 % під час обмолоту, а на полі може залишатися 1–2 тижні, виконуючи функцію мульчі, що перешкоджає висиханню ґрунту, після розкидання соломи обов'язково вносять азотні добрива у дозі 10–12 кг д.р. на 1 т соломи та здійснюють обробку поля дисковою бороною на глибину 8–12 см. Для прискорення розкладу допустимо застосування гуматовмісних препаратів у кількості 2–6 л/га, що дозволяє знизити дозу азоту на 20–30 %. Під напівпар солому загортають на глибину 20–22 см, після чого ґрунт готується під посів культур відповідно до прийнятих технологій. Для повного (40–50 %) розкладу біомаси соломи від моменту загортання до висіву культур має пройти не менше 6 місяців, що дозволяє рослинам засвоїти вже в перший рік 15–25 % азоту, 20–30 % фосфору та 25–40 % калію [36].

Солома зернових колосових культур використовується за двома основними технологічними схемами. У першій схемі комбайни з наявними подрібнювачами подрібнюють солому безпосередньо під час обмолоту і рівномірно розкидають її по полю. Для цього застосовуються комбайни «Дон-1500» та «Дон-2600» з подрібнювачами ПКН-1500Б-01 і ПКН-2600-01 або СК-5 «Нива» з ПУН-5/6. У разі негайного внесення в напівпар подрібнювачі переобладнують на дрібну січку (50–100 мм) [37].

На засмічених полях, де необхідно збирати полову окремо, використовують підбирачі-подрібнювачі та причіпні машини 2ПТС-4-887А, що дозволяє видалити насіння бур'янів. Після розкидання соломи протягом 1–2 днів вносять азотні добрива штанговими розкидувачами, а поле обробляють дисковими боронами на глибину 10–12 см або культиваторами на 8–10 см. На напівпару проводять оранку на 20–22 см, на зяб – на 28–30 см стандартними відвальними плугами. Якщо солону використовують як мульчу, подрібнювачі регулюють на більшу довжину (150–250 мм), а розкидання має бути рівномірним, без утворення куп [38].

Друга схема застосування передбачає використання комбайнів без подрібнювачів, після чого на полі залишаються валки соломи з половиною. Підбирачі-подрібнювачі, наприклад КИР-1,5 М та інші, підбирають валки, подрібнюють солону і розкидають по полю. Подальші операції — внесення добрив, загортання та обробіток ґрунту — не відрізняються від першої схеми [39].

Таким чином, ефективне застосування соломи як органічного добрива потребує її належного подрібнення, рівномірного розподілу та своєчасного внесення мінеральних добрив та оптимальної глибини загортання для забезпечення повного розкладу та максимального засвоєння поживних речовин ґрунтом [40].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Об'єкт та місце проведення досліджень

Дослідження були проведені на експериментальних полях Інституту зернових культур Національної академії аграрних наук України, який є провідною науково-дослідною установою Степової зони та одним із ключових центрів аграрної науки України. Інститут розташований у місті Дніпро та має стратегічне значення для розвитку землеробства Південно-Східної України, оскільки його діяльність спрямована на дослідження агроекологічних, біологічних і технологічних аспектів вирощування зернових та інших польових культур в умовах різких кліматичних коливань, характерних для степового регіону.

Інститут зернових культур був створений для забезпечення наукових засад ефективного використання земельних ресурсів, удосконалення систем землеробства, підвищення продуктивності агроecosystem і розвитку адаптивних технологій вирощування культур. За десятиліття діяльності інститут сформував потужну наукову школу, у якій функціонують спеціалізовані лабораторії ґрунтознавства, агрохімії, мікробіології, біотехнологій, фізіології рослин і селекції. Високий рівень науково-дослідної інфраструктури дозволяє проводити широкі експериментальні програми, включаючи оцінку ефективності новітніх біопрепаратів, біодеструкторів, елементів систем удобрення та засобів оптимізації екологічного стану ґрунтів.

Дослідні поля інституту займають значну площу та репрезентують основні ґрунтово-кліматичні умови Дніпропетровського регіону. Ґрунтовий покрив характеризується переважанням чорноземів звичайних малогумусних,

що мають високу агрономічну цінність, але одночасно чутливо реагують на дефіцит вологи, перегрів у літні місяці та коливання температури. Ці ґрунти є природною лабораторією для вивчення процесів мінералізації рослинних решток, зміни мікробіологічної активності та ефективності біологічних засобів оптимізації їх стану [41].

На рисунку 2.1 зображено дослідний корпус інституту зернових культур НААН України.



Рисунко 2.1 - Дослідний корпус інституту зернових культур НААН України

Науковий колектив інституту має значний досвід роботи із дослідженням післяжнивних решток соняшнику та озимої пшениці, які є основними культурами сівозмін Степової зони. Саме на базі ІЗК НААН проводилися численні роботи з оцінки впливу мікробіологічних препаратів на зміни агрофізичних і агрохімічних властивостей ґрунту, активність целюлозолітичної мікрофлори, швидкість мінералізації органічної речовини та формування гумусу.

Інститут зернових культур НААН України є повноцінною науковою платформою, яка забезпечує комплексний підхід до оцінки біологічних засобів оптимізації екологічного стану ґрунтів. Поєднання природних особливостей степових ландшафтів Дніпропетровщини, ґрунтового різноманіття та сучасних

лабораторних можливостей інституту створює оптимальні умови для дослідження дії біодеструкторів на процеси деградації рослинних решток, що є надзвичайно актуальним у контексті змін клімату та необхідності підвищення екологічної стійкості землеробства [42].

2.2 Характеристика особливостей культур

Соняшник є однією з провідних технічних культур степової зони України, характеризується високою біомасоутворювальною здатністю та значним винесенням води й елементів живлення з ґрунту. Середній транспіраційний коефіцієнт культури становить близько 455 г води на формування 1 кг сухої біомаси, що зумовлює її високу чутливість до вологозабезпечення та кліматичних коливань

Для формування врожаю соняшнику на рівні 2,5–3,0 т/га рослини повинні використати понад 4300 м³/га води, що у природних умовах Степу значною мірою компенсується запасами ґрунтової продуктивної води та атмосферними опадами.

Рослинні рештки соняшнику — стебла, прикореневі частини, кошики та листові основи — відзначаються високим вмістом лігніну, целюлози та структурних вуглеводів, що робить їх одними з найскладніших щодо біологічної деструкції. На відміну від соломи зернових культур, після збирання соняшнику у полі залишається масивна грубостеблова біомаса, що повільно розкладається природним шляхом і може акумулювати на поверхні ґрунту значні об'єми органічних залишків [43].

Вологість ґрунту та температура істотно впливають на активність мікроорганізмів, тому природні піки деструкції решток припадають на пізню осінь та ранню весну, коли є відповідне поєднання тепла й води. Для Дніпропетровської області, що характеризується посушливим кліматом, ці

періоди є особливо цінними, адже більшість літніх і зимових місяців відзначаються пригніченим мікробіологічним фоном. Саме тому використання біодеструкторів соломи у системі оздоровлення ґрунтів є актуальним з позиції прискорення мінералізації важкодеструктивних решток соняшнику, зменшення фітосанітарного навантаження та повернення органічної речовини в ґрунтову екосистему.

Гібриди Бомонд та Альдазор, як сучасні високопродуктивні форми, формують значну надземну масу, що потребує раціонального управління процесами її розкладання. В умовах недостатньої природної вологозабезпеченості Дніпропетровської області частина біомаси може тривалий час залишатись у нерозкладеному стані, обмежуючи водонепроникність та циркуляцію повітря у ґрунті. Саме це потребує впровадження біопрепаратів, здатних активізувати целюлозолітичну мікробіоту та прискорити деградаційні процеси.

Пшениця озима — провідна продовольча культура Степу України, і Дніпропетровська область є одним із ключових регіонів її вирощування. Озима пшениця характеризується високими вимогами до ґрунтової родючості й системи удобрення, що визначає потенціал формування продуктивності сорту в конкретних агроекологічних умовах.

Солома озимої пшениці, на відміну від соняшникової, містить менший відсоток лігніну й має значно вищу здатність до природної деструкції. Вона легша, тонша, характеризується ширшим співвідношенням C:N (зазвичай 60–90:1), але розкладається швидше, особливо за достатньої вологості ґрунту. Внесення біодеструкторів дозволяє підсилити цей процес, активуючи популяції целюлозолітичних і азотфіксувальних мікроорганізмів, що збільшує швидкість мінералізації та формування гумусових речовин. Мікробіологічна активність у ґрунті значною мірою залежить від вологості: у сухі періоди вона різко знижується, а в умовах достатнього зволоження різко зростає. Це особливо важливо для пшениці озимої, оскільки її солома є більш доступною для

мікроорганізмів і природні піки розкладання добре узгоджуються з осінньо-весняними періодами активності біоти.

Сорти Мудрість одеська та Зіра належать до високопродуктивних форм, чутливих до живлення і вологозабезпечення. У структурі їх післяжнивних решток переважають тонкі стебла і листкова маса, що забезпечує їх відносно швидке залучення до кругообігу поживних речовин. На відміну від соняшникової маси, солома пшениці є ефективнішою сировиною для біодеструкції, оскільки легко колонізується грибами та бактеріями, а її перетравлення менш залежне від температурних піків [44].

2.3 Ґрунтово-кліматичні умови

Ґрунтові умови Дніпропетровської області формуються під впливом особливостей степової природної зони, для якої характерні поєднання високого теплового забезпечення та недостатнього, а також нерівномірного зволоження. Ґрунтовий покрив регіону представлений переважно чорноземами звичайними та південними, а також локальними ділянками лучно-чорноземних та дерново-лучних ґрунтів. Ці ґрунти характеризуються високим потенціалом природної родючості, однак їхній стан істотно залежить від кліматичних коливань і антропогенних навантажень, що зумовлює зміни у структурі, водному режимі та мікробіологічній активності.

Чорноземи Дніпропетровщини характеризуються середньо- та важкосуглинковим гранулометричним складом, який забезпечує добру буферність, повітропроникність і вологоутримувальну здатність. Проте в умовах тривалих літніх посух поверхневий шар ґрунту швидко втрачає вологу, що спричиняє значне зниження активності мікроорганізмів, відповідальних за мінералізацію органічних решток. На ґрунтах легшого механічного складу деструктивні процеси можуть відбуватися інтенсивніше, але вони є менш

стабільними через недостатню здатність таких ґрунтів утримувати вологу. Таким чином, гранулометричний склад визначає не лише фізичні властивості ґрунту, а й динаміку розкладання соломи різних культур [45].

Вміст гумусу у ґрунтах регіону зазвичай становить від 3,0 до 4,5%, що відповідає природно високій родючості чорноземів. Проте протягом останніх років спостерігається зменшення вмісту органічної речовини, що пов'язано як зі зміною клімату, так і з інтенсифікацією землеробства. Гумус та свіжі рослинні рештки є джерелом енергії для ґрунтової мікробіоти, тому зменшення їх кількості призводить до порушення мікробного метаболізму та зниження темпів природної деструкції. У таких умовах застосування біодеструкторів, зокрема препаратів Біонорма та Целюлад, є важливим елементом підтримання та відновлення біологічної активності ґрунту.

Водний режим є одним із ключових чинників, що визначають швидкість деградації рослинних решток. Для регіону характерне недостатнє та нерівномірне зволоження протягом року, при якому оптимальні умови для мікроорганізмів (вологість на рівні 50–70% від повної вологоємності) спостерігаються лише навесні та восени. У літній період ґрунт інтенсивно пересихає, що майже повністю пригнічує мікробіологічну активність, а отже й ефективність внесених біодеструкторів. Натомість у періоди достатньої вологості деструкційні процеси активізуються, що вказує на необхідність коригування технологій внесення препаратів залежно від гідротермічних умов року.

