

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

УДК 633.445.4:633.34

«ПОГОДЖЕНО»

Декан агробіологічного факульте-

ту

_____ В.П. Коваленко

« » _____ 2025 р.

«ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

грунтознавства

_____ Р.П. Богданович

« » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«Біологічна активність чорнозему південного за мілітарного
впливу»**

Спеціальність 201 «Агрономія»

Освітня програма «Агрономія»

Магістерська програма Агрохімія і ґрунтознавство

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

д. с.-г. наук, професор

_____ В.О. Забалуєв

Керівник магістерської роботи

д. с.-г. наук, с. н. с.

_____ Т.М. Мельничук

Виконала

_____ Є.А. Савченко

КИЇВ – 2025

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

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ґрунтознавства
та охорони ґрунтів ім.проф.М.К.Шикули
к. с.-г. наук, доцент, _____ Р. П. Богданович
« » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ
РОБОТИ**

Савченко Єлизаветі Андріївні

Спеціальність 201 «Агрономія»

Освітня програма «Агрономія»

Магістерська програма Агрохімія і ґрунтознавство

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Біологічна активність чорнозему південного за мілітарного впливу»
затверджена наказом ректора НУБіП України від 18.09.2025р.
№ 1960 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 10.11.2025 р.

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

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- 1) визначити чисельність ґрунтових мікроорганізмів основних таксономічних і еколого-трофічних груп;
- 2) розрахувати коефіцієнти мінералізації-іммобілізації, педотрофності та індекси оліготрофності та олігонітрофільності;
- 3) провести оцінку токсичності ґрунту за допомогою азотобактера;
- 4) дослідити біомасу ґрунтових мікроорганізмів;

- 5) визначити швидкість базального дихання ґрунтових мікро-організмів;
- 6) дослідити потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту.

Дата видачі завдання 02.06. 2025 р.

Завдання прийняв до виконання _____ Є.А. Савченко

Керівник магістерської роботи

Д. с.-г. наук, с. н. с.

_____ Т.М. Мельничук

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Біологічна активність чорнозему південного за мілітарного впливу» містить 57 сторінок друкованого тексту, 10 таблиць, 3 рисунка, 63 джерела літератури.

Воєнні дії, що відбуваються на території України, спричинили масштабні зміни у стані природного середовища, зокрема у властивостях ґрунтового покриву. Потрапляння вибухових речовин, важких металів, нафтопродуктів і продуктів горіння в орний шар призвели до порушення мікробіологічної рівноваги, зниження активності ґрунтових мікроорганізмів і деградації гумусного стану. Так як мікробна біота є ключовим індикатором родючості та екологічної стабільності ґрунту, вивчення змін її активності під впливом мілітарних факторів має важливе наукове і практичне значення. Актуальність теми полягає також і в пошуку шляхів відновлення деградованих ґрунтів.

Метою роботи є оцінка впливу мілітарних чинників та відновлювального комплексу на стан ґрунтової мікробіоти.

Завдання магістерської роботи - визначити чисельність ґрунтових мікроорганізмів основних таксономічних, функціональних і еколого-трофічних груп; розрахувати коефіцієнти мінералізації-іммобілізації, педотрофності та індекси оліготрофності та олігонітрофільності; провести оцінку токсичності ґрунту за допомогою азотобактера; дослідити біомасу ґрунтових мікроорганізмів; визначити швидкість базального дихання ґрунтових мікроорганізмів; дослідити потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту.

Об'єктом дослідження є ґрунти селітебних територій та лісових угідь із різним мілітарним впливом.

Предметом дослідження є мікробна біомаса, біологічна активність та процеси трансформації в циклах Нітрогену та Карбону в цих ґрунтах.

Методи дослідження.

Дослідження показників біологічної активності ґрунту були проведені в умовах модельних дослідів. Визначення мікробної біомаси проводили за фумігаційно-екстракційним методом згідно з вимогами ДСТУ ISO 14240-2:2003, мікробне дихання - за ДСТУ ISO 16072:2005, а процеси мінералізації та нітрифікації - відповідно до ДСТУ ISO 14238:2003 і ДСТУ 4729:2007.

Отримані дані обробляли статистично з використанням кореляційного та дисперсійного аналізу. Мікробіологічні дослідження були проведені згідно загальноприйнятих у ґрунтовій мікробіології методик.

Наукова новизна.

Вперше проведені дослідження активності мікробіологічних процесів біотрансформації Карбону і в циклі Нітрогену чорнозему південного та слабогумусованих пісків під впливом мілітарних факторів в умовах Миколаївської області. Встановлено, що уражені вибухами та пожежами ґрунти характеризуються значним зниженням вмісту мікробного вуглецю, пригніченням процесів мікробного дихання та уповільненням мінералізації азоту. Виявлено тенденцію до поступового відновлення біологічної активності за умови впровадження органо-мінеральних добрив і мікробіологічних препаратів.

Практичне значення.

Результати дослідження можуть бути використані для оцінки екологічного стану ґрунтів у районах воєнних дій, при розробленні заходів рекультивациі, а також для удосконалення систем моніторингу біологічної активності орних ґрунтів. Отримані дані є науковим підґрунтям для впровадження біотехнологічних методів відновлення родючості деградованих земель.

Ключові слова:

ґрунт, мікробна біомаса, мілітарний вплив, дихання ґрунту, мінералізація, нітрифікація, деградація, відновлення.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
----------------------	----------

	7
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	12
1.1 Біологічна активність як показник стану ґрунту	12
1.2 Вплив антропогенних факторів на біологічну активність ґрунту ..	14
1.2.1 Вплив сільськогосподарської діяльності	15
1.2.2 Урбанізаційне та промислове навантаження	16
1.2.3 Комплексні наслідки антропогенного тиску	17
1.3 Вплив військових дій на ґрунти та їх мікробну біомасу	17
1.3.1 Фізичні руйнування та механічна деградація ґрунтів	18
1.3.2 Хімічне забруднення вибуховими речовинами та важкими металами	18
1.3.3 Пірогенні процеси та термічне ураження ґрунтового профілю	19
1.3.4 Біологічні наслідки військових дій	20
1.4 Шляхи відновлення ґрунтової мікробіоти після військових дій	20
1.4.1 Необхідність рекультивациі та біологічного відновлення ґрунтів ...	20
1.4.2 Фізико-хімічні методи очищення ґрунту	21
1.4.3 Біологічні методи відновлення мікробної біомаси	21
1.4.4 Фітомеліораційні заходи та природне відновлення.....	22
1.4.5 Моніторинг і оцінка ефективності відновлення	22
РОЗДІЛ 2. МІСЦЕ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	25
2.1 Місце відбору зразків	25
2.1.1 Галицинівський ліс.....	25
2.1.2 Снігурівська ОТГ	27
2.3 Методика досліджень	30
2.3.1 Визначення мікробної біомаси ґрунту	30
2.3.2 Визначення швидкості базального дихання ґрунтових мікроорганізмів.....	31
2.3.3 Визначення мінералізації азоту, нітрифікації та вмісту мінеральних форм азоту в ґрунті	33
2.3.4 Характеристика поживних середовищ та їх склад	34
2.3.5 Визначення біогенності, коефіцієнтів мінералізації–імобілізації, педотрофності та індексів оліготрофності й олігонітрофільності	36
2.3.6 Визначення токсичності ґрунту	38
2.4 Характеристика відновлювального комплексу	39
2.4.1 Органічне добриво «Паросток»	39
2.4.2 Біопрепарат «Ультрачист»	39
2.5 Статистична обробка результатів	40
Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	41
3.1 Застосування відновлювального комплексу і його вплив на мікробну біомасу	41

3.2 Чисельність мікроорганізмів основних еколого-трофічних груп у зразках ґрунту.....	44
3.3. Біогенність та спрямованість процесів у ґрунтах.....	47
3.3 Базальне дихання ґрунтових мікроорганізмів.....	50
3.4 Динаміка вмісту амонійного азоту у ґрунтах за різних варіантів дослідів.....	52
3.5 Динаміка вмісту нітратного азоту у ґрунтах за різних варіантів дослідів.....	53
3.6 Потенційна нітрифікаційна здатність ґрунту.....	55
3.7 Визначення токсичності ґрунту.....	57
<i>ОХОРОНА ПРАЦІ.....</i>	59
<i>ВИСНОВКИ.....</i>	63
<i>Список використаної літератури.....</i>	66

ВСТУП

Внаслідок повномасштабного вторгнення на територію України відбулась не лише гуманітарна катастрофа, а й масштабна екологічна, яку класифікують як «екоцид» [1]. Збитки, які завдала війна навколишньому середовищу сягають понад 56,4 мільярдів доларів [2]. Значні площі нашої країни зазнали пошкоджень та руйнувань. Було знищено 3 мільйони гектарів лісів та близько 139 тис. км² земель забруднені вибухонебезпечними предметами [3]. Дуже актуальними постають питання оцінки екологічних наслідків. Особливу увагу заслуговує стан ґрунтів, адже порівняно з іншими компонентами екосистеми, вони відновлюються повільно, а їх пошкодження мають довготривалий ефект. Ґрунти є основним компонентом наземних екосистем, що виконують як продуктивну, так і регуляторну функції. Їх ураження, внаслідок бойових дій, призводять до змін фізичної структури, накопичення токсичних речовин, ущільнення, порушення водного режиму та деградація ґрунтового мікробіому [4].

Ґрунтова мікробна біота - це один з найбільш чутливих індикаторів ґрунтової родючості та біологічної активності. Мікробіота швидко реагує на зміну зовнішніх умов і відображає поточний стан екосистемних процесів, таких як мінералізація, фіксація азоту, поглинання токсичних речовин. Вона також відіграє критичну роль у розкладанні органічних речовин, кругообігу елементів живлення та формуванні агрегатної структури [5]. Під впливом бойових дій відбувається пригнічення активності мікроорганізмів та значне їх зменшення через підвищення температури ґрунту під час вибухів, токсичність залишків снарядів і ракет, руйнування мікро- і макропористої структури, а також зниження вмісту органічного вуглецю, що є основним джерелом енергії для мікроорганізмів. Разом з тим, мікроорганізми мають певний потенціал до адаптації й відновлення, особливо при сприятливих кліматичних умовах і за наявності біоремедіаційних заходів [6].

Незважаючи на наявність окремих досліджень, присвячених впливу воєнних дій на ґрунтове середовище, в Україні досі бракує систематичних да-

них про зміни мікробної біомаси. Особливої уваги потребує порівняння різних типів уражених ділянок, визначення ступеня деградації ґрунтової мікробіоти, а також оцінка потенціалу природного або штучного відновлення ґрунтів [7].

Відсутність системних досліджень з вивчення мікробної біомаси в уражених мілітарним навантаженням ґрунтах південного регіону України, зокрема Миколаївщини, обумовлює актуальність даного дослідження. Проведення комплексної оцінки активності мікроорганізмів на різних типах ґрунтів, у зонах з різним ступенем воєнного впливу дозволяє краще зрозуміти масштаби біологічної деградації ґрунтів, а також розробити рекомендації щодо їхньої реабілітації.

Головною метою є дослідження впливу мілітарних чинників та відновлювального комплексу на стан ґрунтової мікробіоти.

Завдання магістерської роботи:

- визначити чисельність ґрунтових мікроорганізмів основних таксономічних і еколого-трофічних груп;
- розрахувати коефіцієнти мінералізації-іммобілізації, педотрофності та індекси оліготрофності та олігонітрофільності;
- провести оцінку токсичності ґрунту за допомогою азотобактера;
- дослідити біомасу ґрунтових мікроорганізмів;
- визначити швидкість базального дихання ґрунтових мікроорганізмів;
- дослідити потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту.

Предметом дослідження є ґрунтовий покрив Галицинівського лісу Миколаївської області та ґрунти селітебної території Снігурівської ОТГ. Відбір зразків та дослідження ґрунту з локацій, які репрезентують різні типи екологічних порушень, а саме :

- 1) селітебні землі біля зони впливу ракетного влучання;
- 2) забруднена пестицидами територія внаслідок влучання ракети у склад з отрутохімікатами в селітебній зоні;
- 3) лісові угіддя які не зазнали пірогенного впливу;

4) лісові угіддя після пожежі внаслідок збройного впливу.

Дослідження показників біологічної активності ґрунту проведені в умовах модельних дослідів в Українській лабораторії якості та безпеки продукції агропромислового комплексу , а мікробіологічні дослідження згідно загальноприйнятих у ґрунтовій мікробіології методик.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Внаслідок воєнних дій на території України відбуваються масштабні зміни у структурі ґрунтового покриву, біогеохімічних циклах і мікробіологічних процесах. Ґрунт, як складна відкрита система, є не лише основою для вирощування сільськогосподарських культур, а й потужним біогеохімічним резервуаром, який забезпечує стале функціонування екосистем. Його стан визначається активністю мікроорганізмів - невидимих, але важливих регуляторів ґрунтового життя.

Мікробна біомаса є ключовим інтегральним показником стану ґрунту, що відображає рівень його біологічної активності, ступінь родючості та здатність до самовідновлення [8]. Саме мікроорганізми першими реагують на будь-які зміни у середовищі - як природного, так і антропогенного характеру. Їх чисельність і активність швидко знижуються під дією забруднення, ущільнення, а особливо, під впливом військових факторів, які поєднують у собі механічні пошкодження, хімічні забруднення та термічні впливи.

Дослідження мікробної біомаси у зонах бойових дій є надзвичайно актуальним, адже воно дозволяє оцінити рівень деградації ґрунтів та виявити шляхи їх екологічної реабілітації. Особливої уваги заслуговує територія Миколаївської області, де поєднуються агроландшафти, що зазнали впливу війни, і природно-захисні екосистеми, які зберегли свій стан. Порівнювання даних з цих ділянок дає змогу з'ясувати масштаби впливу воєнних дій на мікробіологічні процеси у ґрунтах різного типу [7].

Метою огляду літератури є систематизація наукових даних про природу мікробної біомаси ґрунту, чинники, що впливають на її динаміку, та аналіз сучасних досліджень щодо змін мікробного комплексу під впливом військових факторів [3].

1.1 Біологічна активність як показник стану ґрунту

Мікробна біомаса - це сукупна маса живої мікробної речовини, що знаходиться в ґрунті, включаючи бактерії, актиноміцети, гриби та водорості.

Вона становить лише незначну частину загальної маси органічної речовини ґрунту (0,5–5%), проте виконує головну роль у регуляції кругообігу вуглецю, азоту, фосфору та інших біогенних елементів. Саме мікроорганізми забезпечують мінералізацію органічних решток, синтез гумусових речовин, утворення структури ґрунту й підтримання його родючості [9].

Мікробна біомаса є динамічним показником, який швидко реагує на зміни у навколишньому середовищі. На відміну від загального вмісту гумусу, який змінюється повільно, мікробна біомаса здатна варіювати протягом днів або навіть годин в залежності від вологості, температури, надходження органічних речовин чи впливу токсичних сполук [10].