Температурний режим ґрунту також має виражений сезонний характер і є важливим регулятором життєдіяльності мікроорганізмів. Для Дніпропетровської області характерне швидке весняне прогрівання, літні перегріву верхнього шару ґрунту до критичних температур та осіннє зниження тепла, що зумовлює коливання інтенсивності мікробіологічної деструкції. Піки активності ґрунтової мікробіоти припадають на ранню весну та пізню осінь, коли температура та вологість створюють сприятливий мікроклімат для розкладання органічних решток. У зимовий період та в умовах літніх перегрівів активність

мікробіоти різко зменшується, що необхідно враховувати при прогнозуванні ефективності біодеструкторів.

Важливою характеристикою ґрунтів регіону є реакція ґрунтового розчину, яка у більшості випадків наближається до нейтральної (рН 6,5–7,5). Така реакція є оптимальною для діяльності целюлозоруйнівних мікроорганізмів, що забезпечують природну мінералізацію соломи. Однак швидкість деградації рослинних решток залежить також від їхнього хімічного складу та співвідношення вуглецю до азоту. Солома озимої пшениці має нижчий вміст лігніну та більш сприятливе співвідношення C:N порівняно з пожнивними залишками соняшнику, які характеризуються жорсткішою структурою та значною кількістю лігніфікованих сполук. Це ускладнює природний розклад соняшникового бадилля та зумовлює потребу в застосуванні спеціалізованих біодеструкторів, здатних сприяти руйнуванню таких складних органічних матриць [46].

Кліматичні умови є визначальним фактором, що формує інтенсивність мікробіологічних процесів у ґрунті та швидкість деструкції рослинних решток. Відомо, що активність ґрунтових мікроорганізмів залежить від рівня зволоження, температури повітря та сезонних коливань, які впливають на можливість мікробних угруповань брати участь у розкладанні целюлози та лігніну. Для умов Дніпропетровської області притаманний різко континентальний клімат з високою міжсезонною мінливістю, значними амплітудами температури та нестійким зволоженням, що визначає сезонність природних піків деструктивної активності — ранньою весною та пізньою осінню.

У межах дослідження було проаналізовано температурний режим та кількість опадів за даними метеостанції Лошкарівка у три ключові періоди активності біодеструкції: осінь 2024 року, весна 2025 року та осінь 2025 року. Погодні умови цих сезонів безпосередньо впливали на ефективність природної та керованої деструкції соломи різних культур. У таблиці 2.1 наведено дані про середньомісячну температуру за метеостанцією Лошкарівка.

Таблиця 2.1 - Середня місячна температура повітря температуру за метеостанцією Лошкарівка.

Період	Місяць	Температура, °С
Осінь 2024	Вересень	10,25
	Жовтень	3,73
	Листопад	1,57
Весна 2024	Березень	4,77
	Квітень	15,00
	Травень	14,05
Осінь 2025	Вересень	10,50
	Жовтень	3,67
	Листопад	1,73

Восени 2024 року на станції Лошкарівка спостерігався нерівномірний розподіл опадів: від 12 мм у жовтні до 39 мм у листопаді. Весняний період 2025 року, натомість, характеризувався помірним зволоженням (13–32 мм), що є сприятливим для активного розкладання рослинних решток.

У таблиця 2.2 наведено дані про місячну кількість опадів за метеостанцією Лошкарівка.

Період	Місяць	Опади, мм
Осінь 2024	Вересень	12
	Жовтень	39
	Листопад	29
Весна 2025	Березень	13
	Квітень	13
	Травень	32
Осінь 2025	Вересень	12
	Жовтень	44
	Листопад	28

Кліматичні умови в періоді проведення досліджень формували виражені піки та спад активності мікроорганізмів. Відповідність температури та зволоження оптимальним діапазнам для мікробіоти ранньою весною та восени створювала природні умови для інтенсифікації процесів деструкції. Саме це визначає необхідність поєднання природних умов із застосуванням біодеструкторів, що дозволяє синхронізувати їхню дію з сезонними циклами ґрунтової мікробіоти [47].

2.4 Технологія внесення препаратів

Технологія внесення біодеструкторів є ключовим елементом системи управління процесами розкладання рослинних решток у ґрунті та визначає не лише швидкість мінералізації, а й характер трансформації органічної речовини, інтенсивність гуміфікаційних процесів і подальший вплив на родючість орного шару. В умовах сучасного землеробства, де значна частина поживних ресурсів акумулюється у післяжнивних рештках, контрольоване біологічне розкладання стає важливою складовою екологічно орієнтованих технологій.

У межах проведених досліджень застосування препаратів Біонорма та Целюлад було спрямоване на прискорення деструкції рослинних решток різної природи — соломи соняшнику гібридів *Бомонд* і *Альдазор* та соломи озимої пшениці сортів *Мудрість одеська* і *Зіра*. Урахування морфологічних та хімічних особливостей цих решток має принципове значення, оскільки їхній склад визначає як доступність субстрату для мікроорганізмів, так і інтенсивність мікробіологічної активності. Соняшникове бадилля містить підвищену кількість структурного лігніну й кремнезему, що формує міцний каркас тканин і ускладнює природний розклад. Натомість солома пшениці характеризується переважанням целюлозно-геміцелюлозного комплексу, який є легкодоступнішим для ферментативної деструкції та швидше мінералізується.

Після збирання врожаю рослинні рештки піддавали подрібненню до дрібної однорідної фракції. Це забезпечувало значне збільшення площі контакту між субстратом і бактеріальними культурами, що входять до складу препаратів, та створювало сприятливі умови для рівномірної колонізації поверхні соломи мікроорганізмами-деструкторами. Подрібнена маса рівномірно розподілялася по поверхні поля. Такий прийом запобігає утворенню локальних скупчень органічної речовини, що могли б спричинити розвиток анаеробних зон, різке падіння швидкості розкладання та посилення процесів гниття [48].

Робочий розчин препаратів готували безпосередньо перед внесенням, суворо дотримуючись регламентованих норм витрати — у середньому 1,5–2,0 л/га, що коригувалося залежно від типу рослинних решток, їх вологості, ступеня подрібнення та фізіологічного стану. Внесення здійснювали за допомогою штангового обприскувача, який забезпечував рівномірне покриття поверхні соломи та високу якість розподілу робочого розчину.

Результативність застосування препаратів у великій мірі визначається дотриманням оптимальних ґрунтово-кліматичних умов, оскільки мікроорганізми у їх складі є живими біосистемами і мають чіткі фізіологічні межі активності. Найвищі показники деструктивної здатності спостерігаються за температури ґрунту +5...+20 °С та вологості 60–70 % від найменшої вологоємності. Ці параметри збігаються з періодами природних піків біологічної активності ґрунту — ранньою весною та пізньою осінню, що обґрунтовує вибір саме цих строків для внесення препаратів у рамках проведених досліджень.

Після обприскування поверхні поля проводили легке загортання рослинних решток у ґрунт на глибину 10–15 см. Цей прийом виконував кілька важливих функцій: збереження вологи, зменшення втрат біопрепарату внаслідок ультрафіолетового випромінювання, стабілізація мікроклімату всередині ґрунтової маси та забезпечення більш тісного контакту мікроорганізмів із рослинними рештками. У комплексі це створювало умови, необхідні для активної ферментації, початкової біодеструкції тканин і подальшої мінералізації органічної речовини.

Окрему увагу під час проведення робіт приділяли різній реакції препаратів на різні типи рослинних решток. Через підвищену щільність, вміст лігніну й механічну стійкість тканин соняшникове бадилля потребувало більш чіткого контролю вологості та температури в період внесення, оскільки навіть незначні відхилення могли сповільнити деструкцію. На відміну від цього, солома озимої пшениці — легкодеструктивний матеріал, для якого застосування біодеструкторів вирішує дещо інші завдання: оптимізація співвідношення вуглецю та азоту, прискорення початкових етапів мінералізації, покращення структури ґрунту та підвищення доступності поживних елементів.

Загалом технологія внесення препаратів Біонорма та Целюлад, реалізована у поєднанні з урахуванням властивостей рослинних решток та ґрунтово-кліматичних умов, забезпечує істотне прискорення розкладання органічних матеріалів — у середньому в 1,5–2 рази. Це сприяє активізації ґрунтової мікробіоти, зниженню ризику накопичення фітопатогенних організмів, поліпшенню структури ґрунту та формуванню сприятливих умов для подальшого підвищення його родючості. Такий підхід, що поєднує природні сезонні ритми ґрунтової біоти та цілеспрямоване введення ефективних мікробних препаратів, можна розглядати як екологічно обґрунтовану технологію, придатну для широкого впровадження у господарствах Дніпропетровської області [50].

2.5 Методи визначення мікробіологічної активності

У проведених дослідженнях оцінювання мікробіологічної активності ґрунтів базувалося насамперед на визначенні чисельності основних фізіологічних груп мікроорганізмів, оскільки саме кількісні показники найбільш повно характеризують реакцію ґрунтової біоти на внесення біодеструкторів та інтенсивність процесів мінералізації органічної речовини. Основним методом

слугувало культивування мікроорганізмів на твердих поживних середовищах відповідно до вимог ДСТУ 7538:2014 «Ґрунти. Методи визначання кількості мікроорганізмів», який регламентує пробопідготовку, приготування ґрунтових суспензій, виконання серійних розведень і висів суспензії на відповідні агаризовані середовища. Після інкубації, що проводилася за оптимальної температури 28–30 °С, здійснювали підрахунок колоній, що вирости, з подальшим перерахунком на одиницю маси сухого ґрунту. Це дозволяло визначати чисельність амоніфікаторів, нітрифікаторів, целюлолітичних мікроорганізмів, фосфатмобілізуючих форм, спороутворюючих бактерій, а також грампозитивних і грамнегативних груп, що в комплексі відображало структуру й інтенсивність функціонування ґрунтового мікробного ценозу [51].

З метою доповнення кількісних мікробіологічних показників застосовували визначення целюлолітичної активності згідно з ДСТУ 4732:2007 «Ґрунти. Визначення целюлолітичної активності». Цей метод ґрунтується на оцінюванні ступеня руйнування целюлозовмісного індикаторного матеріалу в процесі інкубації ґрунтових зразків, що дозволяє оцінити реальну здатність мікроорганізмів розкладати рослинні рештки, зокрема соломі соняшнику і пшениці. Отримані дані використовували для уточнення рівня активності целюлолітичних груп, що визначалися методом прямого підрахунку [52].

Як допоміжні показники використовували ферментативні методи, зокрема визначення активності каталази за ДСТУ ISO 23753-2:2015 та активності уреазы згідно з ДСТУ ISO 14238:2005. Ці показники відображають загальний рівень метаболічної активності мікробіоти та інтенсивність аеробних і азотперетворювальних процесів, однак у даній роботі вони застосовувалися виключно як підтверджувальні щодо основних даних кількісного аналізу. Саме визначення чисельності основних груп мікроорганізмів було ключовим інструментом оцінювання ефективності дії препаратів Біонорма і Целюлад, що забезпечило можливість простежити динаміку змін мікробної популяції та встановити ступінь активізації деструкційних процесів залежно від виду рослинних решток і умов їх розкладання [53].

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Вплив біодеструкторів на швидкість розкладання

Ефективність мінералізації рослинних решток є ключовим чинником формування гумусу, кругообігу елементів живлення та загальної родючості ґрунту. На швидкість розкладання значною мірою впливають як біологічні властивості субстрату, так і активність мікроорганізмів-деструкторів. Тому застосування спеціалізованих біопрепаратів, здатних прискорювати деградацію целюлози, геміцелюлоз та частково лігніну, розглядається як перспективний інструмент оптимізації післяжнивних процесів у агроecosистемах.