Основними компонентами мікробної біомаси є гетеротрофні бактерії, що здійснюють розклад органічної речовини, а також актиноміцети й гриби, які беруть участь у деструкції більш складних полімерних сполук - целюлози, лігніну, восків тощо. Мікробіота формує специфічні біоплівки, що сприяють стабілізації ґрунтової структури та регулюють водно-повітряний режим. Мікробна біомаса також відіграє індикаторну роль у моніторингу стану ґрунтової родючості, оскільки вона першою реагує на антропогенний тиск, зміну вологості або агротехнічні прийоми. Зменшення її кількості є ранньою ознакою дегуміфікації та біологічного виснаження орного шару [11]

Для оцінки мікробіологічної активності ґрунту використовуються різні методи. Найбільш поширеним є фумігаційно-екстракційний метод, який базується на визначенні кількості Карбону чи Нітрогену, що вивільняються після обробки зразків хлороформом. Також застосовують субстратно-індуковану респірацію, яка відображає інтенсивність споживання глюкози мікроорганізмами, та метод фосфоліпідних жирних кислот (PLFA), що дає змогу оцінити структуру мікробного співтовариства [42; 43; 46].

Біологічна активність ґрунту залежить від численних екологічних чинників. Найважливішими серед них є:

- вологість - визначає доступність субстрату для мікроорганізмів;

- температура - впливає на швидкість метаболізму;
- вміст гумусу та органічних решток - забезпечує живлення мікробіоти;
- реакція середовища (рН) - регулює домінування окремих груп мікроорганізмів;
- агрофізичні властивості ґрунту - структура, щільність, аерація.

У природних умовах найбільший рівень мікробної біомаси характерний для чорноземів і лучних ґрунтів. Там поєднуються оптимальні умови зволоження, забезпеченість органічною речовиною та сприятливе співвідношення аеробних і анаеробних зон. У той час як у піщаних і деградованих ґрунтах біомаса різко знижується через нестачу органіки й вологи.

Ґрунтова мікробіота виконує роль буфера, який пом'якшує вплив зовнішніх стресових факторів на екосистему. При потраплянні забруднюючих речовин або механічному руйнуванні ґрунту саме мікроорганізми першими зазнають змін, тому динаміка показників мікробної біомаси і мікробного дихання розглядається як чутливий індикатор екологічного стану ґрунтів. Відновлення біологічної активності ґрунту свідчить про поступове повернення екосистеми до рівноваги після порушення [6; 12].

1.2 Вплив антропогенних факторів на біологічну активність ґрунту

Ґрунт є складною живою системою, чутливою до будь-яких форм антропогенного навантаження. Інтенсивна господарська діяльність людини, урбанізація, промислове забруднення та нераціональне використання земельних ресурсів призводять до деградації ґрунтового покриву та зниження активності його мікробіоти. Мікробіота, як найрухоміша складова органічної речовини, першою реагує на зовнішні зміни, що робить її інформативним індикатором рівня антропогенного впливу [13;14].

1.2.1 Вплив сільськогосподарської діяльності

Одним із найпоширеніших антропогенних чинників є інтенсивне землеробство, яке передбачає активний механічний обробіток ґрунту, застосування мінеральних добрив, пестицидів і монокультурне вирощування рослин. Часті оранки руйнують агрегатну структуру, посилюють мінералізацію гумусу та знижують кількість доступної органіки, що є основним джерелом живлення для мікроорганізмів. Внаслідок цього зменшується чисельність бактерій-деструкторів, актиноміцетів і грибів, знижується мікробна біомаса та активність ферментів [15].

Дослідження показують, що чорноземи, які використовуються під ріллям понад 30–40 років, мають на 25–40% нижчий рівень мікробної біомаси, ніж цілині ділянки або ґрунти під природною рослинністю. Постійна зміна режиму зволоження, ущільнення верхнього шару ґрунту технікою та нестача свіжої органічної речовини призводять до пригнічення біологічної активності. Особливо негативно впливають інтенсивні системи удобрення з переважанням азотних добрив - вони порушують співвідношення вуглецю до азоту (C:N), що зумовлює мінералізацію гумусу та зменшення кількості гетеротрофних мікроорганізмів. Застосування органічних добрив (гною, сидератів, компостів) істотно підвищує мікробну біомасу, оскільки покращує структуру та вологоємність ґрунту, забезпечує живлення для сапротрофної мікрофлори. У наукових роботах підкреслюється, що внесення 30–40 т/га гною може підвищити показник мікробної біомаси вдвічі вже протягом першого року після застосування [18; 19].

Окрім добрив, значний вплив мають засоби захисту рослин. Частина гербіцидів і фунгіцидів має токсичну дію на мікроорганізми, особливо у разі надмірного або тривалого використання. Системні препарати на основі гліфосату пригнічують розвиток азотфіксуючих бактерій та мікоризних грибів, що веде до зменшення біологічної доступності поживних елементів для рослин [41].

Таким чином, у сільськогосподарських ландшафтах мікробні угруповання формуються під впливом багатьох факторів: структури сівозміни, тип обробітку ґрунту, удобрення та застосування пестицидів. Оптимізація цих факторів є ключовим етапом для підтримання екологічно сталого функціонування агроєкосистем [20].

1.2.2 Урбанізаційне та промислове навантаження

Іншим типом антропогенного впливу є урбанізація та пов'язане з нею промислове забруднення. Території поблизу міст і промислових підприємств характеризуються підвищеним рівнем викидів важких металів, нафтопродуктів, поліароматичних вуглеводнів та інших токсикантів. Ці речовини накопичуються у верхньому шарі ґрунту, змінюють його хімічний склад і безпосередньо впливають на мікробні угруповання [21].

Надмірне надходження важких металів (Cu, Pb, Zn, Cd, Ni) призводить до інгібування ферментативної активності мікроорганізмів. Метали взаємодіють із білками клітинних мембран, порушуючи їхню проникність і дихальні процеси. При концентраціях, що перевищують гранично допустимі, спостерігається загибель чутливих до токсикантів видів і домінування більш стійких форм, часто патогенних або умовно-патогенних [22].

В умовах промислових зон, де забруднення комплексне, загальна мікробна біомаса зменшується у 2–5 разів порівняно з контрольними ділянками. Зменшується також співвідношення бактерій до грибів, що свідчить про порушення рівноваги в ґрунтовому мікробному співтоваристві. У таких умовах переважають грибні форми, здатні до розвитку у стресових ситуаціях, тоді як кількість бактерій і актиноміцетів різко падає [21].

Крім хімічного забруднення, урбанізація супроводжується механічним ущільненням і зменшенням вмісту органічної речовини у ґрунті. Висока щільність забудови, порушення дренажу, відсутність рослинного покриву знижують аерацію та зволоження, створюючи несприятливі умови для розви-

тку мікрофлори. Як наслідок, ґрунт поступово втрачає біологічну активність і здатність до самоочищення [12].

1.2.3 Комплексні наслідки антропогенного тиску

У реальних екосистемах різні антропогенні фактори діють одночасно, створюючи кумулятивний ефект. Сільськогосподарське навантаження поєднується з атмосферним забрудненням, ерозійними процесами та кліматичними змінами. Це призводить до довготривалого зниження мікробної біомаси й порушення мікробної рівноваги [23;24].

Науковці відзначають, що при тривалому антропогенному тиску відбувається спрощення структури мікробного співтовариства: зменшується кількість видів, знижується різноманіття функціональних груп і погіршується здатність до відновлення після стресу. Це робить ґрунт більш вразливим до додаткових впливів, таких як: вибухи, пожежі чи забруднення військового характеру [25].

Таким чином, мікробна складова є не лише показником поточного стану ґрунту, а й своєрідною «пам'яттю екосистеми». Її рівень відображає історію використання території, інтенсивність господарського навантаження та стійкість до подальших руйнівних процесів. Саме тому оцінка мікробної біомаси набуває особливого значення в умовах сучасних воєнних дій, які є крайньою формою антропогенного впливу на довкілля.

1.3 Вплив військових дій на ґрунти та їх мікробну біомасу

Військові дії є одним із найагресивніших типів антропогенного навантаження на природне середовище. На відміну від традиційної господарської діяльності, вони поєднують у собі комплекс руйнівних факторів: механічних, хімічних, термічних і біологічних, які діють одночасно та мають кумулятивний ефект. Ґрунт у цьому контексті виступає не лише фізичним середовищем, що зазнає пошкоджень, але й біогеохімічною системою, у якій зміни відбуваються на рівні живої речовини - мікробної біомаси.

1.3.1 Фізичні руйнування та механічна деградація ґрунтів

Під час бойових дій ґрунтовий покрив зазнає потужних механічних руйнувань унаслідок вибухів, переміщення важкої військової техніки, будівництва укріплень, окопів і траншей. Вибухова хвиля, уламки снарядів та вібраційні коливання порушують природну структуру ґрунту, спричиняють ущільнення верхнього шару, зменшення пористості, а також зміну водноповітряного режиму [11; 13; 29].

Такі зміни різко знижують біологічну активність, адже мікроорганізми потребують стабільних умов вологості, аерації та температури. Руйнування структури призводить до зниження кількості аеробних бактерій, зокрема нітрифікуючих та целюлозоруйнівних форм, і водночас до переважання анаеробних мікроорганізмів, здатних виживати у безповітряному середовищі. Після тривалого механічного впливу спостерігається деградація гумусового горизонту, ерозія, оголення підґрунтя та порушення сукцесій рослинності, що, у свою чергу, зменшує надходження органічних решток до ґрунту [26; 27].

1.3.2 Хімічне забруднення вибуховими речовинами та важкими металами

Одним із найнебезпечніших наслідків війни є забруднення ґрунтів продуктами вибухів, паливно-мастильними матеріалами та металами. Вибухові речовини після детонації частково залишаються в ґрунті у вигляді токсичних залишків, що повільно розкладаються. Ці сполуки здатні інгібувати ферментні системи мікроорганізмів, знижуючи інтенсивність дихання та мінералізації органічних сполук [25].

Важкі метали (свинець, мідь, цинк, кадмій, нікель), що потрапляють у ґрунт із уламків боеприпасів та залишків палива, також створюють токсичне навантаження. Вони зв'язуються з колоїдами ґрунту, змінюють його кислотність, блокують активні центри ферментів і зменшують чисельність чутливих мікроорганізмів. Найбільш ураженими є нітрифікуючі та фосфатмобі-

лізуючі бактерії, а також мікоризні гриби, що забезпечують симбіоз із корневими системами рослин [27].

Тривале накопичення важких металів у ґрунті призводить до зміни видової структури мікробіоценозу: зростає частка толерантних і детоксикаційних форм (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Arthrobacter*), тоді як загальна мікробна біомаса зменшується у 2–5 разів. У зонах з інтенсивним обстрілом спостерігається практично повна стерилізація поверхневого шару, після чого процеси відновлення мікрофлори тривають десятиліттями [28].

1.3.3 Пірогенні процеси та термічне ураження ґрунтового профілю

Пожежі, які часто супроводжують бойові дії, спричиняють різке нагрівання верхніх шарів ґрунту до 300–600 °С. У результаті цього відбувається термічне руйнування органічної речовини, денатурація білкових структур мікроорганізмів і загибель більшої частини ґрунтової біоти. Високі температури призводять до згорання гумусових сполук, втрати легкодоступного азоту та сірки, утворення токсичних оксидів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів і фенольних сполук. У приповерхневих шарах (0–5 см) знижується чисельність бактерій та актиноміцетів у десятки разів, а грибна мікрофлора практично повністю зникає [16; 34].

Після охолодження ґрунту спостерігається різке зменшення ферментативної активності. Це свідчить про пригнічення мікробного метаболізму та порушення колообігу азоту й вуглецю. Відновлення біологічної активності можливе лише через кілька місяців або навіть років після припинення термічного впливу, залежно від інтенсивності пожежі та вмісту органічної речовини в ґрунті [16].

Після охолодження поверхневий шар часто вкривається щільною кіркою, що перешкоджає відновленню газообміну. У таких умовах відбувається перехід ґрунтової мікробіоти до анаеробного типу метаболізму, накопичення органічних кислот і токсичних проміжних продуктів. Це значно сповільнює процеси самоочищення та відновлення структури мікробної біомаси [34].

1.3.4 Біологічні наслідки військових дій

Під впливом комплексу зазначених факторів мікробна біомаса ґрунту зазнає різноспрямованих змін: скорочується загальна чисельність клітин, знижується видовий склад, відбувається втрата функціональної рівноваги між трофічними групами. Відзначається зменшення активності азотфіксуючих бактерій (*Azotobacter*, *Rhizobium*), деструкторів целюлози (*Cellulomonas*, *Bacillus subtilis*), а також фосфатмобілізуючих і сіркоокисних форм. Натомість тимчасово можуть активізуватися сапрофітні або толерантні види, здатні існувати у стресових умовах [30].

Різде зниження мікробної біомаси спричиняє уповільнення гумусоутворення, порушення колообігу елементів живлення, зниження родючості та біологічної активності ґрунту. У подальшому це впливає на структуру рослинних угруповань і здатність територій до природного відновлення. Особливо критичним є зниження коефіцієнта співвідношення C_{mic}/C_{org} (вуглець мікробної біомаси до загального органічного вуглецю), який є показником життєздатності екосистеми. У постраждалих від вибухів зонах цей коефіцієнт може знижуватися у 3–6 разів порівняно з контрольними ділянками [3].

1.4 Шляхи відновлення ґрунтової мікробіоти після військових дій

1.4.1 Необхідність рекультивації та біологічного відновлення ґрунтів

Відновлення ґрунтів після військових дій є ключовим завданням для збереження продовольчої безпеки, екологічної рівноваги та відновлення агроландшафтів. Внаслідок бойових дій ґрунт зазнає механічного, хімічного й біологічного виснаження, тому природне самоочищення відбувається дуже повільно. Іноді відновлення відбувається протягом десятиліть [11]. Основною метою рекультиваційних заходів є відновлення структури ґрунту, зниження токсичності, підвищення рівня гумусу та відновлення мікробної біомаси, яка визначає біологічну активність ґрунту.

Першочерговим етапом має бути екологічна оцінка рівня деградації, включно з аналізом вмісту важких металів, залишків вибухових речовин і

нафтопродуктів. Також важливо визначити ферментативну активність та кількість мікроорганізмів. Такі дані дозволяють обрати адекватну стратегію рекультивації - фізико-хімічну або біологічну.

На території Снігурівської громади, де спостерігалось інтенсивне забруднення вибуховими залишками, доцільно поєднувати агротехнічні методи (глибоке розпушення, фітомеліорацію) з біологічними засобами, що сприяють відновленню мікробіоти .

1.4.2 Фізико-хімічні методи очищення ґрунту

До фізико-хімічних способів належать механічне зняття сильно забрудненого шару, промивання та нейтралізація токсикантів, внесення сорбентів (цеоліти, бентоніти, активоване вугілля), вапнування кислих ґрунтів і застосування гіпсу на засоленних територіях [11].