У таблиці 3.1 наведено початковий хімічний склад рослинних решток, % сухої маси

Таблиця 3.1 - Початковий хімічний склад рослинних решток, % сухої маси

Культура	Гібрид/сорг	Вологість, %	Органічний вуглець	N, %	C:N	Лігнін, %	Целюлоза, %	Зола, %	Кремній, %
Соняшник	Бомонд	11,0	43,5	0,85	51	22,0	33,0	9,2	0,8
	Альдазор	11,8	44,0	0,78	56	24,0	31,0	10,1	0,9
Озима пшениця	Мудрість одеська	9,5	42,2	0,50	84	14,0	38,5	6,5	2,1
	Зіра	9,0	41,8	0,46	91	13,0	39,0	6,0	2,4

Отримані дані свідчать, що рослинні рештки соняшнику характеризуються дещо вищою вологістю, більшим вмістом органічного вуглецю та значно вищою часткою лігніну і золи порівняно з пшеничною соломою. Зокрема, у гібридів Бомонд та Альдазор вміст лігніну становив відповідно 22,0 і 24,0 %, що є типовим для грубостеблових культур. Це робить соняшникові рештки більш стійкими до мікробної деградації, оскільки лігнін є трудноокиснюваною фракцією, яка потребує специфічних ферментів (лігніназ, пероксидаз). Вищий вміст золи (9,2–10,1 %) також свідчить про більшу кількість мінеральних компонентів у структурі стебла.

Пшенична солома характеризується нижчим вмістом лігніну (13,0–14,0 %) і вищою часткою целюлози (38,5–39,0 %), що робить її більш доступною для целюлолітичних мікроорганізмів на початкових етапах розкладання. Водночас для пшениці характерний значно вищий показник співвідношення C:N (84–91), що свідчить про потенційний дефіцит азоту для мікробів і можливе тимчасове «зв'язування» ґрунтового азоту мікробною біомасою під час активної деструкції. Підвищений вміст кремнію (2,1–2,4 %), типовий для злакових культур, також може впливати на структурну стійкість соломи.

У таблиці 3.2 наведено дані про масову залишкову частку соломи, % від початкової маси для гібридів соняшнику.

Таблиця 3.2 - Масова залишкова частка соломи, % від початкової маси для гібридів соняшнику.

День	Гібриди соняшника					
	Бомонд			Альдазор		
	Контроль	Біонорма	Целюлад	Контроль	Біонорма	Целюлад
0	100	100	100	100	100	100
30	92 ±3	85 ±3	82 ±4	94 ±3	87 ±3	84 ±4
60	80 ±4	68 ±4	66 ±5	83 ±4	70 ±5	68 ±5
90	68 ±5	52 ±5	50 ±6	72 ±5	55 ±5	53 ±6
180	45 ±6	28 ±5	30 ±6	50 ±6	33 ±6	35 ±6

Представлені дані демонструють чітку тенденцію до прискорення мінералізації рослинних решток під впливом обох препаратів.

На початковому етапі маса у всіх варіантах прийнята за 100 %. Уже через 30 діб у контрольних зразках зберігалось 92 % (Бомонд) та 94 % (Альдазор) початкової маси, тоді як використання Біонорми та Целюладу зменшувало цей показник у середньому на 7–12 %. Це свідчить про ранній запуск процесів біодеструкції за участі введених мікробних комплексів.

На 60-й день різниця між контрольними та обробленими варіантами істотно зростає: у контролі залишалось 80–83 % маси, тоді як у варіантах із біодеструкторами — лише 66–70 %. Тобто швидкість деградації у присутності Біонорми та Целюладу була в 1,2–1,3 раза вищою.

На 90-й день у контролі зберігалось близько 68–72 % соломи, тоді як у варіантах із Біонормою залишок становив 52–55 %, а для Целюладу — 50–53 %. Це підкреслює стабільну перевагу препаратів на середніх етапах деструкції, коли активно розкладаються целюлозна та геміцелюлозна фракції.

На завершальному етапі (180 діб) спостерігається найбільший контраст між варіантами. У контролі залишок маси становив 45 % для гібриду Бомонд і 50 % для Альдазору, тоді як у варіантах із препаратами — лише 28–35 %. Це означає, що біодеструктори забезпечили додаткове розкладання ще близько 15–20 % маси, яка без їх застосування залишалася б у ґрунті у вигляді більш стійких структур.

Загалом обидва гібриди соняшнику показали подібну реакцію на обробку біодеструкторами, а Біонорма і Целюлад продемонстрували високу ефективність у прискоренні мінералізації рослинних решток протягом усього експерименту. Це підтверджує доцільність їх застосування для оптимізації розкладання грубостеблової соняшникової соломи, яка зазвичай має високий вміст лігніну та повільно деградує природним шляхом.

У таблиці 3.3 наведено дані про масову залишкову частку соломи, % від початкової маси для сортів пшениці.

Таблиця 3.3 - Масова залишкова частка соломи, % від початкової маси для сортів пшениці.

День	Сорти озимої пшениці					
	Мудрість одеська			Зіра		
	Контроль	Біонорма	Целюлад	Контроль	Біонорма	Целюлад
0	100	100	100	100	100	100
30	88 ±3	75 ±4	78 ±3	90 ±3	76 ±4	79 ±3
60	72 ±4	55 ±4	58 ±4	75 ±4	57 ±4	60 ±4
90	56 ±5	38 ±5	40 ±5	60 ±5	42 ±5	43 ±5
180	30 ±5	12 ±4	15 ±4	35 ±5	15 ±4	18 ±4

На старті експерименту (0 діб) у всіх варіантах маса прийнята за 100 %. Уже на 30-й день у контрольних зразках зберігалось 88–90 % початкової маси, тоді як у варіантах із біодеструкторами — 75–79 %. Це свідчить про значно активніший початковий розклад целюлозної частини соломи за наявності мікробних препаратів.

Через 60 діб різниця між контролем і обробками збільшується: у контролі залишок становив 72 % (Мудрість одеська) та 75 % (Зіра), тоді як у Біонорми й Целюладу — лише 55–60 %. Біодеструктори забезпечували на 15–17 % вищий рівень розкладання порівняно з природним фоном, що підкреслює активізацію целюлолітичних мікроорганізмів у цей період.

На 90-й день спостерігається суттєве зниження маси у всіх варіантах, однак контраст між контролем та обробками стає максимально вираженим. У контролі залишалось 56–60 % соломи, тоді як у сортів, оброблених Біонормою, — лише 38–42 %, а у варіантах із Целюладом — 40–43 %. Це означає, що препарати прискорювали трансформацію як целюлозної, так і частково лігнінової фракції.

Наприкінці експерименту (180 діб) у контрольних варіантах збереглося 30 % (Мудрість) та 35 % (Зіра) початкової маси соломи. У той же час під дією Біонорми та Целюладу залишок зменшився до 12–18 %, що вказує на практично

подвійну інтенсивність розкладання порівняно з природним процесом без стимуляторів.

Порівняння двох сортів показує, що солома Мудрості одеської дещо швидше підлягала деструкції, що може бути пов'язано з тоншою структурою стебла та нижчим вмістом кремнію. Проте загальні тренди для обох сортів однакові: обидва біодеструктори значно прискорюють деградацію соломи протягом усього досліджуваного періоду.

Таким чином, використання Біонорми та Целюладу дозволяє ефективно інтенсифікувати процес мінералізації пшеничної соломи, зменшуючи її залишкову масу майже у 2–2,5 рази порівняно з контролем на кінець 180-денної інкубації. Це демонструє високу агроекологічну доцільність застосування біодеструкторів у системах землеробства, де злакові культури залишають значну кількість рослинних решток.

3.2 Мікробіологічні показники процесу біодеструкції

Вивчення чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті має важливе значення для розуміння функціонування агроєкосистем і напрямів трансформації органічної речовини. Мікробний комплекс є провідною ланкою в деструкції рослинних решток, а тому кількісні характеристики окремих фізіологічних груп відображають не лише інтенсивність біохімічних процесів, але й стан трофічних взаємодій у ґрунті. Аналіз таких даних дозволяє оцінити потенційну активність мікробіоти, визначити її роль у мобілізації елементів живлення та встановити закономірності, що впливають на родючість ґрунту.

Моніторинг динаміки мікроорганізмів різного функціонального спрямування є також інструментом для оцінювання ефективності застосованих агротехнологічних рішень і здатності ґрунтової системи до самооновлення. Мікробіологічні показники мають фундаментальне значення для поглиблення

знань про мікробні процеси та забезпечують наукове підґрунтя для оптимізації систем ведення землеробства, орієнтованих на підтримання сталого кругообігу органічної речовини та підвищення екологічної стійкості ґрунтів.

У таблиці 3.4 наведено дані про середньозважені показники за період досліджень чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті під час деструкції соломи соняшника гібриду «Бомонд», тис. КУО/г ґрунту

Таблиця 3.4 - Середньозважені показники за період досліджень чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті під час деструкції соломи соняшника гібриду «Бомонд», тис. КУО/г ґрунту

Група мікроорганізмів	Контроль	Біонорма	Целюлад
Целюлозоруйнівні	2836,8±189,1	3790,0 ±250,0	4150,0 ±275,0
Пектинруйнівні	3017,9 ±201,2	3950,0 ±263,3	4300,0 ±286,7
Олігонітрофільні	18629,7 ±1242,0	22500,0 ±1500,0	23800,0±1586,7
Оліготрофи	6990,6 ±466,0	6600,0 ±440,0	6450,0 ±430,0
Гумусруйнівні	3421,4 ±228,1	3700,0 ±246,7	3850,0 ±256,7

Отримані результати засвідчують, що внесення біодеструкторів суттєво впливало на структуру та інтенсивність розвитку мікробіоценозу, відповідального за мінералізацію органічних решток.

Порівняно з контролем у варіантах із застосуванням препаратів спостерігалось виразне зростання чисельності целюлозоруйнівних мікроорганізмів, що є ключовою групою у розкладанні структурно складних компонентів рослинних решток. У контрольному варіанті їх кількість становила 2836,8 тис. КУО/г ґрунту, тоді як під дією Біонорми вона збільшувалася до 3790,0 тис. КУО/г, а у варіанті з Целюладом — до 4150,0 тис. КУО/г. Це свідчить про активізуючий ефект обох препаратів, причому Целюлад виявився більш ефективним у стимулюванні целюлолітичної активності.

Аналогічна тенденція простежується щодо пектинруйнівних мікроорганізмів, чисельність яких у контролі становила 3017,9 тис. КУО/г ґрунту. За використання Біонорми цей показник зростав до 3950,0 тис. КУО/г, а

за дії Целюладу — до 4300,0 тис. КУО/г. Підвищення питомої чисельності цієї групи підтверджує прискорення процесів розкладання пектинових компонентів клітинних стінок соломи.

Важливою індикаторною групою є олігінитрофільні мікроорганізми, що реагують на надходження доступних органічних субстратів. Їх чисельність у контролі досягала 18629,7 тис. КУО/г ґрунту, тоді як у варіантах із препаратами вона зростала до 22500,0 тис. КУО/г (Біонорма) та 23800,0 тис. КУО/г (Целюлад). Це свідчить про інтенсифікацію азотного циклу та посилення мікробіального метаболізму за умов деструкції органічної маси.