У районах з високим рівнем важких металів ефективно працює внесення органічних матеріалів - компостів, сапропелю, біочарів (біовугілля). Вони зв'язують токсичні сполуки і створюють сприятливе середовище для мікробів. Біочар особливо корисний після пожеж, бо зменшує фітотоксичність і підвищує вологоємність ґрунту [16; 34]. Такі заходи допомагають створити умови для повторної колонізації ґрунту мікроорганізмами, покращують структуру та стимулюють ферментативну активність.

1.4.3 Біологічні методи відновлення мікробної біомаси

Біологічна рекультивація є основним напрямом відновлення після мілітарних впливів. Її сутність полягає у відновленні мікробного ценозу, гумусного стану і кругообігу поживних елементів [31].

Найефективнішими методами є:

- Інокуляція біопрепаратами, що містять азотфіксуючі, фосфатмобілізуючі та целюлозоруйнівні бактерії (*Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium*, *Trichoderma spp.*);

- Внесення органічних добрив (гній, компост, сидерати) - вони служать джерелом вуглецю для гетеротрофних мікроорганізмів;
- Фіторемедіація - висадження рослин, які абсорбують токсиканти та стимулюють мікробну активність у ризосфері (*Helianthus annuus*, *Brassica juncea*, *Medicago sativa*);
- Мікоризація - введення симбіотичних грибів (*Glomus*, *Rhizophagus*), що підвищують стійкість рослин до токсичних умов [14; 27].

У багатьох регіонах України успішно застосовують бактеріальні препарати на основі *Azospirillum* та *Pseudomonas*, які прискорюють мінералізацію органічних решток і сприяють відновленню структури мікробного угруповання після вибухового забруднення [32; 41].

Польові дослідження показують, що після внесення біопрепаратів кількість мікроорганізмів у ґрунті зростає в 1,5–3 рази, а ферментативна активність наближається до природного рівня вже через 2–3 роки [17].

1.4.4 Фітомеліораційні заходи та природне відновлення

Фітомеліорація є важливою частиною екологічної реабілітації ґрунтів після бойових дій. Посів багаторічних трав (еспарцет, люцерна, костриця лучна, житняк) сприяє стабілізації структури ґрунту, накопиченню органічної речовини й формуванню ризосферного мікробного комплексу [33].

Лісові екосистеми відновлюються повільніше, проте завдяки мікрокліматичній стабільності й тіньовому режиму мають більший потенціал збереження мікробного життя. Після зниження рівня токсикантів у ґрунті в межах 2–5 років відбувається поступове відновлення співвідношення між бактеріями й грибами та нормалізація ферментативної активності [16].

1.4.5 Моніторинг і оцінка ефективності відновлення

Для контролю відновлення мікробної біомаси необхідно проводити системний моніторинг основних показників:

- вмісту мікробного вуглецю (C_{mic});
- активності ферментів (дегідрогенази, фосфатази, уреази);
- співвідношення між бактеріями і грибами;
- концентрації токсикантів і показників гумусного стану [35].

Результати моніторингу дозволяють оцінити динаміку біологічного відновлення та коригувати заходи рекультивації. У практиці сучасного ґрунтознавства важливо поєднувати традиційні аналітичні методи з біоіндикаторними тестами (мікробне дихання, біоаккумуляція металів у рослинах), що підвищує точність оцінки стану ґрунту після мілітарного навантаження [42; 43; 44].

Таким чином, ефективне відновлення ґрунтів, деградованих унаслідок військових дій, можливе лише за умови поєднання фізико-хімічних, біологічних і фітомеліораційних підходів, спрямованих на відтворення мікробного життя. Особливу роль у цьому процесі відіграє ґрунтова мікробна біомаса, яка є найчутливішим показником екологічного стану та першим індикатором успішності рекультивації.

У перспективі комплексне поєднання агротехнічних, біологічних і фіторе mediaційних методів дозволить відновити ґрунтову мікробну біомасу та повернути родючість постраждалих земель до рівня довоєнного періоду.

Аналіз наукових джерел свідчить, що ґрунтова мікробна біомаса є одним із найчутливіших індикаторів екологічного стану ґрунтів, який безпосередньо реагує на антропогенне навантаження, зокрема військове. Мікроорганізми відіграють ключову роль у процесах трансформації органічної речовини, гумусоутворенні, колообігу азоту, фосфору та сірки. Зменшення їх чисельності або активності призводить до деградації ґрунтової родючості й погіршення екологічної рівноваги агроландшафтів.

Військові дії, що розгорнулися на території України з 2022 року, спричинили масштабне порушення ґрунтового покриву. Вибухи, пожежі, використання важкої техніки, забруднення металами та паливно-мастильними мате-

ріалами стали факторами, які деструктивно впливають на мікробоценози. Зафіксовано зниження вмісту мікробного вуглецю, активності дегідрогенази, каталази та уреаз, що свідчить про пригнічення життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів. Відновлення біологічної активності ґрунтів можливе лише за умови поєднання агротехнічних, біологічних та фіторемедіаційних заходів. Найефективнішими є внесення органічних добрив і біочару, використання мікробних препаратів, посів сидеральних культур та формування мікоризних асоціацій. Такі заходи сприяють стабілізації структури ґрунту, поліпшенню водного режиму, підвищенню вмісту органічної речовини й відновленню мікробного пулу.

Отже, деградація ґрунтової мікробної біомаси України. Проте системний підхід до біологічної рекультивації, що базується на відновленні природних процесів ґрунтоутворення, дає можливість поступово повернути родючість і біологічну рівновагу постраждалих екосистем [3].

РОЗДІЛ 2. МІСЦЕ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Місце відбору зразків

Місцем відбору зразків були ґрунтовий покрив Галицинівського лісу Миколаївської області та ґрунти селітебної території Снігурівської ОТГ (Рис. 2.1).



Рис. 2.1 Місце відбору зразків

2.1.1 Галицинівський ліс

Галицинівський ліс - це один із найбільших і найцінніших лісових масивів Миколаївської області. Розташований він поблизу села Галицинове у Вітовському районі, на правому березі Південного Бугу. Площа лісу приблизно 675 гектарів, що робить його важливим осередком біорізноманіття в умовах малолісного степового регіону.

Рослинний покрив Галицинівського лісу представлений як природними, так і штучно створеними насадженнями. Основу деревостану становлять дуб звичайний, ясен зелений, берест, клен татарський. Значну частину площі займають штучні посадки сосни кримської та акації білої, які були створені з метою закріплення піщаних ґрунтів і підвищення продуктивності лісових угідь. У підліску зустрічаються глід, шипшина, жостір та ліщина. Трав'яний покрив поєднує елементи степової й лісової флори - тут росте ковила, тонконог, конвалія, медунка, різні види фіалок [38].

Фауна Галицинівського лісу також дуже різноманітна. Серед ссавців поширені їжак європейський, лисиця, заєць-русак, косуля та інші види. З птахів зустрічаються сова вухата, дятел звичайний, соловей східний та синиця велика. Тут також мешкають рептилії, зокрема ящірка зелена та полоз жовточеревий. У лісі трапляються рідкісні види, що занесені до Червоної книги України, такі як орел-карлик, боривітер степовий та орлан-білохвіст [38].

Ґрунтовий покрив лісу представлений переважно чорноземами південними малогумусними та темно-каштановими ґрунтами. На окремих ділянках сформувалися дерново-слабопідзолисті та слабогумусовані піщані ґрунти, що й зумовило необхідність створення штучних лісових насаджень. У заплавних частинах річкової долини зустрічаються лучно-болотні ґрунти, які сприяють розвитку вологолюбної рослинності.

Галицинівський ліс має важливе природоохоронне та рекреаційне значення. Він виконує функції захисту ґрунтів від ерозії, регулює мікроклімат, служить бар'єром від суховіїв і пилових бурь у степовій зоні. Для жителів Миколаєва та прилеглих населених пунктів ліс є традиційним місцем відпочинку та оздоровлення. Його наукова цінність полягає у збереженні унікальних природних комплексів, що поєднують лісові й степові екосистеми.

На жаль, у 2022 році лісовий масив опинився на лінії бойових дій під час спроби захоплення Миколаєва. Постійні обстріли та запалювальні снаряди спричинили масштабні пожежі. Згоріло понад 160 гектарів лісу. Частина територій, близько 37 гектарів, залишається засміченою вибухонебезпечними предметами та потребує очищення [39]. Через вибухонебезпечні предмети, загрозу подальших обстрілів та пожеж, лісівники довгий час не можуть займатися санітарними рубками, відновленням насаджень, обліком та доглядом. Молоді культури, які були засаджені у 2019–2020 роках, залишилися без належного догляду. Наслідки для довкілля і екосистеми фатальні. Втрата зеленого покриву повпливала на зменшення біорізноманіття та порушення середовища життя тварин і рослин. Відбувається втрата функцій лісу як кліматичного регулятора, очищувача повітря та накопичувача вуглецю. Виника-

ють проблеми з ґрунтом, а саме: зниження плодородності через знищення органічного шару, пригнічення мікробної біомаси, перегрів або обпалення, забруднення вибухівкою та важкими металами [16].

2.1.2 Снігурівська ОТГ

Снігурівська об'єднана територіальна громада - це одна з найбільших громад у Миколаївській області, площа громади становить близько 1,7 тис. км². Адміністративним центром громади є місто Снігурівка, а до складу громади входить понад 30 населених пунктів. До початку повномасштабної війни чисельність населення громади становила приблизно 25–27 тисяч осіб [36].

Громада розташована у степовій зоні Причорноморської низовини, на території Баштанського району. Її природні умови визначаються рівнинним рельєфом із наявністю балок та ярів, а також річковими долинами. Найбільші водотоки - річки Інгулець та Висунь, у заплавах яких поширені лучні та лучно-болотні ґрунти. Основним типом ґрунтів на території громади є чорноземи звичайні та південні, що вирізняються високою родючістю. Це забезпечує сприятливі умови для розвитку сільського господарства.

Більша частина території громади зайнята сільськогосподарськими угіддями, які становлять понад 80 % площі. Тут активно вирощують зернові та олійні культури (пшеницю, ячмінь, кукурудзу, соняшник), а також баштанні культури, що традиційно є важливою складовою господарства регіону. Тваринництво представлене вирощуванням великої рогатої худоби, свинарством і птахівництвом. На території громади функціонують агрофірми, фермерські господарства, зерносховища та елеватори.

Снігурівська громада має також важливе транспортне значення. Через місто Снігурівку проходять залізничні та автомобільні шляхи, які з'єднують Миколаїв із Херсоном і Кривим Рогом. Це сприяє розвитку економіки, логістики та торгівлі [36].

Завдяки своїм природним ресурсам, вигідному географічному розташуванню та потужному аграрному потенціалу Снігурівська ОТГ відіграє значну роль у соціально-економічному розвитку Миколаївської області.

Снігурівська ОТГ одна з найбільш постраждалих територій Миколаївської області від воєнних дій під час повномасштабного вторгнення Росії в Україну у 2022 році. Вже на початковому етапі війни громада опинилася у зоні активних бойових дій через її стратегічне розташування. Місто Снігурівка та значна частина території громади були окуповані російськими військами [37].

Протягом окупації, що тривала понад вісім місяців, місцеве населення зазнало численних утисків, порушень прав людини та гуманітарної кризи. Відбувалось велике переміщення важкої техніки, танків та вантажівок. Це спровокувало вивільнення великої кількості викидів, що вплинуло на якість повітря. Значних втрат зазнало сільське господарство. Частина сільськогосподарських земель опинилася під обстрілами або була замінована, що унеможливило їх використання [38].

Збройні сили України у листопаді 2022 року провели успішну наступальну операцію на півдні та звільнили Снігурівку. Сьогодні Снігурівська ОТГ залишається територією, що потребує відновлення. Тут зберігається проблема зруйнованої інфраструктури, замінованих полів, нестачі робочих місць і відтоку населення [37].

2.2 Характеристика досліджуваних зразків

Досліджений ґрунт репрезентує різні типи екологічних порушень:

- 1) селітебні землі поблизу зони впливу ракетного влучання (Контроль 1);
- 2) селітебні землі забруднені пестицидами внаслідок ракетного влучання у склад з отрутохімікатами;
- 3) лісові угіддя, що не зазнали пірогенного впливу (Контроль 2);
- 4) лісові угіддя, що зазнали пожеж внаслідок збройного впливу.

Перші два зразки ґрунту характеризуються як чорнозем південний, тоді як третій і четвертий відносяться до слабогумусованих піщаних ґрунтів лісових угідь.

Забруднення пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання спричинило суттєві зміни у фізико-хімічних показниках чорнозему південного. Зокрема, встановлено зменшення вмісту органічної речовини у 1,7 раза та нітратного азоту - майже у 5 разів (табл. 2.1). Під впливом мілітарних факторів спостерігалось значне зростання концентрації амонійного азоту - у 150,8 раза, рухомого фосфору - у 2 рази, а також обмінного калію - у 3,3 раза порівняно з контролем поблизу зони впливу ракетного ураження.

Після пожеж, спричинених збройним впливом, відзначено зниження фізико-хімічних показників слабогумусованого піщаного ґрунту лісових угідь Галицинівського лісу. Вміст органічної речовини зменшився у 8,6 раза, нітратного азоту - у 21,2 раза, рухомого фосфору - у 2 рази, а обмінного калію - у 1,2 раза порівняно з контролем. Підвищення вмісту лише амонійного азоту у 1,5 раза зафіксовано у ґрунті лісових угідь, що зазнали пірогенного впливу.

Таблиця 2.1

Фізико-хімічні характеристики досліджуваних зразків

Варіант	Вміст органічної речовини (гумус), ¹ %	Обмінна кислотність (рН (KCl)) ²	Вміст амонійного азоту (NH ₄), ³ мг/кг	Вміст нітратного азоту NO ₃ , ⁴ мг/кг	Вміст рухомого фосфору (P ₂ O ₅), мг/кг	Вміст обмінного калію (K ₂ O), мг/кг
1. Контроль 1 – фонівий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	3,14	6,02	3,23	43,20	64,28	187,6
2. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	1,86	7,72	487,21	8,83	128,47	610,82
3. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсут-	3,35	4,88	4,86	20,76	27,76	21,85

ності впливу пожеж)						
4. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	0,39	4,88	7,09	0,98	14,37	17,67

2.3 Методика досліджень

2.3.1 Визначення мікробної біомаси ґрунту

Визначення мікробної біомаси ґрунту здійснювали за фумігаційно-екстракційним методом, відповідно до вимог ДСТУ ISO 14240-2:2003 –Якість ґрунту. Визначення ґрунтової мікробної біомаси. Частина 2: Фумігаційно-екстракційний метод” (Київ: Держспоживстандарт України, 2004) [42].

Метод ґрунтується на порівнянні кількості органічного вуглецю (або азоту), екстрагованого з фумігованих та нефумігованих зразків ґрунту. У процесі фумігації пари безводного хлороформу руйнують клітинні стінки мікроорганізмів, унаслідок чого внутрішньоклітинні сполуки переходять у доступну для екстракції форму.

Для аналізу відбирали свіжі зразки орного шару ґрунту, просіяні через сито з діаметром отворів 2 мм. Проби зберігали при температурі +4 °С до моменту проведення фумігації, але не більше 5 діб. Фумігацію проводили протягом 24 годин при температурі 25 °С у герметично закритій ексикаторній камері з парами безводного хлороформу. Після цього пари хлороформу видаляли шляхом вакуумування або провітрювання.

Із фумігованих та контрольних (нефумігованих) зразків проводили екстракцію органічних сполук 0,5 М розчином K_2SO_4 у співвідношенні ґрунт : розчин = 1 : 4. Екстракцію здійснювали шляхом струшування протягом 30 хвилин із подальшим фільтруванням через паперовий фільтр. У фільтратах визначали вміст екстрагованого органічного вуглецю (C_{ex}) за допомогою аналізатора ТОС або методом окиснення дихроматом калію в кислому середовищі.

Вміст вуглецю мікробної біомаси (C_{mic}) розраховували за формулою:

$$C_{mic} = \frac{C_f - C_{nf}}{k_{EC}}, \quad (2.1)$$

де C_f - вміст екстрагованого С у фумігованому зразку, мг/кг;
 C_{nf} - вміст екстрагованого С у нефумігованому зразку, мг/кг;
 $k_{EC} = 0,45$ - коефіцієнт конверсії (Jenkinson & Powlson, 1976).

Отримане значення C_{mic} характеризує запаси вуглецю в мікробній біомасі та є індикатором біологічної активності і родючості ґрунту [45; 46].

2.3.2 Визначення швидкості базального дихання ґрунтових мікроорганізмів.

Дослідження проводили відповідно до вимог ДСТУ ISO 16072:2005 Якість ґрунту. Лабораторні методи визначення мікробного дихання ґрунту та *OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Test No. 217: Soil Microorganisms: Carbon Transformation Test* [47; 50].

Метод ґрунтується на визначенні кількості діоксиду вуглецю (CO_2), що утворюється в процесі аеробного дихання ґрунтових мікроорганізмів у контрольованих лабораторних умовах. Цей показник відображає рівень біологічної активності ґрунту та може використовуватись як індикатор його екологічного стану, ступеня мінералізації органічної речовини та потенціалу родючості.

Для визначення інтенсивності ґрунтового дихання, ми вносили по 25 г свіжого ґрунту у конічні центрифужні пробірки об'ємом 50 см³, обладнані отворами для газообміну. Пробірки герметично закривали кришками та розміщували у конічних колбах ємністю 250 см³, у які попередньо додавали 20 см³ 0,05 М розчину натрій гідроксиду. Розчин готували шляхом розчинення 1 г NaOH у дистильованій воді з подальшим доведенням об'єму до мітки у мірній колбі на 500 см³.

Колби щільно закривали парафіном та інкубували протягом 24 год у термостаті за температури 26 ± 1 °C.

Після інкубаційного періоду пробірки вилучали, а увібраний CO_2 осаджували у вигляді барію карбонату додаванням 2 см^3 розчину BaCl_2 . Надлишок непрореагованого NaOH титрували розчином хлоридної кислоти з використанням фенолфталеїну (3–4 краплі) як індикатора.

Усі визначення проводили у триразовій повторності для забезпечення достовірності результатів.

Розрахунки та статистична обробка результатів вимірювань.

Швидкість вивільненого CO_2 обчислювали за формулою :

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{2,2(\bar{V}_b - \bar{V}_p)}{24 \cdot m_{\text{sm}} \cdot w_{\text{sd}}}, \quad (2.2)$$

де R_{CO_2} – швидкість вивільненого CO_2 на масу сухого ґрунту, $\text{мг CO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$;

2,2 - коефіцієнт (1 см^3 $0,1$ моль HCl відповідає $2,2 \text{ мг CO}_2$ на день), $\text{мг} \cdot (\text{см}^3)^{-1} \cdot \text{день}^{-1}$;

V_b – середній об'єм HCl , витраченої на контролі, см^3 ;

V_p – середній об'єм HCl , витраченої для дослідного зразку, см^3 ;

24 – коефіцієнт перерахунку денного вивільнення в погодинне вивільнення, $\text{год} \cdot \text{день}^{-1}$;

m_{sm} – маса вологого ґрунтового зразку, г;

w_{sd} – частка сухої маси у вологому ґрунті.

Отримані показники характеризують інтенсивність дихальної активності мікробної біоти ґрунту. Вищі значення цього параметра свідчать про активне функціонування мікробних угруповань, наявність легкодоступних джерел органічного вуглецю та сприятливі умови для мікробіологічних процесів. Зниження інтенсивності дихання може вказувати на деградаційні зміни, забруднення або зниження рівня органічної речовини у ґрунті [43].

2.3.3 Визначення мінералізації азоту, нітрифікації та вмісту мінеральних форм азоту в ґрунті

Визначення процесів мінералізації та нітрифікації азоту, а також вмісту нітратного і амонійного азоту в ґрунтах здійснювали відповідно до вимог ДСТУ ISO 14238:2003 «Якість ґрунту. Біологічні методи. Визначання мінералізації азоту і нітрифікації в ґрунтах та впливу хімічних речовин на ці процеси» та ДСТУ 4729:2007 «Якість ґрунту. Визначення нітратного і амонійного азоту в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського». [44]

Методика базується на принципі лабораторного інкубування зразків ґрунту з метою визначення потенційної здатності ґрунтової мікробіоти до мінералізації органічних сполук азоту та їх подальшого перетворення у мінеральні форми - амонійні та нітратні. Попередньо відібрані зразки ґрунту просіювали через сито з отворами діаметром 2 мм, визначали вихідний вміст мінеральних форм азоту, після чого ґрунт зволожували до 60% від повної вологості та інкубували протягом 14 або 28 діб при температурі 25 ± 2 °C у темряві.

Після завершення інкубаційного періоду проводили екстрагування мінерального азоту 1 М розчином KCl у співвідношенні ґрунт : розчин = 1 : 5. Отримані суспензії струшували протягом 30 хвилин, фільтрували і проводили визначення концентрацій нітратного (NO_3^-) та амонійного (NH_4^+) азоту.

Вміст нітратного азоту визначали фотометричним методом після утворення кольорового комплексу з фенолдисульфокислотою. Вміст амонійного азоту визначали за допомогою реактиву Неслера, з подальшим вимірюванням оптичної густини на спектрофотометрі при довжині хвилі 410–425 нм. Результати виражають у міліграмах азоту на 1 кг абсолютно сухого ґрунту.

Різниця між вмістом нітратного Нітрогену до та після інкубації характеризує потенційну нітрифікаційну здатність ґрунту, а сума амонійного і нітратного Нітрогену після інкубації визначає рівень мінералізації. Отримані показники відображають інтенсивність біологічного кругообігу Нітрогену,

активність мікроорганізмів, що беруть участь у процесах амоніфікації та нітрифікації, а також дають змогу оцінити вплив агрохімічних засобів чи органічних добрив на азотний стан ґрунтів.

Таким чином, застосування стандартів ДСТУ ISO 14238:2003 та ДСТУ 4729:2007 забезпечує комплексну оцінку мінералізаційно-нітрифікаційної активності ґрунтів і визначення їхнього потенціалу щодо перетворення органічних сполук азоту в доступні для рослин форми, що є важливою складовою оцінювання родючості та екологічного стану ґрунтового середовища [44; 46].

2.3.4 Характеристика поживних середовищ та їх склад

Загальну чисельність бактеріального ценозу (педотрофів) визначали на ґрунтовому агарі (ГА). Основою для цього середовища є ґрунтова витяжка, до якої додається агар-агар, що забезпечує щільність субстрату (витяжка з ґрунту – 1000 мл (як основа) + агар-агар – 15–20 г).

Амоніфікаторів обліковували на м'ясо-пептонному агарі (МПА), до складу якого входять м'ясний екстракт, пептон та натрій хлорид. (м'ясний екстракт – 3 г + Пептон – 10 г + NaCl – 5 г + агар-агар – 15–20 г + Вода дист.– 1000 мл. рН 7,2–7,4). Це середовище містить легкодоступні органічні сполуки азоту, завдяки чому сприяє розвитку бактерій, здатних до амоніфікації органічних залишків.

Для олігоазотрофів застосовували середовище Ешбі, що містить маніт, мінеральні солі та карбонат кальцію. (маніт – 20,0 г + K_2HPO_4 – 0,2 г + $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,2 г + NaCl – 0,2 г + K_2SO_4 – 0,1 г + $CaCO_3$ – 5,0 г + агар-агар – 15–20 г + Вода дист.– 1000 мл) Особливістю цього середовища є відсутність легкодоступних джерел азоту, що забезпечує ріст азотфіксуючих бактерій (*Azotobacter*).

Амілолітичні мікроорганізми висівали на крохмало-аміачний агар (КАА), складовими якого є крохмаль, аміачні солі, фосфати та мінеральні добавки (Крохмаль розчинний – 10 г + $(NH_4)_2SO_4$ – 2 г + K_2HPO_4 – 1 г + $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,5 г + NaCl – 0,5 г + агар-агар – 15–20 г + вода дист. – 1000

мл). Це середовище дозволяє виявляти мікроорганізми, здатні розкласти крохмаль.

Фосфатмобілізуєчі бактерії культивували на середовищі Менкіної, яке містить глюкозу, мінеральні солі та нерозчинний фосфат кальцію (глюкоза – 10 г + $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – 5 г + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,3 г + KCl – 0,3 г + NaCl – 0,3 г + агар-агар – 15–20 г + вода дист. – 1000 мл). Дане середовище дає можливість оцінити здатність мікроорганізмів розчинити важкодоступні форми фосфору.

Оліготрофи визначали на голодному агарі (ГА), що складається лише з агар-агару та води і не містить органічних джерел живлення (агар-агар – 15–20 г + вода дист. – 1000 мл). Завдяки цьому селекціонуються мікроорганізми, здатні існувати в умовах низької трофності.

Гуматрозкладаючі мікроорганізми обліковували на гуматному агарі (ГА), до складу якого входять солі гумінових кислот, фосфати та мінеральні солі (Калієві солі гумінових кислот – 0,5–1,0 г + K_2HPO_4 – 0,5 г + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,2 г + NaCl – 0,2 г + агар-агар – 15–20 г + вода дист. – 1000 мл). Це середовище дозволяє виявляти мікроорганізми, які використовують гумусові речовини як джерело живлення.

Целюлозоруйнівні мікроорганізми висівали на середовище Гетчинсона (С. Гетч.), основою якого є целюлоза (фільтрувальний папір, вата) у поєднанні з мінеральними солями (Целюлоза – 5,0 г + $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 1,0 г + K_2HPO_4 – 1,0 г + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,2 г + NaCl – 0,2 г + CaCl_2 – 0,1 г + агар-агар – 15–20 г + вода дист. – 1000 мл). Це середовище вибірково стимулює ріст мікроорганізмів, здатних до деструкції целюлозних сполук.

Актинобактерії культивували на картопляно-глюкозному агарі (КГА), що містить картопляний відвар, глюкозу та агар-агар (картопля (відвар) – 200 г + глюкоза – 20 г + агар-агар – 15–20 г + вода дист. – до 1000 мл). Таке середовище є багатим на поживні речовини і сприяє розвитку актиноміцетів.

Мікроміцети (мікроскопічні гриби) виділяли на середовищі Чапека (ЧА), яке складається із сахарози, нітратів, фосфатів, сульфатів та мікроелементів (сахароза – 30 г + NaNO_3 – 2 г + K_2HPO_4 – 1 г + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5 г + KCl

– 0,5 г+ FeSO₄ – 0,01 г+Агар-агар – 15–20 г+вода дист. – 1000 мл). Це середовище вибіркоче для розвитку грибів, зокрема пліснявих форм, завдяки наявності сахарози як основного джерела вуглецю [46; 52].

2.3.5 Визначення біогенності, коефіцієнтів мінералізації–іммобілізації, педотрофності та індексів оліготрофності й олігонітрофільності

Для характеристики спрямованості мікробіологічних процесів у ґрунті та оцінки його трофічного стану застосовували методику розрахунку коефіцієнтів і індексів за кількістю колонієутворювальних одиниць (КУО), що виростають на спеціальних живильних середовищах.

Коефіцієнт мінералізації–іммобілізації (К_{м/і}):

$$K_{m/i} = \frac{C_{КАА}}{C_{МПА}} \quad (2.3)$$

де: СКАА – кількість мікроорганізмів, що вирости на крохмально-аміачному агарі (КАА), які беруть участь у мінералізації органічної речовини;

СМПА – чисельність мікроорганізмів на м'ясо-пептонному агарі (МПА), що характеризують амоніфікаторів, які іммобілізують азот у власній біомасі. Інтерпретація:

К_{м/і} < 1 – переважають іммобілізаційні процеси;

К_{м/і} > 1 – домінує мінералізація;

К_{м/і} ≈ 1 – баланс між процесами.

Коефіцієнт педотрофності (К_п):

$$K_p = \frac{C_{МПА}}{C_{ГА}} \quad (2.4)$$

де: СГА – кількість колоній на ґрунтовому агарі (ГА), що відображає чисельність педотрофів;

СМПА – загальна чисельність гетеротрофних мікроорганізмів на МПА.

Високі значення коефіцієнту педотрофності свідчать про стабільність мікробного угруповання та добрий розвиток гумусових процесів у ґрунті.

Індекс оліготрофності (Іол):

$$I_{ol} = \frac{GA}{MPA} \quad (2.5)$$

де: ГА – кількість колоній на голодному агарі (оліготрофи);

МПА – чисельність мікроорганізмів на МПА.

Підвищення індексу оліготрофності відображає дефіцит легкодоступних органічних речовин у ґрунті.

Індекс олігонітрофільності (Іон):

$$I_{on} = \frac{Eshbi}{MPA} \quad (2.6)$$

де: Ешбі – кількість мікроорганізмів на середовищі Ешбі (олігонітрофіли, здатні розвиватися при низькому вмісті азоту);

МПА – чисельність мікроорганізмів на МПА.

Зростання індексу Іон свідчить про нестачу мінерального азоту, а його зниження – про добру забезпеченість ґрунту мінеральними формами азоту.

Біогенність вираховували за формулою[63]:

$$\text{Біогенність} = KAA + MPA + Eshbi + GA \quad (2.7)$$

де: КАА - крохмало-аміачний агар;

МПА - м'ясо-пептонний агар;

Ешбі - середовище Ешбі;

ГА - голодний агар.

Чисельність виражали у млн КУО/г сухого ґрунту.