На відміну від зазначених груп, загальна чисельність оліготрфів виявилась дещо нижчою у варіантах із препаратами: 6990,6 тис. КУО/г у контролі проти 6600,0 та 6450,0 тис. КУО/г у варіантах з Біонормою та Целюладом відповідно. Це є типовою реакцією для поліфункціональних груп мікроорганізмів, які за умов активної деструкції органічної речовини поступаються більш спеціалізованим формам.

Чисельність гумусруйнівних мікроорганізмів також зростала за дії біодеструкторів: від 3421,4 тис. КУО/г у контролі до 3700,0 тис. КУО/г під впливом Біонорми та 3850,0 тис. КУО/г у варіанті з Целюладом. Це свідчить про активізацію процесів мінералізації складних гумусових сполук у відповідь на надходження легко доступних рослинних субстратів.

У таблиці 3.5 наведено дані про середньозважені показники за період досліджень чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті під час деструкції соломи соняшника гібриду «Альдазор», тис. КУО/г ґрунту

Таблиця 3.5 - Середньозважені показники за період досліджень чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті під час деструкції соломи соняшника гібриду «Альдазор», тис. КУО/г ґрунту

Група мікроорганізмів	Контроль	Біонорма	Целюлад
Целюлозоруйнівні	4003,0 ± 266,9	5200,0 ± 346,7	5700,0 ± 380,0
Пектинруйнівні	1067,9 ± 71,2	1500,0 ± 100,0	1850,0 ± 123,3
Олігонітрофільні	7331,5 ± 488,8	9500,0 ± 633,3	11000,0 ± 733,3

Оліготрофи	7209,8± 480,7	7050,0± 470,0	6900,0± 460,0
Гумусруйнівні	892,0± 59,5	1100,0± 73,3	1250,0± 83,3

Порівняно з контролем чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів істотно зростала у варіантах із застосуванням препаратів. У контролі цей показник становив 4003,0 тис. КУО/г ґрунту, у варіанті з Біонормою — 5200,0 тис. КУО/г, а за використання Целюладу — 5700,0 тис. КУО/г. Отже, обидва препарати суттєво стимулювали активність мікроорганізмів, що розкладають целюлозу, причому Целюлад забезпечував найбільш інтенсивне зростання їх чисельності. Це підтверджує його підвищену ефективність щодо прискорення руйнування структурних компонентів соняшникової соломи.

Подібна тенденція спостерігається і для пектинруйнівних мікроорганізмів, які беруть участь у розкладанні пектинових речовин клітинних стінок рослин. У контрольному варіанті їх кількість становила лише 1067,9 тис. КУО/г ґрунту, що свідчить про порівняно низьку природну активність цієї групи для гібриду «Альдазор». Проте внесення Біонорми підвищувало цей показник до 1500,0 тис. КУО/г, а застосування Целюладу — до 1850,0 тис. КУО/г. Такий приріст демонструє значне посилення деструкції легкорозкладних компонентів рослинної маси у відповідь на дію препаратів.

Чисельність олігінитрофільних мікроорганізмів, які активно реагують на надходження органічних субстратів і дефіцит доступного азоту, також помітно зростала. У контролі їх кількість становила 7331,5 тис. КУО/г ґрунту, тоді як у варіантах з Біонормою та Целюладом — відповідно 9500,0 і 11000,0 тис. КУО/г. Підвищення чисельності цієї групи є свідченням активізації азотного обміну та інтенсифікації мікробного метаболізму в процесі деструкції соломи.

На відміну від вищезазначених груп, чисельність оліготрофів у варіантах із біодеструкторами дещо зменшувалася: 7209,8 тис. КУО/г у контролі, 7050,0 тис. КУО/г за дії Біонорма та 6900,0 тис. КУО/г у варіанті з Целюладом. Така тенденція є характерною для оліготрофних мікроорганізмів, що за умов

посиленої деструкції органічної речовини поступаються місцем спеціалізованим формам, які більш ефективно засвоюють наявні субстрати.

Чисельність гумусруйнівних мікроорганізмів також демонструвала позитивну динаміку у відповідь на внесення препаратів. У контролі їх кількість становила 892,0 тис. КУО/г ґрунту, тоді як у варіантах із Біонормою та Целюладом — відповідно 1100,0 та 1250,0 тис. КУО/г. Підвищення цього показника свідчить про активізацію мінералізації більш стійких органічних сполук, що може бути пов'язано з надходженням доступної органічної маси після внесення соломи та стимуляцією мікробної активності.

У таблиці 3.6 наведено дані про середньозважені показники за період досліджень чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті під час деструкції соломи озимої пшениці сорту «Зіра», тис. КУО/г ґрунту

Таблиця 3.6 - Середньозважені показники за період досліджень чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті під час деструкції соломи озимої пшениці сорту «Мудрість одеська», тис. КУО/г ґрунту

Група мікроорганізмів	Контроль	Біонорма	Целюлад
Целюлозоруйнівні	7160,3± 477,4	8300,0± 553,3	8700,0± 580,0
Пектинруйнівні	4561,1 ± 304,1	5500,0± 366,7	6100,0± 406,7
Олігонітрофільні	9992,0± 666,1	11000,0± 733,3	12200,0± 813,3
Оліготрофи	6792,5± 452,8	6750,0± 450,0	6500,0± 433,3
Гумусруйнівні	290,3± 19,4	350,0± 23,3	400,0 ± 26,7

Найвищі показники зареєстровано в групі олігонітрофільних мікроорганізмів, які відіграють ключову роль у трансформації азотовмісних органічних сполук. У контрольному варіанті їх чисельність становила 9992,0 тис. КУО/г ґрунту, тоді як додавання «Біонорми» підвищувало цей показник до 11000,0 тис. КУО/г ґрунту, а «Целюладу» – до 12200,0 тис. КУО/г ґрунту. Це свідчить про посилення азотного циклу в ґрунті під дією біопрепаратів.

Помітне збільшення відмічено також серед целюлозоруйнівних мікроорганізмів, відповідальних за первинний розклад структурних

полісахаридів рослинних решток. У контролі їх чисельність становила 7160,3 тис. КУО/г ґрунту, тоді як у варіантах із «Біонормою» та «Целюладом» – 8300,0 та 8700,0 тис. КУО/г ґрунту відповідно. Це підтверджує активізацію руйнування целюлозної матриці соломи.

Схожа тенденція спостерігалася і серед пектинруйнівних мікроорганізмів: від 4561,1 тис. КУО/г ґрунту у контролі до 5500,0 та 6100,0 тис. КУО/г ґрунту у варіантах із застосуванням препаратів, що також вказує на інтенсифікацію руйнування міжклітинних полісахаридів.

На відміну від попередніх груп, чисельність оліготрофів суттєво не зростала під дією біопрепаратів, а навіть дещо зменшувалася (з 6792,5 у контролі до 6750,0 і 6500,0 тис. КУО/г ґрунту). Це є типовим явищем, оскільки із збагаченням ґрунту доступними органічними речовинами частка оліготрофних форм часто знижується.

Група гумусруйнівних мікроорганізмів продемонструвала помірне, але стабільне збільшення чисельності: з 290,3 тис. КУО/г ґрунту у контролі до 350,0 та 400,0 тис. КУО/г ґрунту при використанні «Біонорми» та «Целюладу». Це свідчить про активізацію мікробіологічного розкладу складних органічних речовин та оновлення гумусового фонду.

У таблиці 3.7 наведено дані про середньозважені показники за період досліджень чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті під час деструкції соломи озимої пшениці сорту «Зіра», тис. КУО/г ґрунту.

Таблиця 3.7 - Середньозважені показники за період досліджень чисельності ключових мікробіологічних груп у ґрунті під час деструкції соломи озимої пшениці сорту «Зіра», тис. КУО/г ґрунту

Група мікроорганізмів	Контроль	Біонорма	Целюлад
Целюлозоруйнівні	3779,4± 252,0	4500,0± 300,0	4800,0 ± 320,0
Пектинруйнівні	2615,6± 174,4	3300,0± 220,0	3550,0 ± 236,7
Олігонітрофільні	7450,3± 496,7	8500,0± 566,7	9200,0± 613,3
Оліготрофи	6798,4± 453,2	6650,0± 443,3	6400,0± 426,7
Гумусруйнівні	222,5± 14,8	300,0± 20,0	350,0± 23,3

Найбільш чисельною групою традиційно залишаються олігонітрофільні мікроорганізми, що беруть участь у трансформації азотовмісних сполук і є важливими індикаторами інтенсивності мінералізаційних процесів. У контролі їх чисельність становила 7450,3 тис. КУО/г ґрунту, тоді як у варіантах із «Біонормою» та «Целюладом» показники зростали відповідно до 8500,0 та 9200,0 тис. КУО/г ґрунту. Це свідчить про посилення азотного обміну в ґрунті внаслідок внесення препаратів.

Значне зростання відзначено також серед целюлозоруйнівних мікроорганізмів, які забезпечують ферментативне розщеплення структурної целюлози соломи. Якщо у контролі їх чисельність становила 3779,4 тис. КУО/г ґрунту, то після застосування «Біонорми» вона зросла до 4500,0 тис. КУО/г ґрунту, а у варіанті з «Целюладом» — до 4800,0 тис. КУО/г ґрунту. Це підтверджує активізацію первинних етапів деструкції рослинних решток.

Подібну тенденцію демонструє група пектинруйнівних мікроорганізмів, чисельність яких збільшилася з 2615,6 тис. КУО/г ґрунту у контролі до 3300,0 та 3550,0 тис. КУО/г ґрунту у варіантах із препаратами. Це вказує на посилення руйнування міжклітинних сполучних речовин, насамперед пектинів.

У групі оліготрофів спостерігається зворотна динаміка: їх чисельність зменшується зі 6798,4 тис. КУО/г ґрунту у контролі до 6650,0 та 6400,0 тис. КУО/г ґрунту у варіантах з «Біонормою» та «Целюладом». Така закономірність є типовою, оскільки внесення додаткового органічного субстрату й активізація мінералізаційних процесів часто призводять до зниження частки мікроорганізмів, адаптованих до бідніших умов.

Чисельність гумусруйнівних мікроорганізмів зростала найпомітніше у варіантах з препаратами: від 222,5 тис. КУО/г ґрунту у контролі до 300,0 та 350,0 тис. КУО/г ґрунту. Це свідчить про активізацію мікробного розкладу складних органічних сполук та оновлення гумусових компонентів ґрунту.

3.3 Визначення целюлозолітичної активності

Визначення целюлозолітичної активності ґрунту є одним із ключових показників оцінювання інтенсивності мінералізаційних процесів та ефективності залучення мікробних угруповань до деструкції рослинних решток. Оскільки целюлоза становить основну частку структурних полісахаридів соломи та забезпечує формування її фізичної матриці, швидкість її розкладання безпосередньо впливає на темпи трансформації органічної речовини, повернення елементів живлення у ґрунт та загальну біологічну продуктивність агроєкосистеми. Показник целюлозолітичної активності, таким чином, є інтегральним індикатором функціонального стану ґрунтової мікробіоти та її здатності реагувати на зміни кліматичних умов, вологості та надходження органічних субстратів.

У сучасних технологіях утилізації післяжнивних решток важливе місце займають мікробні біодеструктори, що містять високоефективні целюлолітичні та сапротрофні штами. Вони прискорюють мікробіологічні процеси, зменшують тривалість циклу розкладання та сприяють підвищенню біогенності орного шару. Ефективність їх дії істотно залежить від температурного режиму та рівня зволоження, що визначають темпи розвитку мікроорганізмів та доступність субстрату.