Коефіцієнт мобілізації азотного фонду вираховували за формулою[13; 40]:

$$\text{КМАФ} = \frac{\text{МПА} + \text{КАА}}{\text{Ешбі} + \text{ГА}} \quad (2.8)$$

де: МПА - м'ясо-пептонний агар;
 КАА - крохмало-аміачний агар;
 Ешбі - середовище Ешбі;
 ГА - голодний агар.

Таким чином, розрахунок коефіцієнтів мінералізації–іммобілізації, педотрофності та індексів оліготрофності й олігонітрофільності, за кількістю мікроорганізмів на різних середовищах, дає змогу комплексно оцінити напрям і інтенсивність мікробіологічних процесів, ступінь біологічної активності та екологічний стан ґрунтового середовища, що є важливою складовою аналізу трансформації органічної речовини й родючості ґрунтів [45; 46].

2.3.6 Визначення токсичності ґрунту

Визначення токсичності ґрунту проводили відповідно до вимог робочої методики, затвердженої в УЛЯБП АПК НУБіП України. Початковим етапом було приготування безазотного середовища Ешбі, на якому розвиваються азотфіксувальні мікроорганізми – діазотрофи. Склад середовища: г/л: K_2HPO_4 – 0,2; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,2; K_2SO_4 – 0,1; NaCl – 0,2; CaCO_3 – 5,0; сахароза – 20,0; агар-агар – 20,0. Для приготування синтетичного середовища Ешбі необхідно в 1 л водогінної води розчинити солі, виміряти рН, за необхідності довести значення рН до нейтрального рівня (7,3-7,6), додати агар-агар, витримати для його набухання певний проміжок часу (15–20 хв) і одержане середовище при постійному перемішуванні довести до кипіння. Профільтрувати гарячим за допомогою ватно-марлевого фільтру, за прописом додати CaCO_3 та розлити у спеціальний посуд для стерилізації. Після стерилізації 116,5 °С (при 0,75 атм в автоклаві) 10 хв, середовище розливали в стерильні чашки Петрі. Для приготування зразків ґрунту для аналізу додавали стерильну водогінну воду до одержання густої суспензії. Розкладання грудочок зволоженого ґрунту на середовище Ешбі, використовували трафарет з розрахунку 25 шт. на 1 чашку Петрі для забезпечення простору наростання

біомаси *Azotobacter chroococcum*, який утворює буро-коричневий пігмент. Заповнені чашки інкубували в термостаті 8 діб при температурі 28 °С. Повторність досліду 4-х кратна.

По закінченні терміну проводили облік грудочок, які обросли біомасою азотобактера, і виконували розрахунки у відсотках. Відсоток грудочок, на яких відсутній бактеріальний ріст буро-коричневого кольору, вказує на токсичність ґрунту.

2.4 Характеристика відновлювального комплексу

Для відновлення біологічної активності пошкоджених і забруднених ґрунтів ми досліджували відновлювальний комплекс - поєднане застосування органічного добрива «Паросток» і біопрепарату «Ультрачист».

2.4.1 Органічне добриво «Паросток»

Органічне добриво «Паросток» являє собою багатоконпонентний біоорганічний продукт, що містить в собі високу концентрацію макро- та мікроелементів (азот, фосфор, калій, кальцій, магній, сірку, залізо, цинк, мідь, марганець тощо), збалансований симбіотичний консорціум ефективних мікроорганізмів та біологічно активних речовин. Його застосування спрямоване на підвищення запасів гумусу, покращення фітосанітарного стану ґрунтів, активізацію мікробіологічних процесів та зменшення негативного впливу хімічних поллютантів. Завдяки наявності симбіотичного комплексу ефективних мікроорганізмів (переважно представників родів *Azotobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Lactobacillus*), препарат стимулює утворення біогенного вуглецю, поліпшує агрофізичні властивості ґрунту, сприяє мінералізації органічних залишків та формуванню стабільної структури ґрунтових агрегатів [61].

2.4.2 Біопрепарат «Ультрачист»

Біопрепарат «Ультрачист» є бактеріально-метаболічним засобом для детоксикації та ремедіації забруднених середовищ. У його складі містяться природні штами мікроорганізмів-деструкторів, здатних до розкладання пестицидів, вибухових речовин, важких вуглеводнів, нафтопродуктів та інших

ксенобіотиків. Мікроорганізми препарату (зокрема *Arthrobacter*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter* та ін.) функціонують у стійкому симбіозі, завдяки чому забезпечується синергічний ефект біодеструкції. Препарат діє у двох напрямках: безпосередньо розкладає забруднювачі складної хімічної структури та стимулює розвиток автохтонної мікробіоти, активізуючи природні механізми самоочищення ґрунту [62].

2.5 Статистична обробка результатів

Статистичну обробку даних для визначення достовірності розбіжностей між варіантами та розрахунок коефіцієнта кореляції Пірсона виконували за допомогою програми Microsoft Excel.

Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Мікробіологічні дослідження проводилися в Українській лабораторії якості та безпеки продукції агропромислового комплексу при Національному університеті біоресурсів і природокористування України. Лабораторія забезпечена сучасним обладнанням, необхідним для виконання мікробіологічних і ґрунтово-екологічних досліджень: автоклавами, стерильними боксами, ламінарними шафами, мікроскопами, інкубаторами, аналітичними вагами та спектрофотометричними приладами[56]. Відбір і підготовка ґрунтових зразків проводилися за загальноприйнятими методиками ґрунтової мікробіології [42]. У лабораторних умовах здійснювали виділення та культивування мікроорганізмів різних еколого-трофічних груп, визначали їх кількісний і якісний склад, проводили мікроскопічні дослідження та ідентифікацію ізольованих культур. Для висіву використовували класичні поживні середовища (ґрунтовий агар, м'ясо-пептонний агар, крохмало-аміачний агар, середовище Чапека тощо), що дозволяло отримати дані про чисельність і структурний склад мікробного комплексу [46].

Таким чином, лабораторна база УЛЯБП АПК НУБіП забезпечила проведення комплексних експериментальних досліджень, необхідних для оцінки впливу воєнних дій на біологічну активність і мікробіологічні показники ґрунтів [56].

3.1 Застосування відновлювального комплексу і його вплив на мікробну біомасу

Поєднане застосування органічного добрива «Паросток» та бактеріально-метаболического біопрепарату «Ультрачист» в схемі досліді було позначено як відновлювальний комплекс (ВК).

Визначення ґрунтової мікробної біомаси проводилась згідно міжнародної стандартизованої методики [42].

За результатами досліджень було встановлено, що через негативний вплив воєнних дій відбулось значне зниження показників мікробної біомаси

ґрунту. У чорноземі південному, забрудненому пестицидами внаслідок ракетного влучання у склад з отрутохімікатами, відбулось зниження мікробної біомаси у 3,8 разів (рис. 3.1). В слабогумусованих піщаних ґрунтах лісових угідь, що зазнали пожеж внаслідок збройного впливу цей показник зменшився в 4,5 рази відносно контролю.

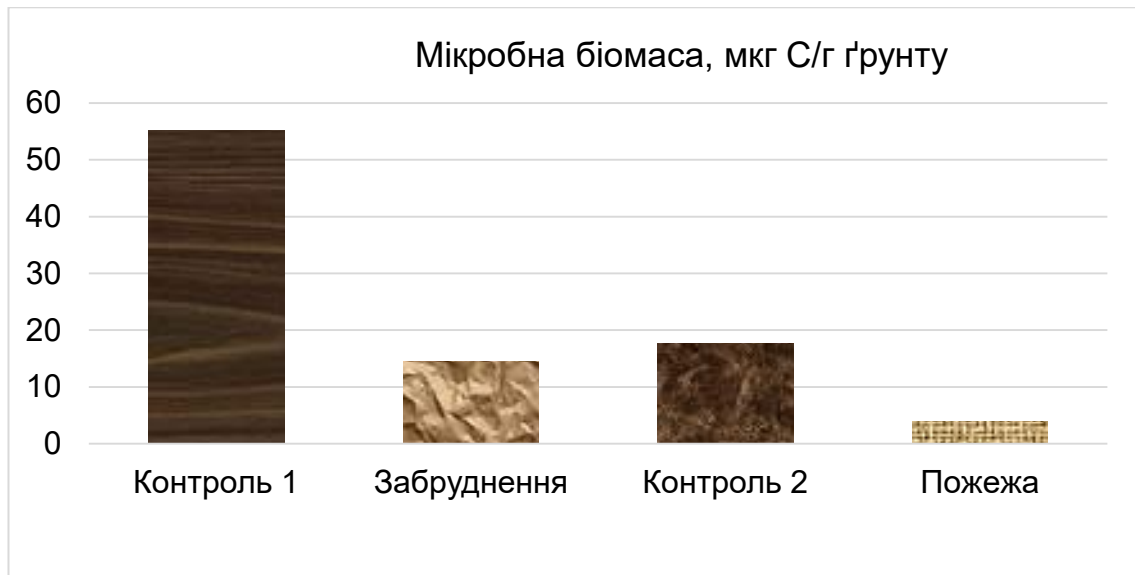


Рис 3.1 Мікробна біомаса ґрунтів, що зазнали мілітарного впливу: контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання; ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання; контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності пірогенної дії); лісові угіддя після пожежі внаслідок збройного впливу.

В таблиці 3.1 наведено, що комплексне застосування органічного добрива «Паросток» і біопрепарату «Ультрарист» позитивно вплинуло на досліджуваний показник. Застосування відновлювального комплексу посприяло збільшенню мікробної біомаси в чорноземі південному, проте це зростання було незначним – 1,8 разів. Мікробіота забрудненого ґрунту пестицидами та залишками вибухових речовин після ракетного удару активно відреагувала на внесення ВК збільшенням показника біомаси у 7,2 рази. У слабогумусованому піщаному ґрунті лісових угідь ВК забезпечив зростання мікробної біо-

маси в 6,4 разів. У ґрунті, що зазнав пожежі, це збільшення було максимальним і склало 24 рази.

Таблиця 3.1

Вплив відновлювального комплексу (ВК) на мікробну біомасу ґрунтів, що зазнали мілітарного впливу

Варіанти дослідів	Біомаса, мкг С/г ґрунту
1. Контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	54,8±5,09
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	99,6±5,75
3. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	14,5±8,04
4. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання + ВК	104,5±11,25
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	17,7±6,78
6. Контроль 2 + ВК	113,5±11,56
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	3,9±2,62
8. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК	93,5±7,65

Встановлено негативний мілітарний вплив на чорноземі південні селітєбних територій та слабогумусовані піщані ґрунти лісових угідь, що позначилось в зменшенні мікробної біомаси в 3,8 та 4,5 разів відповідно. Застосування відновлювального комплексу органічного добрива «Паросток» і бактеріально-метаболического біопрепарату «Ультрачист» позитивно впливало на мікробну біомасу пошкоджених в результаті воєнних дій ґрунтів, максимальне збільшення показника в 24 рази відмічене на лісових угіддях після пожеж.

Під час взаємодії компонентів комплексу «Паросток + Ультрачист» спостерігається підсилення метаболическої активності мікроорганізмів, що сприяє прискоренню процесів біотрансформації токсичних речовин, поліпшенню азотного та вуглецевого циклів і підвищенню загальної біологічної продуктивності ґрунту. Синергічна дія цих препаратів забезпечує зростання мікробної біомаси, підвищення активності дихання ґрунту, стабілізацію показників рН і відновлення мікробної рівноваги у деградованих чорноземах.

Таким чином, поєднане використання препаратів «Паросток» і «Ульт-рачист» є ефективною біотехнологічною стратегією відновлення екологічно порушених ґрунтів, що зазнали впливу військових дій, пестицидного або паливного забруднення, оскільки воно поєднує властивості біодеструкції, мікробної стимуляції та гумусоутворення.

3.2 Чисельність мікроорганізмів основних еколого-трофічних груп у зразках ґрунту

Комплекс робіт включав відбір ґрунтових зразків, виділення й культивування мікроорганізмів, а також облік бактеріальних комплексів і мікроскопічних грибів згідно з загальноприйнятими в ґрунтовій мікробіології методиками [52]. У лабораторії досліджували якісний та кількісний склад мікрофлори ґрунту, здійснювали мікроскопічний аналіз отриманих культур та їх ідентифікацію.

Оцінку направленості процесів, які відбуваються у ґрунті ризосфери, визначали за допомогою мікробіологічних показників загальної біологічної активності. Чисельність мікроорганізмів, які вирости, виражали в колонієутворювальних одиницях (КУО) у 1 грамі повітряно сухого ґрунту.

Мікробний ценоз ґрунту представлений мікроорганізмами різних таксономічних та еколого-трофічних груп [45].

Проведені нами дослідження щодо впливу відновлювального комплексу на чисельність мікроорганізмів показали суттєві зміни показників, що визначалися вихідними властивостями зразка (табл.3.2.1 та табл.3.2.2).

Таблиця 3.2.1

Чисельність мікроорганізмів основних еколого-трофічних та таксономічних груп в зразках ґрунту

Варіант	Чисельність мікроорганізмів за групами, млн КУО/г сухого ґрунту				
	амоніфікуючі	амілолітичні	педотрофні	фосфатомобілизивні	олігоазотрофні
1. Контроль 1 – фоновий ґрунт	1,9±0,02	1,3±	2,7±0,22	0,4±0,01	3,9±0,22

поблизу зони впливу ракетного влучання		0,08			
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	13,8±0,11	11,5±1,76	15,7±0,15	21,9±0,16	17,5±0,45
3. Забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	2,1±0,05	0,3±0,03	0,8±0,07	0,5±0,05	0,5±0,05
4. Забруднений пестицидами та вибуховими речовинами + ВК	12,2±0,49	1,4±0,01	6,1±0,33	13,7±0,46	3,1±0,15
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	0,2±0,01	2,0±0,09	0,9±0,06	0,2±0,02	2,1±0,06
6. Контроль 2 + ВК	4,1±0,3	3,3±0,04	6,6±0,2	1,5±0,09	4,6±0,23
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	0,6±0,02	0,1±0,01	0,3±0,03	0,4±0,03	0,2±0,02
8. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК	12,6±0,07	6,9±1,62	9,7±0,26	8,0±0,43	8,8±0,21

Таблиця 3.2.2

Варіант	Чисельність мікроорганізмів за групами				
	млн КУО/г сухого ґрунту		тис. КУО/г сухого ґрунту		
	оліготрофні	гуматрозкладаючі	целюлозолітичні	актинобактерії	мікроміцети
1. Контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	5,5±0,52	4,7±0,30	30,9±3,69	359,4±6,67	32,1±0,58
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	10,9±0,11	16,0±0,53	34,9±0,75	1061,5±5,29	80,7±22,28
3. Забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	2,0±0,19	3,5±0,59	6,1±0,11	38,4±1,53	24,5±1,0
4. Забруднений пестицидами та вибуховими речовинами + ВК	13,5±0,86	7,0±0,30	15,6±0,75	254,2±13,7	13,8±1,15
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	4,4±0,16	2,6±0,06	13,6±1,56	43,2±1,53	90,6±1,53
6. Контроль 2 + ВК	4,6±0,07	5,6±0,40	27,7±1,33	335,1±2,65	135,0±2,52
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	2,9±0,46	1,5±0,06	3,1±0,09	97,2±5,57	119,6±0,58
8. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК	9,2±0,39	10,1±0,33	13,7±1,32	269,6±1,15	100,6±5,51

Пошкодження ґрунтів призвело до зниження щільності популяцій усіх досліджених еколого-трофічних і таксономічних груп мікроорганізмів. Винятком стали амоніфікуючі та фосфатмобілізуючі мікроорганізми, чисельність яких у збідненому органічною речовиною ґрунті лісових угідь під впливом пожеж навіть підвищувалася. Усі без винятку групи мікроорганізмів виявили високу чутливість до дії відновлювального комплексу, що проявилось у зростанні їх чисельності, особливо в деградованих зразках ґрунту.