На рисунку 3.1 наведено дані про динаміку целюлозолітичної активності в ґрунті за дії біодеструкторів під час розкладання соломи соняшнику гібриду Бомонд у взаємозв'язку з температурою та опадами.

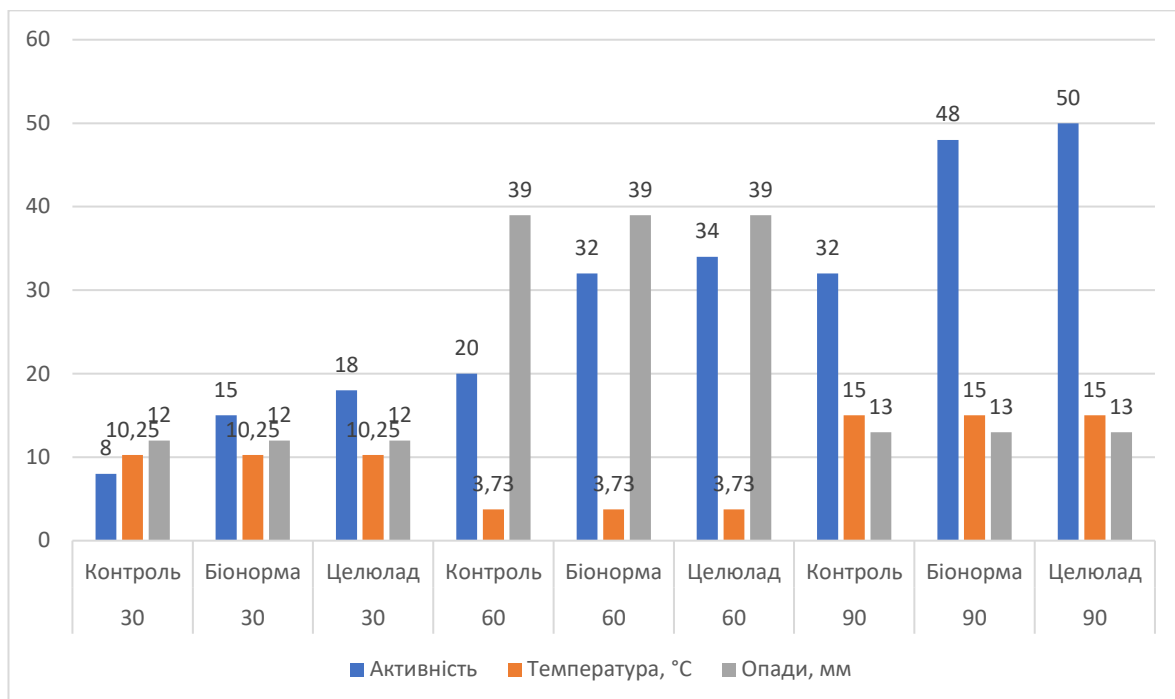


Рисунок 3.1 - Динаміка целюлозолітичної активності в ґрунті за дії біодеструкторів під час розкладання соломи соняшнику гібриду Бомонд у взаємозв'язку з температурою та опадами.

Представлені дані демонструють суттєвий вплив застосованих біодеструкторів на інтенсивність розкладання целюлозовмісної фракції соломи, а також відображають взаємозв'язок між мікробіологічною активністю та основними кліматичними чинниками — температурою повітря та кількістю атмосферних опадів у відповідні періоди дослідження.

Отримані результати свідчать, що вже на 30-ту добу обробка Біонормою та Целюладом забезпечувала активність мікроорганізмів на рівні 15 та 18 умовних одиниць відповідно, що майже вдвічі перевищувало показники контролю (8 од.). На 60-ту добу, коли середньодобова температура знижувалась до 3,73 °C при підвищенні кількості опадів, природна активність мікрофлори була помітно нижчою (20 од.), тоді як за внесення біодеструкторів вона зростала до 32–34 од., що вказує на здатність препаратів підтримувати мікробіологічні процеси навіть за несприятливих кліматичних умов.

Найвищі значення активності зафіксовано на 90-ту добу у весняний період (температура 15 °C), коли природні умови були максимально

сприятливими для розвитку целюлозолітиків. У контрольному варіанті активність зростає до 32 од., тоді як у варіантах з Біонормою та Целюладом вона досягла 48 та 50 од., відповідно. Це свідчить про синергетичний ефект поєднання природного весняного піку мікробіологічної активності та застосування мікробних препаратів.

На рисунку 3.2 наведено дані про динаміку целюлозолітичної активності в ґрунті за дії біодеструкторів під час розкладання соломи соняшнику гібриду Альдазор у взаємозв'язку з температурою та опадами.

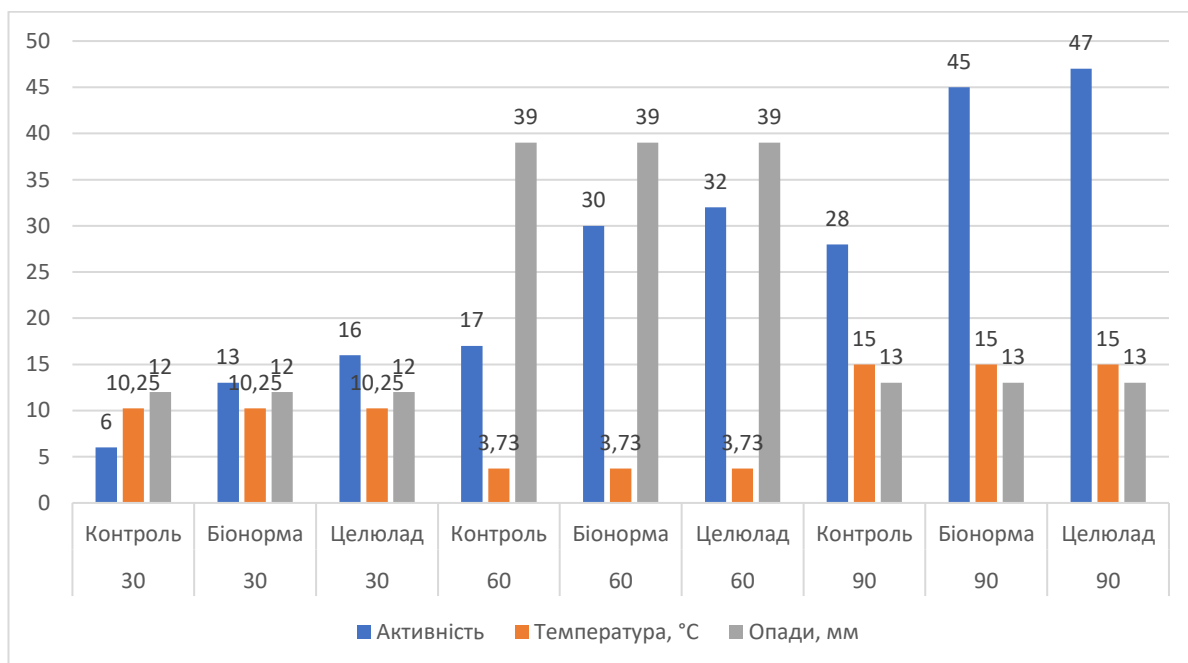


Рисунок 3.2 - Динаміка целюлозолітичної активності в ґрунті за дії біодеструкторів під час розкладання соломи соняшнику гібриду Альдазор у взаємозв'язку з температурою та опадами.

На графіку спостерігається, що вже на 30-ту добу внесення біопрепаратів забезпечувало істотне підвищення целюлозолітичної активності порівняно з контролем: 13–16 умовних одиниць проти 6 од. відповідно. Це відображає ранній запуск мікробіологічних процесів за рахунок введених целюлолітичних штамів. Зниження середньодобової температури до 3,73 °C при збільшенні кількості опадів на 60-ту добу призводить до певного уповільнення природного розкладання (17 од.), однак у варіантах із Біонормою та Целюладом активність

зростає до 30–32 одиниць, що на графіку проявляється як чітке розходження кривих у напрямку зростання.

Максимальні значення активності спостерігаються на 90-ту добу, коли весняний період із середньою температурою 15 °С формує оптимальні умови для розвитку мікрофлори. На графіку видно різкий підйом кривої для Біонорми (45 од.) та Целюладу (47 од.), тоді як контрольний варіант досягає лише 28 од. Така динаміка підтверджує виражений синергетичний ефект поєднання природного весняного піку мікробіологічної активності з дією біодеструкторів.

На рисунку 3.3 наведено дані про динаміку целюлозолітичної активності ґрунту під час розкладання соломи озимої пшениці сорту Мудрість одеська за різних варіантів обробки у взаємозв'язку з температурними умовами та кількістю опадів

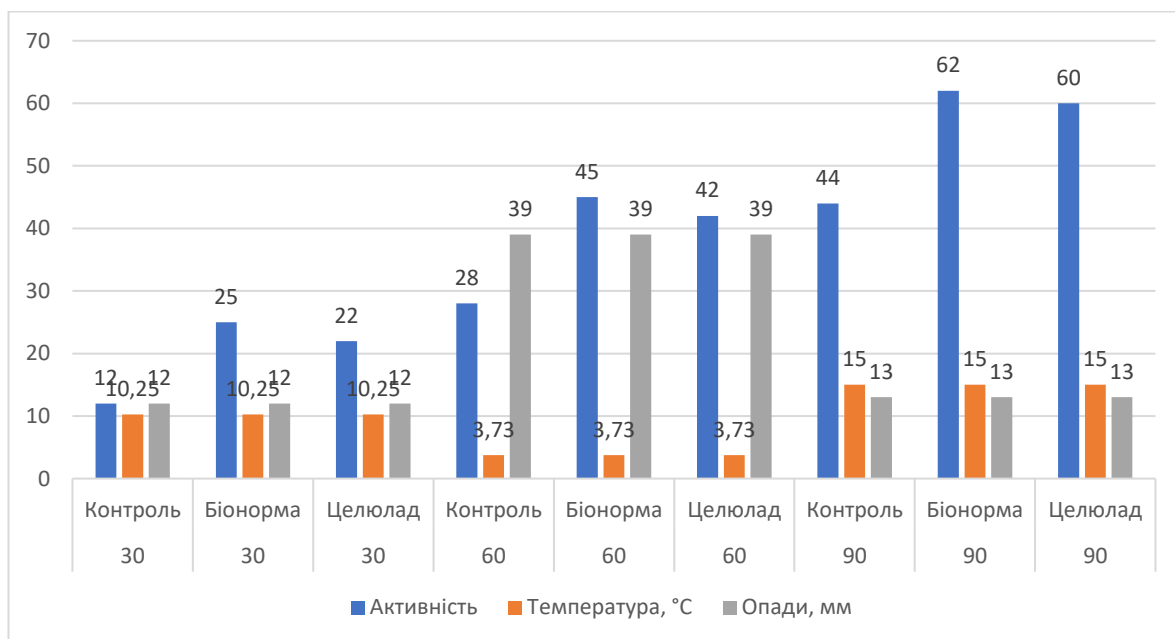


Рисунок 3.3 - Динаміка целюлозолітичної активності ґрунту під час розкладання соломи озимої пшениці сорту Мудрість одеська за різних варіантів обробки у взаємозв'язку з температурними умовами та кількістю опадів

Дані охоплюють 30-, 60- та 90-ту добу експозиції та демонструють вплив біодеструкторів «Біонорма» та «Целюлад» на інтенсивність мікробіологічних процесів у порівнянні з контролем.

На 30-ту добу, коли середня температура становила 10,25 °C при незначній кількості опадів (12 мм), спостерігалося помірне розкладання соломи. У контрольному варіанті целюлозолітична активність становила 12 умовних одиниць, тоді як застосування Біонорми та Целюладу збільшувало її до 25 та 22 од., відповідно. Це свідчить про раннє включення мікробних комплексів до процесу деструкції клітковини за оптимальних осінніх умов.

На 60-ту добу, у період зниження температури до 3,73 °C та підвищення опадів до 39 мм, природна мікробіологічна активність у контролі зросла до 28 од., що є ознакою сповільненого, але триваючого розкладання. Водночас у варіантах із біодеструкторами активність досягала 45 од. для Біонорми та 42 од. для Целюладу. Це вказує на здатність препаратів підтримувати інтенсивність деструктивних процесів навіть за умов охолодження, коли активність ґрунтової мікробіоти зазвичай знижується.

Найвищі показники активності зафіксовано на 90-ту добу, що збіглося з весняним підвищенням температури до 15,00 °C та помірним рівнем опадів (13 мм). У контрольному варіанті активність зросла до 44 од., а у варіантах із внесенням біодеструкторів становила 60–62 од. Зростання різниці між контролем і обробленими варіантами в цей період свідчить про синергічний ефект оптимальних кліматичних умов та застосування мікробних препаратів.

Отримані результати підтверджують, що солома озимої пшениці, як більш доступний субстрат для мікробіоти, реагує на внесення біодеструкторів швидше та виразніше порівняно із природним фоном. Біонорма та Целюлад забезпечили стабільно високий рівень активності на всіх етапах розкладання, що свідчить про їх ефективність у прискоренні деструкції целюлозної фракції соломи та оптимізації відтворення органічної речовини в ґрунті.

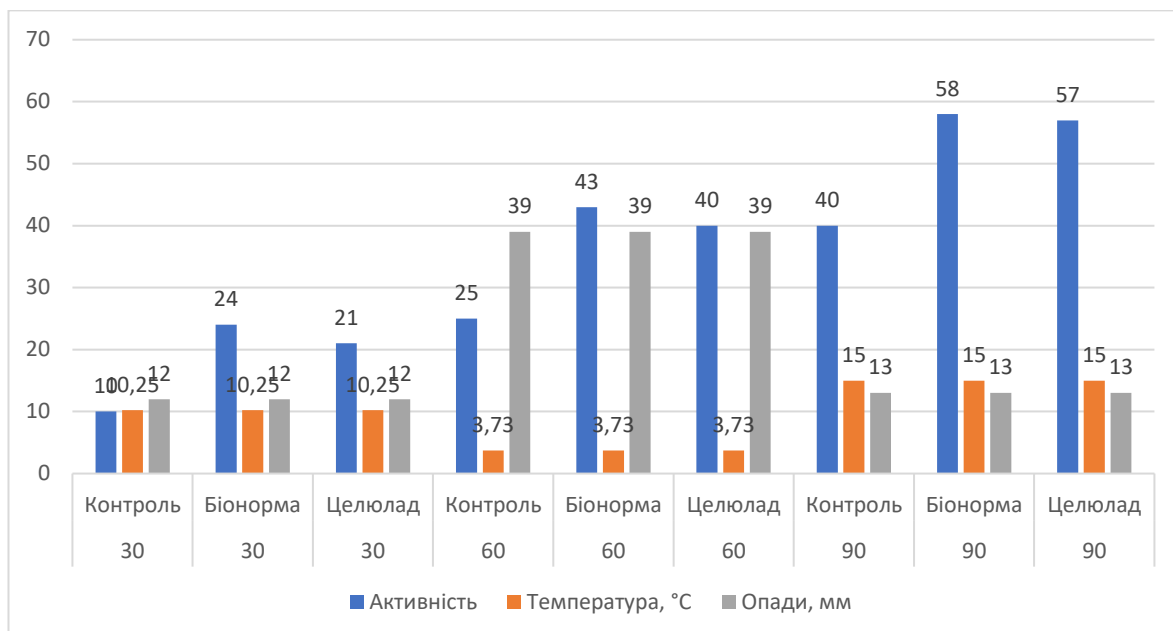


Рисунок 3.4 - Динаміка целюлозолітичної активності ґрунту під час розкладання соломи озимої пшениці сорту *Зіра* за різних варіантів обробки у взаємозв'язку з температурними умовами та кількістю опадів

Рисунок відображає зміну целюлозолітичної активності ґрунту під час розкладання соломи озимої пшениці сорту *Зіра* за трьох температурних режимів та різних варіантів обробки — контрольного, а також із застосуванням препаратів «Біонорма» і «Целюлад». На етапі 30 діб активність є порівняно низькою: у контролі вона становить 10 одиниць, тоді як під дією препаратів зростає до 24 одиниць у варіанті з Біонормою і до 21 одиниці у варіанті з Целюладом. Це свідчить про ранній стимулювальний вплив біопрепаратів на мікроорганізми, що беруть участь у розкладанні рослинних решток. Через 60 діб показники суттєво підвищуються: активність у контролі досягає 25 одиниць, у варіантах з Біонормою — 43 одиниць, а з Целюладом — 40 одиниць. Цей період характеризується високою кількістю опадів (приблизно 39–40 мм), що забезпечує оптимальні умови для розвитку целюлозоруйнівних мікроорганізмів, тому біопрепарати проявляють максимальну ефективність. На етапі 90 діб активність продовжує зростати: в контролі вона становить 40 одиниць, у варіантах з Біонормою — 58 одиниць, а з Целюладом — 57 одиниць. Попри зменшення кількості опадів (до 13 мм), мікробні процеси залишаються

інтенсивними, що свідчить про стабільну адаптацію мікроміцету до органічної речовини та пролонговану дію препаратів. Загалом дані демонструють, що застосування Біонорми та Целюладу значно прискорює мінералізацію соломи, а максимальна активність мікробіоти спостерігається на інтервалі 60–90 діб за поєднання сприятливих температурних умов та доступності вологи.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Безпека під час польових робіт

Проведення польових досліджень на території дослідних ділянок Інституту зернових культур НААН України передбачає дотримання комплексу вимог з охорони праці, санітарії та виробничої безпеки у відповідності до діючих нормативно-правових актів. Основними документами, що регулюють організацію безпечних умов праці, є: Закон України «Про охорону праці», НПАОП 01.0-1.01-10 «Правила охорони праці в сільському господарстві», ДСН 3.3.6.042–99 «Державні санітарні правила роботи в неорганізованих умовах праці», ДСанПіН 2.2.4-171-10 щодо умов праці під відкритим небом, а також загальні вимоги стандартів щодо засобів персонального захисту.

Перед виконанням польових робіт персонал повинен пройти інструктаж з охорони праці та бути ознайомленими з потенційно небезпечними факторами: нерівністю рельєфу, ризиком падіння, ураженням гострим інструментом, дією високих температур, прямою сонячною радіацією, а також небезпекою контакту з дикими тваринами, комахами та кліщами. Згідно з вимогами НПАОП 01.0-1.01-10 та санітарних норм, працівники повинні бути забезпечені відповідним спецодягом: міцним закритим взуттям, головним убором, захисними окулярами і рукавицями при роботі з рослинними рештками або ґрунтовими пробовідбірниками. У сонячну погоду необхідно використовувати засоби захисту від ультрафіолетового випромінювання та дотримуватися регламентованих перерв для запобігання тепловим ударам [54].

Особлива увага приділяється безпечному використанню інструментів і пристроїв для відбору проб ґрунту та рослин. Усі інструменти повинні бути

технічно справними, а робітники зобов'язані застосовувати їх відповідно до вимог інструкцій. Забороняється переносити інструмент гострою частиною вперед, залишати його на землі у зоні пересування, працювати з пошкодженими або деформованими елементами. Структурування робочого місця має відповідати принципам ергономіки та безпеки, що передбачає правильне розміщення обладнання, наявність аптечки першої допомоги та засобів для швидкого реагування в разі травм.

Внаслідок того, що роботи виконуються на відкритій місцевості, потрібно дотримуватися санітарних норм щодо перебування під прямим сонцем і при високих температурах. Згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10, тривалість та інтенсивність роботи має коригуватись залежно від погодних умов, а працівники повинні забезпечуватись питною водою та мати можливість відпочинку в затіненому місці.

Під час перебування на природних ділянках слід враховувати біологічні ризики. Відповідно до рекомендацій МОЗ щодо профілактики укусів кліщів, працівники мають використовувати засоби репелентного захисту та проводити самоогляд після завершення робіт. Усі випадки травмування або погіршення самопочуття повинні негайно реєструватися відповідно до чинних інструкцій з надання першої допомоги та актування нещасних випадків.

Дотримання вимог охорони праці під час польових робіт забезпечує безпечні умови для виконавців та сприяє якісному проведенню дослідницьких робіт, що відповідають вимогам національних нормативів і стандартів у сфері безпеки праці [55].

4.2 Безпека роботи з біопрепаратами

Робота з біологічними препаратами, що застосовуються для біодеструкції рослинних решток повинна здійснюватися відповідно до вимог державних

стандартів у галузі охорони праці. Основні терміни, поняття та загальні принципи безпечної діяльності визначені в ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Терміни та визначення», який регламентує структуру системи управління безпекою праці та підходи до оцінки ризиків під час роботи з біологічними агентами.

У процесі виконання робіт з порошковими формами препаратів необхідно запобігати утворенню аерозолів і пилу, оскільки мікроорганізми та ферментні комплекси можуть потрапляти в органи дихання. Захист органів дихання повинен забезпечуватися відповідно до ДСТУ 149:2017, який встановлює вимоги до фільтрувальних респіраторів проти часток (рекомендовано клас FFP2 або FFP3). Для збереження зору При приготуванні робочих розчинів необхідно використовувати захисні окуляри згідно з вимогами ДСТУ 166:2017 «Засоби індивідуального захисту очей».

Захист шкіри рук та тіла регламентується стандартами ДСТУ 3688:2016 «Одяг захисний. Загальні вимоги» та ДСТУ EN ISO 374-5:2018 «Рукавички захисні від небезпечних хімічних речовин і мікроорганізмів». Рукавички повинні бути нітриловими або латексними, стійкими до впливу біологічних агентів. Допускається робота лише у спецодязі, що запобігає прямому контакту препарату з відкритими ділянками шкіри [56].

Підготовка робочих розчинів, змішування препаратів та інші технологічні операції необхідно виконувати у приміщеннях із добре організованою вентиляцією відповідно до ДСТУ EN 12779:2003 «Системи вентиляційні. Загальні вимоги». Місцева витяжка або робота на відкритому повітрі є обов'язковою умовою для уникнення інгаляційного впливу біоагентів.

Створення безпечних умов праці також передбачає професійну підготовку персоналу. Допуск до роботи здійснюється лише після проходження первинного та повторного інструктажів згідно з вимогами нормативно-правових актів з охорони праці, зокрема НПАОП, які регламентують порядок навчання, інструктажів та перевірки знань. Працівник повинен бути ознайомлений з

властивостями препаратів, методами роботи, заходами безпеки та правилами надання першої домедичної допомоги.

Зберігання біопрепаратів повинно відповідати вимогам ДСТУ 3135.0-95 «Засоби захисту рослин. Загальні вимоги до транспортування, зберігання та застосування». Препарати необхідно тримати у герметично закритій заводській упаковці, у сухому та вентильованому приміщенні, окремо від пестицидів, добрив і продуктів харчування. Висока вологість і нагрівання на сонці можуть знизити життєздатність мікроорганізмів і ефективність біодеструкції [57].