Так, кількість мікроорганізмів, які засвоюють органічні форми азоту, в забрудненому пестицидами та вибуховими речовинами ґрунті зростає в 5,8 разів, а в зразках лісових угідь після пожеж - у 21 раз. Подібні тенденції відзначали і для мікроорганізмів, що використовують переважно мінеральні сполуки азоту: їх чисельність збільшувалася в 4,6 і 69 разів відповідно. Для педотрофної мікробіоти приріст становив 7,6 та 32,3 разів за умови внесення відновлювального комплексу.

Реакція мікроорганізмів, здатних перетворювати фосфати ґрунту, відрізнялася: хоча вони негативно реагували на мілітарне забруднення, застосування ВК зумовило зростання їх чисельності у 27,4 рази порівняно із забрудненим ґрунтом і у 20 разів - порівняно з лісовими угіддями після пожеж.

Азотфіксувальні бактерії виявили особливу чутливість до забруднення - їх кількість зменшилася у 7,8 разів. Внесення відновлювального комплексу сприяло відновленню популяцій до рівня, близького до фонового (3,1 млн КУО/г сухого ґрунту). Пожежі ж скоротили їх чисельність у 10,5 разів, тоді як дія ВК забезпечила зростання у 44 рази, перевищивши показники контролю.

Ракетне влучання, що спричинило забруднення чорнозему південного пестицидами, призвело до зниження чисельності оліготрофів та мікроорганізмів, які розкладають гумати, у 2,7 та 1,3 рази відповідно (табл. 3.2.2). Внесення відновлювального комплексу сприяло підвищенню їх кількості - у 6,7 та 2,0 рази порівняно із забрудненим ґрунтом. Пожежі лісових угідь та-

кож негативно вплинули на чисельність цих груп, однак за дії ВК показники збільшилися у 3,1 та 6,7 рази відповідно відносно пошкодженого ґрунту.

Мікроорганізми, здатні до розкладання целюлози, відіграють важливу роль у процесах збагачення ґрунтів органічною речовиною. Активні целюлозолітичні мікроорганізми мають широкий спектр корисних властивостей, зокрема захисну дію, що робить їх перспективними біоагентами для використання в екологічно безпечних агротехнологіях [58]. Використання відновлювального комплексу сприяло зростанню чисельності целюлозо-руйнівних мікроорганізмів: у контрольних зразках 1 і 2 - у 1,1 та 2 рази відповідно, тоді як у пошкоджених ґрунтах цей показник зріс у 2,6 та 4,4 рази. Водночас у контрольних зразках 1 і 2 під впливом ВК спостерігалось збільшення кількості мікрومیцетів у 2,5 та 1,5 рази відповідно, тоді як у деградованих зразках - навпаки, їх чисельність зменшувалася.

Актинобактерії - важливий компонент ґрунтової мікробіоти, що характеризується здатністю до розкладання стійких і токсичних сполук, зокрема гербіцидів, виконуючи тим самим функцію потенційних агентів біоремедіації [59]. У разі забруднення відзначалося суттєве зменшення їх чисельності - у 9,4 рази порівняно з фоновим рівнем, однак внесення відновлювального комплексу забезпечувало часткове відновлення - у 6,6 рази порівняно із забрудненим ґрунтом.

В екологічному аспекті актинобактерії також відіграють значну роль у процесах відновлення ґрунтів після пожеж, де вони можуть ставати доміантною групою [60]. У ґрунті лісових угідь після пожеж їх кількість перевищувала фонові показники і становила 97,2 тис. КУО/г сухого ґрунту; під впливом ВК цей показник зріс у 2,8 рази.

3.3. Біогенність та спрямованість процесів у ґрунтах

Внесення відновлювального комплексу сприяло підвищенню біогенності ґрунту. Найвище зростання цього показника спостерігалось у пошкоджених зразках порівняно з контрольними. Зокрема, у фоновому чорноземі півден-

ному (контроль 1) біогенність під впливом ВК збільшилась у 4,2 раза, тоді як після ракетного ураження - у 6,1 раза (рис. 3.2). Подібну тенденцію, але з більш вираженою різницею, зафіксовано у слабогумусованих піщаних ґрунтах лісових угідь: під дією ВК показник зріс у 1,9 раза в контролі 2 та у 9,9 раза в зразках після пожеж, спричинених збройним впливом.

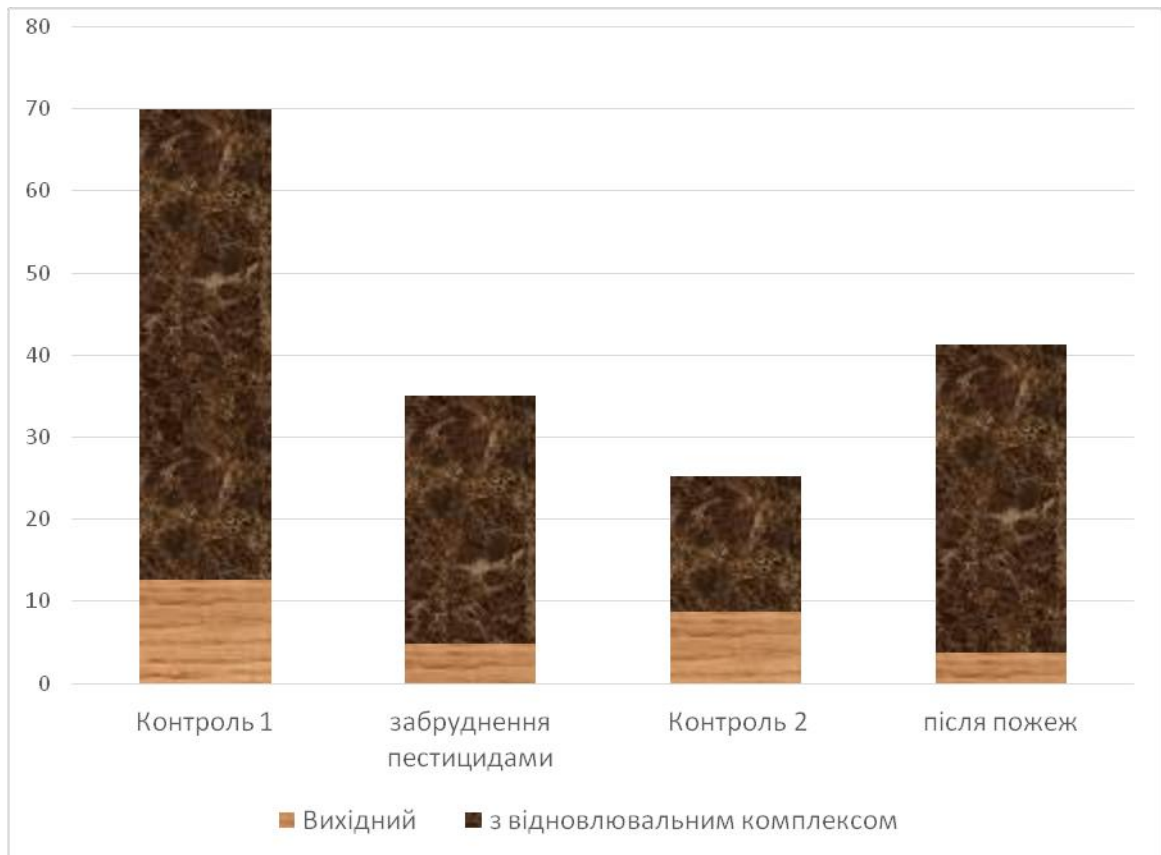


Рис.3.2 Біогенність чорнозему південного за мілітарного впливу та застосування відновлювального комплексу

Біогенність тісно пов'язані з показниками мікробної біомаси, про це свідчить коефіцієнт кореляції Пірсона, який був у межах від 0,68 у варіанті контроль 2 з додаванням ВК до 1 у зразках слабогумусованого піщаного ґрунту лісових угідь після пожеж внаслідок збройного впливу.

Обчислення індексів дало змогу оцінити інтенсивність і спрямованість процесів, що відбуваються в ґрунтах під впливом різних чинників. Мілітарне навантаження спричинило порушення направленості мікробіологічних процесів, що повпливало на зниження значень більшості досліджених індексів і

коефіцієнтів. Забруднення пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання, навпаки, призвело до зростання коефіцієнтів мобілізації азотного фонду та мікробної трансформації органічної речовини - у 2,8 та 35,7 раза відповідно (табл. 3.3). Використання відновлювального комплексу сприяло частковій стабілізації стану ґрунтів: за низьких показників спостерігалось їх підвищення, тоді як за надмірно високих - помірне зниження, що свідчить про вирівнювання мікробіологічних процесів.

Таблиця 3.3

Спрямованість мікробіологічних процесів у зразках ґрунту

Варіант	Індекси та коефіцієнти					
	педотрофності	оліготрофності	мінералізації та іммобілізації	олігоазотрофності	мобілізації азотного фонду	мікробної трансформації органічної речовини
1. Контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	1,42	2,89	0,68	2,05	0,34	4,67
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	1,14	0,79	0,83	1,27	0,89	30,36
3. Забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	0,38	0,95	0,14	0,23	0,96	168,8
4. Забруднений пестицидами та вибуховими речовинами + ВК	0,50	1,11	0,11	0,25	0,82	118,51
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	4,5	22,0	10,0	10,5	0,34	0,22
6. Контроль 2 + ВК	1,61	1,12	0,80	1,12	0,8	9,19
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	0,50	4,83	0,17	0,33	0,23	4,2
8. Лісові угіддя	0,77	0,73	0,55	0,7	1,08	

після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК						35,6
---	--	--	--	--	--	------

Отже, результати проведених досліджень підтверджують, що військові дії мають негативний вплив на мікробіоту чорнозему південного. Це призводить до різкого зниження чисельності мікроорганізмів та пригнічення мінералізаційних процесів.. Найбільш ураженими виявилися амілолітики, педотрофи, целюлозолітики та фосфатмобілізатори, чисельність яких зменшилася у кілька разів. Встановлено, що після ракетного влучання, яке спричинило забруднення пестицидами та вибуховими речовинами, біогенність чорнозему південного знизилася у 2,5 раза, а внаслідок пожеж у межах лісових угідь - у 2,2 раза.

Застосування відновлювального комплексу може розглядатися як стабілізаційний чинник, здатний активізувати мікробіоту ґрунту та відновити її екологічні функції, сприяючи регенерації не лише ґрунтового середовища, а й усєї ґрунтової екосистеми.

3.3 Базальне дихання ґрунтових мікроорганізмів

Базальне дихання ґрунту виступає ключовим індикатором активності мікробіологічних процесів, зокрема трансформації Карбону. Воно відображає рівень доступності цього елемента для підтримки життєдіяльності мікроорганізмів та характеризує інтенсивність мінералізації органічної речовини у ґрунтовому середовищі.

Таблиця 3.4

Інтенсивність базального дихання ґрунтів

Варіант	Швидкість вивільненого CO ₂ в ґрунті, мкг CO ₂ *Г ⁻¹ * ГОД ⁻¹		
	вихідний вміст	14-та доба	28-ма доба
1. Контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного	2,0±0,6	2,3±0,5	2,0±0,7

влучання			
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	7,0±0,9	1,7±0,3	2,7±0,001
3. Забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	6,7±0,3	6,3±0,3	6,5±0,01
4. Забруднений пестицидами та вибуховими речовинами + ВК	14,3±1,3	9,5±0,3	4,2±1,4
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	2,3±0,5	0,6±0,2	0,7±0,4
6. Контроль 2 + ВК	5,9±0,5	1,8±0,2	1,1±0,2
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	2,4±0,2	0,4±0,01	0,9±0,001
8. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК	4,8±1,0	1,8±0,2	1,1±0,2

За результатами досліджень, проведених протягом 28 діб, встановлено, що забруднення чорнозему південного пестицидами внаслідок ракетного ураження призвело до порушення процесів карбонового циклу. Це проявилось у зростанні швидкості базального дихання ґрунтових мікроорганізмів у 3,2 рази порівняно з контролем. Максимальне значення інтенсивності виділення CO₂ становило 6,5 мкг CO₂·г⁻¹·год⁻¹ у варіантах із забрудненням, тоді як за внесення відновлювального комплексу цей показник зменшувався на 35,4 %.

Застосування відновлювального комплексу в цілому стимулювало активність мікробного дихання у більшості варіантів досліджу. Найбільший приріст - на 77,8 %, зафіксовано в ґрунтах лісових угідь після пожеж, спричинених збройним впливом. У лісових ґрунтах без слідів пожеж також відзначено посилення цього процесу на 57,1 %. У чорноземі південному поблизу осередків ураження із залишками отрутохімікатів інтенсивність дихання під впливом відновлювального комплексу підвищилася на 35,0 %.

Таким чином, використання відновлювального комплексу в умовах чорноземів південних, забруднених пестицидами, а також у лісових угіддях, що постраждали від пожеж, позитивно позначалося на інтенсивності дихання та активності мікробіологічних процесів біотрансформації Карбону.

3.4 Динаміка вмісту амонійного азоту у ґрунтах за різних варіантів дослідів

Вміст амонійного азоту ($N-NH_4$) є важливим показником азотного режиму ґрунту, який визначає доступність мінеральних форм азоту для мікроорганізмів та рослин, а також відображає інтенсивність мінералізаційних процесів [14].

Визначення нітратного і амонійного Нітрогену у ґрунті за методом, викладеним в ДСТУ 4729:2007 Якість ґрунту. Визначення нітратного та амонійного азоту модифікації ННЦ ІГА ім. О.Н. Соколовського [44].

Дослідження показали, що у контрольному ґрунті поблизу зони ураження ракетним влучанням концентрація $N-NH_4$ різко зросла до 14-ї доби (137,6 мг/кг), однак до кінця експерименту зменшилася до 30,4 мг/кг. При застосуванні відновлювального комплексу (ВК) спостерігалось поступове зниження відносно високого початкового рівня (77,8 мг/кг) до мінімальних значень (13,7 мг/кг) на 28-му добу.