Маркування упаковки препаратів, зокрема інформація про умови зберігання, термін придатності та заходи безпеки, повинна відповідати ДСТУ 3135.2-2003 «Засоби захисту рослин. Маркування». Утилізація використаної тари здійснюється відповідно до ДСТУ 4246:2003 «Тара. Вимоги щодо поводження з використаною тарою з-під пестицидів і агрохімікатів», оскільки тара з-під біопрепаратів належить до категорії, що потребує спеціального поводження. Залишки препаратів забороняється зливати у ґрунт, каналізацію або водойми.

Класи небезпеки компонентів біопрепаратів визначаються згідно з ДСТУ 12.1.007-76 «ССБП. Шкідливі речовини. Класифікація та загальні вимоги безпеки», відповідно до якого препарати для біодеструкції органічних решток належать до 4-го класу небезпеки — малонебезпечні речовини.

Дотримання зазначених вимог забезпечує мінімізацію професійних ризиків, попереджає негативний вплив мікробіологічних агентів на здоров'я працівників та сприяє ефективному й екологічно безпечному застосуванню біодеструкторів у сільськогосподарському виробництві [58].

4.3 Безпека при лабораторних роботах

Проведення лабораторних досліджень у рамках роботи, що стосується оцінювання ефективності біодеструкторів рослинних решток, потребує суворого дотримання вимог безпеки. Робота з біологічними матеріалами, мікробіологічними середовищами та хімічними реагентами передбачає наявність потенційних ризиків, пов'язаних із можливим інфікуванням, хімічними опіками, пошкодженням дихального тракту та порушенням санітарно-гігієнічних норм. Тому під час виконання лабораторних процедур персонал має забезпечувати належний рівень індивідуального та колективного захисту.

Усі маніпуляції з мікроорганізмами (деструкторними культурами, ґрунтовою мікробіотою тощо) виконуються виключно на робочому місці, оснащеному витяжною шафою або боксом із ламінарним потоком повітря. Перед початком виконання робіт необхідно виконати дезінфекційні заходи поверхонь, інструментів та обладнання з використанням дозволених дезінфекційних засобів. Операції висівання, пересіву та підготовки біологічних зразків мають виконуватися з мінімальною аерозолізацією матеріалу, щоб уникнути розповсюдження мікроорганізмів у повітрі.

Під час виконання робіт забороняється використовувати скляний посуд із дефектами, пошкоджені реакційні пробірки та лабораторний інструмент із порушеною герметичністю. Весь посуд, що контактує з культурами мікроорганізмів, після завершення досліджень підлягає стерилізації в автоклаві або хімічній дезактивації. Забір зразків ґрунту, соломи та композицій із біопрепаратами проводиться із застосуванням стерильних контейнерів та інструментів, щоб уникнути потрапляння сторонньої мікрофлори [59].

Підвищену увагу приділяють застосуванню засобів індивідуального захисту. Працівники повинні бути забезпечені халатами, лабораторними

рукавичками, захисними окулярами та, за потреби, респіраторними масками. Виконання робіт без засобів захисту або у пошкоджених засобах категорично забороняється. Після завершення роботи робоче місце має бути очищене, а використані рукавички, серветки та інші матеріали утилізовані як біологічні відходи.

Забороняється вживати їжу, напої, зберігати особисті речі або працювати з відкритими ділянками шкіри. У разі потрапляння реагентів, культур або ґрунтової суспензії на шкіру чи слизові оболонки необхідно невідкладно промити відповідну ділянку проточною водою та повідомити відповідальну особу [60].

Під час виконання процедур, пов'язаних із нагріванням, стерилізацією або роботою з автоклавом, працівник має дотримуватися інструкцій щодо запобігання опікам і вибухам посуду. Автоклавування допускається лише після перевірки правильності закладання матеріалу та герметичності апарата.

Організація безпечної роботи у лабораторії гарантує достовірність результатів експерименту, запобігає виробничим ризикам та забезпечує належний санітарно-гігієнічний стан приміщення. Дотримання цих правил є обов'язковою умовою виконання досліджень, що передбачають взаємодію з біологічними та хімічними об'єктами [61].

ВИСНОВКИ

Виявлено, що в агроценозах степової зони відбувається активний процес розкладання соломи целюлозоруйнівними мікроорганізмами, однак інтенсивність цього процесу істотно залежить від виду соломи та кліматичних умов регіону. Доведено, що солома озимої пшениці, завдяки нижчому вмісту лігніну та відносно збалансованому співвідношенню C:N, забезпечує значно вищі показники мікробіологічної активності, тоді як солома соняшнику характеризується уповільненими темпами розкладання через високу лігнінованість та наявність фенольних сполук. Високі показники чисельності целюлозоруйнівних мікроорганізмів при внесенні біодеструкторів свідчать про їхню здатність стимулювати природні процеси мінералізації та покращувати умови для розвитку мікробіоти ґрунту.

Присутність соломи в ґрунтовому середовищі сприяє збагаченню ґрунтів органічною речовиною, однак її розкладання значною мірою визначається температурним та вологісним режимами. Аналіз мікробних угруповань показав, що пік активності целюлолітичних мікроорганізмів припадає на ранньовесняний та осінній періоди, тоді як улітку, за умов високої температури та дефіциту вологи, активність мікробних популяцій суттєво знижується. Це свідчить про сезонну нерівномірність процесів деструкції соломи та залежність мікробіоценозів від кліматичних змін, характерних для Дніпропетровської області.

Порівняльний аналіз ефективності біодеструкторів «Біонорма» та «Целюлад» вказує на суттєві відмінності в їх дії залежно від типу рослинних решток. Встановлено, що «Біонорма» ефективно діє на солону озимої пшениці, забезпечуючи підвищення чисельності мікроорганізмів, що розкладають легкодоступні компоненти целюлози. Натомість «Целюлад» продемонстрував

високий рівень розкладання грубоволокнистої соломи соняшнику, що свідчить про здатність препарату активізувати процеси руйнування лігнінових структур. Різниця у структурі соломи та ступені її доступності для мікробної ферментації підтверджує значний вплив хімічного складу рослинних решток на формування мікробних угруповань і загальну швидкість біодеструкції.

Суттєве збіднення видового складу целюлозоруйнівних мікроорганізмів, виявлене у ґрунтах із тривалим дефіцитом свіжої органічної речовини, вказує на несприятливі умови для розвитку мікробоценозів та зниження їх стійкості до зовнішніх стресових факторів. Натомість ділянки, де солома регулярно надходить у ґрунт і де застосовуються біодеструктори, демонструють високу біологічну активність і більшу стійкість мікробних спільнот. Це підкреслює важливість підтримання стабільного рівня органічного живлення в ґрунті як ключового чинника забезпечення довготривалої екологічної рівноваги агроєкосистем.

Установлено, що фізико-хімічні параметри ґрунту – зокрема вологість, температура, наявність доступних форм азоту – мають прямий вплив на швидкість деструкції соломи та чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів. Результати дослідження свідчать, що застосування азотних добрив разом із біодеструкторами створює оптимальні умови для активної мінералізації соломи і сприяє збільшенню гумусоутворення. Таким чином, структура та функціонування мікробних спільнот у ґрунтах залежать як від особливостей самої соломи, так і від умов її розкладання.

Отримані дані підтверджують перспективність впровадження технологій керованої біодеструкції соломи в аграрних умовах Дніпропетровської області. Такі технології здатні забезпечити підвищення біологічної активності ґрунту, збереження різноманіття ґрунтової мікрофлори та формування стійких агроєкосистем, що є важливим у контексті сучасних кліматичних змін та необхідності збереження родючості ґрунтів. Загалом проведені дослідження вказують на значний екологічний та господарський потенціал системи оптимізованої деструкції соломи.

На основі проведених досліджень рекомендовано враховувати ключову роль целюлозоруйнівних мікроорганізмів у процесах розкладання соломи та оптимізації органічної речовини ґрунту. Доцільним є впровадження технологій, що забезпечують стабільне надходження соломи до ґрунту та створюють сприятливі умови для розвитку цієї групи мікроорганізмів. Особливу увагу слід приділяти вибору біодеструктора з урахуванням хімічної природи рослинних решток: для соломи соняшнику рекомендується застосування препарату «Целюлад», тоді як для соломи озимої пшениці достатньо ефективною є дія «Біонорми».

Рекомендується також застосовувати азотні добрива у поєднанні з біодеструкторами, оскільки вони забезпечують мікроорганізми необхідним поживним середовищем під час активної іммобілізації азоту в процесі розкладання соломи. Це сприятиме покращенню якісних показників ґрунтового мікробіому, підвищенню біологічної активності та загальній стійкості агроєкосистем. Для оптимізації управління ґрунтом важливим є забезпечення умов, що сприяють рівномірності надходження органічної речовини та збереженню вологи, оскільки саме вологість виступає ключовим лімітуючим фактором у деструкційних процесах.

У цілому впровадження екологічно орієнтованих технологій деструкції соломи може сприяти підтриманню родючості ґрунтів, підвищенню їх стійкості до кліматичних стресів та формуванню стабільних агроєкосистем. Розроблені рекомендації можуть бути застосовані для вдосконалення систем землеробства, орієнтованих на підвищення ефективності використання рослинних решток та збереження біологічного потенціалу ґрунтів Дніпропетровської області.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сергійчук М. Г. Мікробіологія : Підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М. Г. Сергійчук, В. К. Позур, А. І. Вінніков, Т. М. Фурзікова, Н. М. Жданова.– К.: Нац. ун-т ім. Т. Шевченка, 2005. – 375 с. – Бібліогр.: с. 374-375.
2. Нілова Н. Біодеструктор стерні – ефективний засіб регулювання розкладанням поживних решток / Нілова Н., Новохацький М., Болоховська В., Ростоцький О. // № 11 (86) листопад 2016 р. наукововиробничий журнал «Техніка і технології АПК»
3. Мазур В.А., Гончарук І. В., Дідур І. М., Панцирева Г. В. Інноваційні аспекти технологій вирощування, зберігання і переробки зернобобових культур. Монографія. ВНАУ. Вінниця: Твори, 2021. 180 с.
4. Невмержицька О.М. Пошук мікроорганізмів для біодеградації целюлозовмісної сировини з вторинних ресурсів і відходів сільського господарства / О.М. Невмержицька, Н.О. Васільєва, А.К. Нурмухаммедов // Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків, випуск 19, 2013. – с. 90 – 92.
5. Mashchenko Yu.V., Sokolovska I.M. Yield, productivity, and economic efficiency of winter wheat cultivation depend on crop rotation link and fertilizer systems. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Випуск 3 (40). 2023 Сільськогосподарські науки. 2023. 21-27. Борзова Н. В. Целюлозодеградуючі системи мікроорганізмів: біосинтез, властивості та структурно-функціональні особливості / Н. В. Борзова, Л. Д. Варбанець // Biotechnology. - 2009. - Vol. 2, № 2. - С. 23-41.
6. Кузьменко О. (2018). Вплив біодеструкторів на родючість ґрунтів. Агроекологія, 12(3). С. 45-50.
7. Ястремська Л. С. Целюлолітичні мікроорганізми доменів Bacteria и Archaea

- / Л. С. Ястремська. – [Електронний ресурс]. – //Проблеми екологічної біотехнології. – 2015. – №2. – Режим доступу до статті: <http://ecobio.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/9620>. – Problems of Environmental Biotechnology
8. Квасніцька Л. С. & Войтова Г. П. (2023). Водоспоживання соняшнику в ланках різноротаційних сівозмін Правобережного Лісостепу. Передгірне та гірське землеробство і тваринництво. Вип. 74 (1). С. 63-74. DOI: 10.32636/01308521.2023-(74)-1-5
 9. Домарацький Є. О. Застосування біодеструкторів целюлози – елемент біологізації технології вирощування соняшнику/ Є. О. Домарацький, О. О. Домарацький, О.П. Козлова// Матеріали VI Міжнародної науковопрактичної інтернет-конференції «Сучасне матеріалознавство та товарознавство: теорія, практика, освіта» 14-15 березня 2019 р. Полтава, 2019. – С. 247-255.
 10. Центилю Л. В. (2019). Вплив систем удобрення та обробітку ґрунту на гумусний стан і біологічні процеси чорнозему типового. Таврійський науковий вісник № 107. С.171-177. DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.107.23>
 11. Гамаюнова В. В., Корхова М. М., Панфілова А. В. та ін. Пшениця озима: ресурсний потенціал та технологія вирощування. Монографія. Миколаїв. МНАУ. 2021. 300 с.
 12. Khan R. & Ahmed S. (2020). Role of Organic Nitrogen in Enhancing Crop Productivity. International Journal of Agronomy, 15(4). P. 98–112.
 13. Патица В. П., Копилов Є. П., Скуловато О. В. Целюлозолітична активність ґрунтового гриба *Chaetomium globusum* // Вісник 108 Уманського національного університету садівництва. —Мікробіологія. — 2016. — № 1. — С. 27- 30.
 14. Smith J., Brown P. & Wang T. (2018). Effect of Hydrolyzed Nitrogen on Sunflower Growth. Agricultural Research Journal, 12(3). P. 245–258.
 15. Дем'янюк О.С. Екологічні основи функціонування мікробіоценозів ґрунту

- агроекосистем в умовах змін клімату [Текст] : автореф. дис. д-ра с.-г. наук : 03.00.16 / Дем'янюк Олена Сергіївна ; Нац. акад. аграр. наук України, Ін-т агроекології і природокористування. - Київ, 2017. - 44 с.
16. Ivanova L. & Petrova P. (2019). The Influence of Hydrolyzed Fertilizers on Sunflower Yield. *Soil and Plant Science*, 22(1), P. 67–78.
17. Домарацький Є.О. Агроекологічне обґрунтування системного застосування багатофункціональних рістрегулюючих препаратів при вирощуванні польових культур в Південному Степу [Текст] : автореф. дис. д-ра с.-г. наук : 06.01.09 / Домарацький Євгеній Олександрович ; Держ. ВНЗ "Херсон. держ. аграр. ун-т". - Херсон, 2019. - 44 с.
18. Міщенко Ю. Г., Литвиненко А. В. Перспективи уникнення деградації ґрунту. Гончарівські читання : матеріали Міжнар. Наук.-практ. Конф., 25 травня 2023 р. Суми, 2023. С. 147–150.
19. Lakhundi S. Cellulose degradation: a therapeutic strategy in the improved treatment of Acanthamoeba infections / S. Lakhundi, R. Siddiqui, N.A. Khan // *Parasites Vectors*. - № 8 (23). –2015. <https://doi.org/10.1186/s13071-015-0642-7>.
20. Debaeke P., Casadebaig P., Langlade N. B. New challenges for sunflower ideotyping in changing environments and more ecological cropping systems. *OCL*. 2021. Vol. 28. P. 29. DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2021016/>.
21. Сидякіна О. В., Гамаюнова В. В. Сучасний стан та перспективи виробництва насіння соняшнику. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 131. С. 196–204. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.131.25>
22. Preston C.M., *Humus Chemistry, Genesis, Composition and Reactions*. *Soil Science*. 1995. 159 (5). 356. <https://doi.org/10.1097/00010694-199505000-00012>
23. Dijkstra F., Cheng W., Johnson D. Plant biomass influences rhizosphere 194 ФІТОСАНІТАРНА БЕЗПЕКА priming effects on soil organic matter decomposition in two differently managed soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2006. 38(9). 2519-2526. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.02.020>
24. Rustam A., Nasimbek M. A New Method Of Soil Compaction by the method of

- soil loosening wave. The American journal of Engineering and Techonology. 2021. 03(02). 6-16. <https://doi.org/10.37547/tajet/volume03issue02-02>
25. Булигін С.Ю., Тонха О.Л., Вітвіцький С.В., Кучер Л.І., Буланий О.В. Оцінка і управління якістю ґрунтів. Навчальний посібник. Київ. 2020. 489 с
26. Рижук С.М. Технологія відтворення родючості ґрунтів у сучасних умовах. Київ - Харків: Друкарня № 13, 2003. 204 с
27. Шичула М.К. та ін. Відтворення родючості ґрунтів у ґрунтозахисному землеробстві. Київ: Оранта, 1998. 679 с.
28. Mallarino A.P., Pecinovsky K.T. Long-term Phosphorus and Potassium Fertilization Strategies for Corn-Soybean Rotations. Iowa State University, Digital Repository. 2004. <https://doi.org/10.31274/farmprogressreports-180814-563>
29. Berg B., McClaugherty C. Does Humus Accumulate and Where? What Factors May Influence? Plant Litter. 2013. 215-234. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38821-7_11
30. Панфілова А., Гамаюнова В. Вплив біодеструктора стерні на поживний режим ґрунту. Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія «Агрономія». 2019. № 23. С. 229–233.
31. Мікробіологічна активність ґрунту після ячменю ярого при використанні біодеструктора стерні / В.В. Гамаюнова, О.А. Коваленко, А.В. Панфілова, В.В. Болоховський. Наукові праці Чорноморського державного університету ім. Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Серія «Екологія». 2011. Т. 150. Вип. 138. С. 61–63.
32. Кушнар'ов А., Кравчук В., Бобровний Е. Вплив ступеня подрібнення й глибини закладення соломи в ґрунт на інтенсивність її розкладання з використанням біодеструктора «Стернифаг». Техніка і технології АПК. 2012. № 12. С. 24–27
33. Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., Olson, C., Sztein, A.E., Sparks, D.L., 2015. Soil and human security in the 21st century. Science 348, 1261071. <https://doi.org/10.1126/science.1261071>

34. Bedoya, K., Hoyos, O., Zurek, E., Cabarcas, F., Alzate, J.F., 2020. Annual microbial community dynamics in a full-scale anaerobic sludge digester from a wastewater treatment plant in Colombia. *Sci. Total Environ.* 726, 138479. [https://doi.org/ 10.1016/j.scitotenv.2020.138479](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138479).
35. Bossuyt, H., Deneff, K., Six, J., Frey, S.D., Merckx, R., Paustian, K., 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Appl. Soil Ecol.* 16, 195–208. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00116-5](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00116-5)
36. Luo, G.W., Li, L., Friman, V.P., Guo, J.J., Guo, S.W., Shen, Q.R., Ling, N., 2018. Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: a meta-analysis. *Soil Biol. Biochem.* 124, 105–115. [https://doi.org/ 10.1016/j.soilbio.2018.0](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.0)
37. Turmel, M.-S., Speratti, A., Baudron, F., Verhulst, N., Govaerts, B., 2015. Crop residue management and soil health: a systems analysis. *Agric. Syst.* 134, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.009>
38. Zhang, M., Dang, P., Haegeman, B., Han, X., Wang, X., Pu, X., Qin, X., Siddique, K.H.M., 2024. The effects of straw return on soil bacterial diversity and functional profiles: a meta-analysis. *Soil Biol. Biochem.* 195, 109484. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109484>
39. Ткаліч Ю. І., Ніценко М. П. Засухостійкість і водоспоживання різних за скоростиглістю гібридів соняшнику залежно від біологічних препаратів. *Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області.* 2014. Вип. 16. С. 239–246.
40. Танчик С. П., Пінковський Г. В. Продуктивність та водоспоживання середньоранніх гібридів соняшнику залежно від строків сівби та густоти стояння рослин у Правобережному Степу України. *Зрошуване землеробство.* 2019. Вип. 72. С. 47–52.
41. Інститут зернових культур НААН України. (2020). *Агроекологічні основи вирощування зернових культур у Степовій зоні України.* Дніпро: ІЗК НААН. 256 с.
42. Національна академія аграрних наук України. (2022). *Сучасні технології оптимізації екологічного стану ґрунтів: методичні рекомендації.* Київ:

НААН. 118 с.

43. Гуцуляк В. Д., Кірієнко О. П. (2021). Біологічні особливості утворення біомаси соняшнику та її вплив на родючість ґрунту в умовах Степу України. Агроекологічний журнал, 3, 28–36.
44. Скороход Л. І., Бойко Ю. П. (2023). Активація целюлозолітичної мікрофлори ґрунту біодеструкторами при розкладанні соломи зернових культур. Мікробіологічний вісник, 15(1), 55–63.
45. Коваленко Л. П., Кузьмич С. В. (2021). Ґрунтові умови Дніпропетровської області та їх вплив на формування продуктивності сільськогосподарських культур. Вісник аграрної науки Придніпров'я, 4, 17–26.
46. Палій І. В., Черненко Т. О. (2019). Деструкція рослинних решток у різних ґрунтово-кліматичних умовах та можливості її регулювання біопрепаратами. Мікробіологія і біотехнологія, 2(46), 33–41.
47. Семенова А. Ю., Корнієнко В. О. (2022). Кліматичні тренди Дніпропетровської області та їх вплив на водний режим ґрунтів у степовій зоні України. Агрометеорологічний журнал, 1(15), 58–67.
48. Семенюк С. Ю., Гнатенко Н. І. (2020). Вплив мікробіологічних препаратів на розкладання соломи зернових та технічних культур. Біологія ґрунту та агроєкосистеми, 12(2), 21–30.
49. Тоцький В. М. Водоспоживання та урожайність гібридів соняшнику. Бюлетень Інституту сільського господарства степової зони НААН України. 2012. № 2. 145–147.
50. Центи́ло Л.В. Вплив систем удобрення та обробітку ґрунту на гумусний стан і біологічні процеси чорнозему типового. Таврійський науковий вісник № 107. 2019. С.171–177. URL: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.107.23>
51. ДСТУ 7538:2014. Ґрунти. Методи визначання кількості мікроорганізмів. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. – 22 с.
52. ДСТУ 4732:2007. Ґрунти. Визначення целюлолітичної активності. – Київ: Держспоживстандарт України, 2007. – 18 с.

53. ДСТУ ISO 23753-2:2015. Якість ґрунту. Визначання активності ферментів. Частина 2. Активність каталази. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. – 28 с.
54. Ковальчук О. М., Бондаренко Л. П. Організація безпечних умов праці під час польових агроекологічних досліджень // Журнал охорони праці та безпеки довкілля. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 45–52.
55. Гордієнко С. В. Санітарно-гігієнічні вимоги до роботи в умовах відкритих територій: аналіз чинних нормативів України // Праці Українського науково-дослідного інституту промислової медицини. – 2021. – № 2 (28). – С. 67–74.
56. Семенюк Т. І., Марченко Ю. О. Управління ризиками травматизму під час польових експедиційних робіт у сільському господарстві // Аграрна безпека і виробнича санітарія. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 15–23.
57. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. – 28 с.
58. ДСТУ 3135.0-95. Засоби захисту рослин. Загальні вимоги до транспортування, зберігання та застосування. – Київ: Держстандарт України, 1996. – 24 с.
59. Черненко Л. М., Риженко П. В. (2021). Профілактика лабораторних ризиків: досвід аграрних і біологічних досліджень. Журнал біологічної безпеки та гігієни праці, 3(4), 15–24.
60. Гнатенко Н. І., Палій В. О. (2020). Методи стерилізації та дезінфекції у лабораторних дослідженнях мікроорганізмів. Біотехнологія та лабораторна безпека, 6(1), 28–36.
61. Бондаренко О. М., Кузьменко Л. П. (2018). Організація безпечних умов роботи в мікробіологічних лабораторіях. Мікробіологія і біотехнологія, 21(3), 34–42.