Таблиця 3.5

Вміст амонійного азоту від 0 до 28 доби досліджень

Варіант	Вміст $N-NH_4$, мг/кг ґрунту		
	0-а доба	14-а доба	28-а доба
1. Контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	20,9±4,18	137,6±27,52	30,4±6,07
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	77,8±15,57	51,7±10,35	13,7±2,73
3. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	243,0±48,6	546,1±109,22	226,6±45,33
4. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання + ВК	646,6±129,32	522,9±104,58	88,4±17,67
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	110,8±22,16	161,6±32,31	84,8±16,95
6. Контроль 2 + ВК	160,2±32,04	73,5±14,69	17,7±3,55
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	130,4±26,08	189,0±37,8	111,3±22,26
8. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК	145,8±29,15	67,4±13,48	22,1±4,41

У варіантах із ґрунтом, забрудненим пестицидами та вибуховими речовинами, концентрація амонійного азоту була суттєво вищою, ніж у контролі: від 243,0 мг/кг на початку до пікових значень 546,1 мг/кг на 14-ту добу. Застосування ВК дозволило зменшити надлишковий вміст N-NH₄ із 646,6 мг/кг до 88,4 мг/кг на 28-му добу, що свідчить про ефективність комплексу у регуляції азотного режиму в умовах техногенного забруднення.

У лісових угіддях без впливу пожеж також спостерігалася динаміка зростання амонійного азоту від 110,8 до 161,6 мг/кг на 14-ту добу та його подальше зниження до 84,8 мг/кг. При додаванні ВК концентрація різко знижувалася до 17,7 мг/кг. У зразках, відібраних після пожеж, рівень амонійного азоту коливався у межах 130,4–189,0 мг/кг, із поступовим зниженням до 111,3 мг/кг, тоді як застосування ВК сприяло зменшенню показника до 22,1 мг/кг.

Отримані результати узгоджуються з попередніми дослідженнями щодо впливу стресових чинників на трансформацію азоту у ґрунті [57] та підтверджують, що відновлювальний комплекс є дієвим засобом стабілізації азотного режиму, сприяє зниженню надмірних концентрацій амонійного азоту та оптимізує умови для функціонування ґрунтової мікробіоти.

3.5 Динаміка вмісту нітратного азоту у ґрунтах за різних варіантів досліду

Нітратна форма азоту є найбільш рухомою та доступною для рослин і мікроорганізмів, а її вміст у ґрунті визначається інтенсивністю процесів нітрифікації та особливостями трансформації органічних і мінеральних сполук азоту [14].

Таблиця 3.6

Вміст нітратного азоту

Варіант	Вміст N-NO ₃ , мг/кг ґрунту		
	0-а доба	14-а доба	28-а доба

1. Контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	19,7±1,08	52,7±1,66	50,8±0,41
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	514,4±1,83	532,6±0,32	527,9±3,75
3. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	5,5±0,19	15,3±3,83	525,5±2,3
4. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання + ВК	504,4±5,02	505,8±2,01	509,6±4,0
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	3,2±0,66	31,9±1,45	32,4±1,32
6. Контроль 2 + ВК	476,5±7,37	496,1±1,02	514,1±1,16
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	4,3±1,08	5,0±1,25	2,9±0,76
8. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК	433,5±18,59	497,7±2,68	516,4±2,29

У контрольному ґрунті поблизу зони ураження ракетним влучанням зафіксовано поступове зростання вмісту N-NO₃ з 19,7 мг/кг на початку досліджу до 52,7 мг/кг на 14-ту добу та 50,8 мг/кг на 28-му добу. Це свідчить про відновлення нітрифікаційної активності мікробних угруповань у відносно стабільних умовах. При внесенні відновлювального комплексу (ВК) рівень нітратного азоту залишався стабільно високим – понад 500 мг/кг протягом усього експерименту, що вказує на інтенсивний перехід амонійних форм у нітратні.

У ґрунтах, забруднених пестицидами та вибуховими речовинами, початковий рівень N-NO₃ був низьким (5,5 мг/кг), але вже до 28-ї доби зріс до 525,5 мг/кг, що свідчить про поступове відновлення мікробних процесів після техногенного навантаження. За умови застосування ВК концентрація залишалася стабільно високою (понад 500 мг/кг), що свідчить про стимулювання процесів нітрифікації навіть у сильно забрудненому середовищі.

У лісових угіддях без впливу пожеж вміст N-NO₃ зріс у 10 разів на 28-му добу, що відображає природний хід мінералізаційно-нітрифікаційних процесів. Застосування ВК зумовило значне зростання показників, що свідчить про посилення мікробної активності й активізацію колообігу азоту.

У лісових ґрунтах після пожеж вміст нітратного азоту залишався низьким, що пояснюється пригніченням мікробіоти та порушенням нітрифікаційних процесів унаслідок пірогенного впливу. Водночас внесення ВК призвело до різкого підвищення вмісту нітратів – від 433,5 мг/кг на початку до 516,4 мг/кг на завершення експерименту, що вказує на ефективність комплексу як відновлювального засобу для підвищення біологічної активності та відновлення азотного циклу.

Таким чином, результати досліджень свідчать, що застосування відновлювального комплексу є потужним фактором активізації процесів нітрифікації та сприяє стабілізації азотного режиму ґрунтів у різних екологічних умовах. Особливо виражений ефект спостерігався у варіантах із техногенним забрудненням і післяпожежними ґрунтами, де природний вміст нітратного азоту залишався на мінімальному рівні.

3.6 Потенційна нітрифікаційна здатність ґрунту

Потенційна нітрифікаційна здатність є важливим показником функціональної активності нітрифікаторів і відображає здатність ґрунтової мікробіоти трансформувати амонійний азот у нітратний [14].

Визначання потенційної нітрифікації в ґрунтах. ДСТУ ISO 14238:2003 Якість ґрунту. Біологічні методи. Визначання мінералізації азоту і нітрифікації в ґрунтах та впливу хімічних речовин на ці процеси [44].

Таблиця 3.7

Потенційна нітрифікаційна здатність ґрунту

Варіант	N-NO ₃ , мг/кг ґрунту	
	14-а доба	28-а доба
1. Контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	33,0±0,48	31,1±0,67
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	18,2±1,51	13,5±1,92
3. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного	9,8±3,64	520,0±2,11

влучання		
4. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання + ВК	1,4±1,02	5,2±1,02
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	28,6±0,79	29,2±0,66
6. Контроль 2 + ВК	19,5±6,35	37,5±6,21
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	0,7±0,17	-1,4±0,32
8. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК	64,1±15,91	82,9±16,3

У контрольному ґрунті поблизу зони ракетного влучання вміст нітратного азоту залишався відносно стабільним: 33,0 мг/кг на 14-ту добу та 31,1 мг/кг на 28-му добу. При внесенні відновлювального комплексу (ВК) спостерігалось зниження рівня N-NO₃ з 18,2 до 13,5 мг/кг, що свідчить про зменшення потенційної нітрифікаційної активності й можливу іммобілізацію азоту мікробними консорціумами.

У ґрунтах, забруднених пестицидами та вибуховими речовинами, виявлено різко контрастні зміни: від низького рівня потенційної нітрифікаційної здатності (9,8 мг/кг на 14-ту добу) до надзвичайно високого значення 520,0 мг/кг на 28-му добу. Це свідчить про затриманий, але потужний спалах нітрифікаційної активності після адаптації мікробних угруповань до токсичного навантаження. За умов внесення ВК цей показник залишався на дуже низькому рівні (1,4–5,2 мг/кг), що вказує на зміну напрямів трансформації азоту у ґрунті.

У контрольних лісових угіддях (без впливу пожеж) рівень потенційної нітрифікаційної здатності становив 28,6–29,2 мг/кг і залишався стабільним упродовж дослідження. При застосуванні ВК відзначено збільшення показника з 19,5 до 37,5 мг/кг, що свідчить про стимулювання мікробної активності.

У лісових ґрунтах після пожеж зафіксовано майже повну відсутність нітрифікаційної здатності: від 0,7 мг/кг на 14-ту добу до від'ємних значень (-1,4 мг/кг) на 28-му добу. Це може бути наслідком глибокої деградації мікробних угруповань та втрат азоту у газоподібних формах. Водночас внесення ВК призвело до значного зростання показника – від 64,1 до 82,9 мг/кг, що підтверджує його ефективність як біоактиватора процесів нітрифікації у стресових умовах.

Отримані дані демонструють, що потенційна нітрифікаційна здатність може слугувати чутливим індикатором оцінки екологічного стану ґрунтів, а застосування відновлювальних комплексів сприяє нормалізації азотного режиму навіть у ґрунтах із вираженим техногенним та пірогенним навантаженням.

3.7 Визначення токсичності ґрунту

Відома роль ґрунтової азотфіксуючої бактерій роду *Azotobacter* як індикатора стану ґрунту, що базується на чутливості мікроорганізму до зміни умов за наявності різних чинників, зокрема токсинів. Облік грудочок ґрунту, навколо яких утворився буро-коричневий пігмент, який притаманний виду *Azotobacter chroococcum*, дозволяє оцінити зразки на їх токсичність. Аналіз продемонстрував, що чорнозем південний селітебної території, який не зазнав прямого впливу від воєнних дій, мав токсичність 9,0 % (табл. 3.8).

Таблиця 3.8

Токсичність зразків ґрунту за використання методу обростання грудочок азотобактером

Варіант	Наявність азотобактера, %	Токсичність, %
1. Контроль 1 – фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	91	9
2. Контроль 1 + відновлювальний комплекс (ВК)	61	39
3. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	0	100
4. Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	0	100

вими речовинами після ракетного влучання + ВК		
5. Контроль 2 - лісові угіддя (фон – за відсутності впливу пожеж)	0	100
6. Контроль 2 + ВК	0	100
7. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу	0	100
8. Лісові угіддя після пожеж внаслідок збройного впливу + ВК	0	100

Внесення відновлювального комплексу у фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання сприяло зростанню його токсичності у 4,3 рази. Поясненням таких змін може бути наявність конкуренції, у зв'язку з внесенням у середовище достатньої кількості активних мікроорганізмів та їх метаболітів, як у складі мікробіологічного препарату Ультрачист, так і органічного добрива «Паросток».

У ґрунті лісових угідь, як і у пошкоджених та забруднених ґрунтах, росту азотобактера на безазотному агаризованому середовищі не виявлено, тож токсичність була максимальною і склала 100 %. При застосуванні ВК токсичність залишалась на максимальному рівні.

Таким чином, використання азотобактера у ролі біоіндикатора токсичності ґрунтів свідчить про максимально високу токсичність досліджуваних зразків, що зазнали мілітарного впливу, яка не змінюється при застосуванні відновлювального комплексу.

ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час виконання науково-дослідної роботи особлива увага приділяється питанням охорони праці, оскільки дослідження проводяться з використанням ґрунтових зразків, які можуть містити потенційно небезпечні речовини - залишки паливно-мастильних матеріалів, важкі метали, токсиканти та продукти вибухових реакцій. Дотримання вимог безпеки є обов'язковою умовою для запобігання травматизму, отруєння або біологічного зараження працівників .

5.1. Загальні вимоги безпеки

До виконання робіт допускаються лише особи, які пройшли вступний інструктаж з охорони праці, пожежної безпеки та техніки безпеки під час роботи з біологічними матеріалами і хімічними реагентами . Перед початком досліджень необхідно перевірити справність лабораторного обладнання, наявність засобів індивідуального захисту (халат, рукавички, маска, захисні окуляри) та аптечки першої допомоги. Робоче місце має бути чистим, освітленим і забезпеченим вентиляцією. Заборонено зберігати на робочих столах сторонні предмети та харчові продукти [51] .

5.2. Вимоги безпеки під час лабораторних робіт

Лабораторні дослідження, пов'язані з визначенням мікробної біомаси, дихання ґрунту, мінералізації азоту та нітрифікації, проводяться з використанням хімічних реагентів (K_2SO_4 , H_2SO_4 , $NaOH$ тощо), тому необхідно дотримуватися правил хімічної безпеки.

Усі роботи виконуються у витяжній шафі або при наявності ефективної вентиляції. Працівники повинні користуватись індивідуальними засобами захисту - лабораторним халатом, рукавичками, захисними окулярами та, за

необхідності, респіратором. Забороняється приймати їжу, пити воду чи палити у лабораторних приміщеннях.

Під час приготування розчинів необхідно дотримуватись правил змішування речовин: кислоти додаються до води, а не навпаки. У разі потраплення реагенту на шкіру або слизові оболонки потрібно негайно промити уражене місце великою кількістю води та звернутися до медичного працівника.

Хімічні реактиви зберігаються у відповідно маркованих ємностях у спеціально відведених шафах. Відходи реактивів, особливо ті, що містять хромати чи нітрати, збирають у герметичні контейнери і передають на утилізацію відповідно до вимог чинних нормативів [53].

5.3. Безпека при роботі з біологічними матеріалами

У лабораторії роботи з ґрунтовими зразками проводяться в умовах біологічної безпеки другого рівня (BSL-2). Дослідник повинен уникати прямого контакту з ґрунтом, суспензіями або культуральними розчинами. Під час мікробіологічного аналізу використовують стерильні інструменти, дезінфікуючі засоби, одноразові піпетки, пробірки та перчатки. Усі маніпуляції, що можуть спричинити утворення аерозолів, проводяться у ламінарній шафі. Після завершення досліджень робочі поверхні обробляють 70% розчином етанолу або іншим дезінфектором, а відходи знезаражують автоклавуванням або хімічними засобами перед утилізацією [51; 54].

5.4. Пожежна безпека

Лабораторія має бути обладнана первинними засобами пожежогасіння - вогнегасниками, кошмою, піском і доступом до води. Кожен працівник повинен знати місце розташування засобів пожежогасіння та вміти ними користуватися.

Забороняється:

- користуватись несправними електроприладами або залишати їх без нагляду;
- перевантажувати електричну мережу;
- зберігати легкозаймисті речовини біля джерел тепла.

У разі пожежі необхідно негайно відключити електропостачання, повідомити керівника робіт, вивести людей у безпечне місце та викликати пожежну службу [55].

5.5. Надання першої допомоги

У разі потрапляння ґрунтових суспензій або хімічних речовин на шкіру чи слизові оболонки уражену ділянку необхідно негайно промити великою кількістю води. При порізах або опіках — обробити антисептиком та накласти стерильну пов'язку. У випадку підозри на отруєння або контакт із токсичними сполуками потрібно звернутися за медичною допомогою та повідомити керівника робіт. Аптечка має містити засоби для обробки ран, перев'язувальні матеріали, активоване вугілля, антисептики та джерело питної води. [48;49]

5.6 Санітарно-гігієнічні вимоги

Усі роботи з ґрунтовими зразками повинні проводитись у чистих умовах із дотриманням правил особистої гігієни. Після завершення дослідів руки та обличчя слід мити теплою водою з милом, а робочі поверхні обробляти дезінфікуючими засобами. Приміщення лабораторії необхідно регулярно провітрювати, підтримуючи температуру +18...+22 °С та відносну вологість 40–60 % [51]

5.7 Надання першої допомоги

Кожен працівник повинен знати основні правила надання першої допомоги при травмах, опіках, отруєннях, ураженні електричним струмом. Аптечка першої допомоги повинна містити антисептики (перекис водню, йод,

хлоргексидин), бинти, лейкопластир, знеболювальні засоби, протиопікові мазі та стерильні серветки.

У разі травмування, хімічних опіків або ознак отруєння потрібно негайно припинити роботу, повідомити керівника дослідження і звернутися за медичною допомогою [48].

5.8 Екологічна безпека досліджень

Оскільки робота пов'язана із забрудненими територіями, необхідно забезпечити мінімальний вплив досліджень на довкілля. Всі зразки після аналізу утилізуються відповідно до екологічних норм. Залишки реагентів не зливають у каналізацію. При роботі з ґрунтами, що потенційно містять вибухові або токсичні домішки, обов'язковим є дотримання санітарних обмежень і робота лише в межах дозволених зон [54].

Дотримання вимог охорони праці, техніки безпеки, пожежної та екологічної безпеки є необхідною умовою виконання наукових досліджень. Це забезпечує не лише збереження життя і здоров'я дослідників, але й достовірність експериментальних результатів, а також мінімізацію негативного впливу дослідницької діяльності на довкілля

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської роботи на тему «Біологічна активність чорнозему південного за мілітарного впливу» було проведено комплексне дослідження мікробіологічного стану ґрунтів селітебних територій та лісових угідь Миколаївської області за впливу воєнних дій. На основі отриманих даних можна зробити такі висновки:

1. Доведено, що воєнні дії мають виражений деструктивний вплив на біологічну активність і мікробну біомасу ґрунтів. У чорноземі південному, забрудненому пестицидами та вибуховими речовинами, вміст мікробної біомаси зменшився у 3,8 рази, а у слабогумусованих піщаних ґрунтах лісових угідь після пожеж - у 4,5 рази відносно контрольних ділянок. Це свідчить про пригнічення активності основних трофічних груп мікроорганізмів, особливо тих, що беруть участь у процесах гуміфікації та трансформації органічного вуглецю.
2. Застосування відновлювального комплексу, що включав органічне добриво «Паросток» та біопрепарат «Ультрачист», сприяло істотному покращенню стану ґрунтової мікробіоти. У варіантах із використанням комплексу відмічено зростання мікробної біомаси в 1,8–24 рази порівняно з контролем. Найвищий ефект зафіксовано у ґрунтах лісових угідь, які зазнали пірогенного впливу, де біомаса збільшилася у 24 рази. Отримані результати підтверджують, що поєднане застосування цих препаратів можна вважати ефективною біотехнологічною стратегією ремедіації деградованих і забруднених воєнними діями ґрунтів, що забезпечує відновлення їхньої родючості та екологічної стійкості.
3. Відбулись істотні зміни у структурі й чисельності мікробних угруповань ґрунтів, зокрема різке зниження популяцій основних еколого-трофічних і таксономічних груп мікроорганізмів. Зменшення чисельності мікроорганізмів у 5-10 разів порівняно з фоновими умовами вказує на деградацію біоценотичних зв'язків і пригнічення біохімічних проце-

сів у ґрунті. Застосування відновлювального комплексу позитивно впливало на всі досліджені групи мікроорганізмів. Чисельність мікроорганізмів зростала у десятки разів порівняно із забрудненими варіантами, що свідчить про високу ефективність комплексу у стимулюванні мікробіологічної активності. Найбільш виражений ефект зафіксовано для азотфіксувальних бактерій і актинобактерій, кількість яких після внесення комплексу зросла відповідно у 44 та 6,6 рази.

4. Отримані результати свідчать, що військове забруднення чорнозему піщаного пестицидами та вибуховими речовинами призводить до глибоких змін у карбоновому циклі ґрунту. Зростання швидкості базального дихання у 3,2 рази відносно контролю вказує на порушення рівноваги між процесами мінералізації та гумусоутворення, що зумовлює втрати органічного вуглецю й деградацію ґрунтової структури. Застосування відновлювального комплексу сприяло нормалізації дихальної активності мікроорганізмів.
5. За мілітарного впливу, амонійний азот зріс більш ніж у 3-5 разів відносно контролю, що свідчить про пригнічення нітрифікаційної активності мікробіоти та порушення процесів мінералізації. Застосування відновлювального комплексу сприяло поступовому зниженню надлишкових концентрацій амонійного азоту до рівня, близького до природного фону. На 28-му добу дослідження вміст $N-NH_4$ у забрудненому чорноземі зменшився у 7,3 рази, а в лісових ґрунтах - у 5-6 разів порівняно з вихідними значеннями.
6. Дослідження показали, що забруднення ґрунтів унаслідок воєнних дій порушує природний нітрифікаційний цикл і знижує вміст нітратного азоту. Внесення відновлювального комплексу істотно активізувало процеси нітрифікації, забезпечуючи поступове зростання та стабільно високі рівні нітратного азоту (понад 500 мг/кг) навіть у техногенно порушених зразках. Аналогічна позитивна тенденція спостерігалась і в ґрунтах лісових угідь, де після застосування комплексу відбулося істо-

тне підвищення вмісту N-NO₃, що свідчить про відновлення мікробної активності та покращення азотного балансу.

7. Потенційна нітрифікаційна здатність виявилася чутливим показником змін. У чорноземі південному після ракетного влучання зафіксовано різке коливання активності. Внесення відновлювального комплексу стабілізувало азотний обмін і суттєво підвищило нітрифікаційну здатність.
8. Результати показали, що використання азотобактера як біоіндикатора дозволяє точно оцінити токсичність ґрунтів, уражених воєнними діями. У забруднених і післяпожежних зразках спостерігалася максимальна токсичність, що свідчить про глибоке порушення мікробіологічної рівноваги.

Мілітарний вплив спричиняє суттєву деградацію ґрунтової мікробної біоти та порушення трофічної рівноваги у ґрунтових екосистемах. Для відновлення біологічної активності та родючості таких ґрунтів доцільно застосовувати органо-біологічні добрива, мікробні біопрепарати та заходи екологічної рекультивациї, спрямовані на відновлення гумусного стану та мікробної рівноваги.

Список використаної літератури

1. Гоцій Н. Д., Кендзьора Н. З. Воєнний екоцид та вплив російської військової агресії на довкілля. Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях. Дніпро : ДДАЕУ, 2022. С. 171–175.
2. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N., Hryhorczuk A., Erickson T. B. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. Vol. 19, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>
3. Russian–Ukrainian war impacts on the environment: Evidence from soil properties and remote sensing. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 906. P. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122>
4. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, № 10. P. 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>
5. Bargali S. S. Soil microbial biomass: a crucial indicator of soil health. *Current Agriculture Research Journal*. 2024. Vol. 12, № 1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.12944/CARJ.12.1.01>
6. Flores F. J., Li W., Zhang H., Chen Y. Microbial community composition of explosive-contaminated sites. *Microorganisms*. 2025. Vol. 13, № 1. P. 205. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010205>
7. Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2024. Vol. 33, № 3. P. 127–139.
8. Zhukova N., Kovalenko O. Microbial biomass as an indicator of soil degradation under anthropogenic impact. *Environmental Research and Technology Journal*. 2022. Vol. 9, № 2. P. 56–63.

9. Шерстобоева О. В., Колісник Т. П. Зміни мікробіологічної активності ґрунтів під впливом техногенного навантаження. *Ґрунтознавство і агрохімія*. 2021. Т. 92, № 1. С. 63–70.
10. Волкогон В. В. Роль мікроорганізмів у первинних процесах формування родючості ґрунтів. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2024. Вип. 39. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.39.3-21>
11. Курдиш І. О. Роль мікроорганізмів у відтворенні родючості ґрунтів. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2008. № 7. С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.9.7-32>
12. Barrios E. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*. 2007. Vol. 64. P. 269–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
13. Резнік С. В. Вплив різних систем землеробства на еколого-трофічні угруповання мікроорганізмів чорноземів типових. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2019. Т. 30. С. 15–24.
14. Білявська Л. Г., Орел Л. А. Біологічна активність ґрунтів південного степу України за різних систем землеробства. *Вісник аграрної науки Південного регіону*. 2020. № 2(66). С. 45–52.
15. Дегтярьов В. В., Крохін С. В., Дегтярьов Ю. В., Гавва Д. В. Охорона ґрунтів : навч. посіб. / за ред. д-ра с.-г. н., проф. В. В. Дегтярьова. Харків, 2023. 276 с.
16. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*. 2005. Vol. 143, № 1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
17. Peddle S. D., Hodgson R. J., Borrett R. J. et al. Practical applications of soil microbiota to improve ecosystem restoration: current knowledge and future directions. *Biological Reviews*. 2024. Vol. 100. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1111/brv.13124>

18. Цицюра Я. Г., Неїлик М. М., Дідур І. М., Поліщук М. І. Сидерація як базова складова біологізації сучасних систем землеробства. – Вінниця : Вінницький національний аграрний університет, 2022. 772 с.
19. Ходаківська О. В., Корчинська С. Г., Матвієнко А. П. Еколого-економічні аспекти відтворення родючості ґрунтів. *Землеробство*. 2017. Вип. 1. С. 16–21. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemlerobstvo_2017_1_5
20. Дудар І., Шувар І., Огородник Н., Корпіта Г., Павкович С., Дудар Я. Вплив способу обробітку ґрунту на мікрофлору агроценозу конюшини лучної. *Агрономія*. 2023. № 27. С. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.31734/agronomy2023.27.068>
21. Чайка В. М., Рубежняк І. Г., Міняйло А. А. *Екологія міських екосистем (урбоекологія)*. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2017. С. 180–265.
22. Бобрик Н. Ю., Кривцова М. В., Ніколайчук В. І., Волощук І. Реакція мікробіоти ґрунту на дію важких металів у зоні впливу залізничної лінії Чоп – Ужгород. *Екологічний вісник України*. 2016. Вип. 24. С. 151–156. DOI: <https://doi.org/10.15421/011618>
23. Muñoz-Rojas M., Erickson T. E., Merritt D. J. Soil microbial restoration after disturbances: current progress and future challenges. *Plant and Soil*. 2018. Vol. 433(1–2). P. 1–25.
24. Trivedi P. et al. Soil biological processes are key to ecosystem recovery after disturbance. *Nature Ecology & Evolution*. – 2020. – Vol. 4. – P. 110–117.
25. Голубцов О., Сорокіна Л., Сплодитель А., Чумаченко С. *Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу*. Київ : ГО «Центр екологічних ініціатив –Екодія’», 2023. 154 с.
26. Longepierre M., Widmer F., Keller T., Weisskopf P., Colombi T., Six J., Hartmann M. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management.

- Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 19728. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00046-8>
- 27.Балюк С. А., Кучер А. В., Солоха М. О., Соловей В. Б., Смірнова К. Б., Момот Г. Ф., Левін А. Я. *Вплив збройної агресії та воєнних дій на сучасний стан ґрунтового покриву, оцінка шкоди та збитків, заходи з відродження*. Харків : Бровін О. В., 2022. 102 с.
- 28.Xie Y., Fan J., Zhu W., Lou Y., Chen L., Fu J. Effect of Heavy Metals Pollution on Soil Microbial Diversity and Bermudagrass Genetic Variation. *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. Article 755. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00755>
- 29.Пліско І., Романчук К., Крилач С. Механічна та фізична деградація орних ґрунтів внаслідок ведення воєнних дій в Україні. *Вісник аграрної науки*. 2023. Т. 101, № 10. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202310>
- 30.Zhen Z., Wang S., Luo S., Ren L., Liang Y., Yang R., Li Y., Zhang Y., Deng S., Zou L., Lin Z., Zhang D. Significant Impacts of Both Total Amount and Availability of Heavy Metals on the Functions and Assembly of Soil Microbial Communities in Different Land Use Patterns. *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 10. Article 2293. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02293>
- 31.*Техногенне руйнування ґрунтового покриву та антропогенні забруднення ґрунтів*. С. 10.
DOI: <https://studfile.net/preview/6272749/page:10/>
- 32.Effect of Probiotic Treatment on the Microbiological Activity of Ukrainian Typical Black Soil. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2024. Vol. 14, № 1. P. 5. DOI: <https://doi.org/10.55251/jmbfs.10263>
- 33.*Фітомеліорація* // Агроосвітня платформа України. 2023. DOI: <https://aoplatforma.com/reference/agrodictionary/page/fitomelioraciya>

34. Medvedeff C. A., Inglett K. S., Kobziar L. N., Inglett P. W. Impacts of Fire on Microbial Carbon Cycling in Subtropical Wetlands. *Fire Ecology*. 2013. Vol. 9, № 1. P. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.4996/fireecology.0901021>
35. Волкогон В. В. Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2024. Вип. 39. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.39.3-21>
36. *Соціально-економічний паспорт міста* / Офіційний сайт Снігурівська міська територіальна громада. 20.11.2021. DOI: <https://snigurivska-gromada.gov.ua/socialnoekonomichnij-pasport-mista-20-17-11-31-01-2021/>
37. *Бої за Снігурівку* // Вікіпедія : вільна енциклопедія. DOI: https://uk.wikipedia.org/wiki/Бої_за_Снігурівку
38. Скоробогатов В. М., Сплодитель А. О., Мойсієнко І. І., Василюк О. В., Романенко М. М., Редінов К. О., Костюшин В. А., Пархоменко В. В., Гуштан Г. Г., Русін М. Ю., Марущак О. Ю., Некрасова О. Д., Сон М. О., Артамонов В. А., Легкий С. В., Єрофєєва М. О., Лаврінєнко К. В. *Поствоєнний розвиток природно-заповідного фонду Миколаївщини*. – Київ : ГО «Українська природоохоронна група», 2023. 85 с. URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/pzf-mykola_2023_compressed.pdf
39. *Був фактично спалений Галицинівське урочище на Миколаївщині: —.. очищують від вибухонебезпечних предметів* / Суспільне Миколаїв. 2025. URL: <https://suspilne.media/mykolaiv/870219-buv-fakticno-spalenij-galycinivske-urocise-na-mikolaivsini-ocisuut-vid-vibuhonebezpecnih-predmetiv/>
40. Демиденко О. В. Кореляційні зв'язки фізіологічних груп мікроорганізмів з показниками родючості чорнозему опідзоленого за різних систем удобрення. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 4(817). С. 20–27.
41. Галкін М. Б., Страшнова І. В., Андрющенко А. В. Використання мікроорганізмів у біоремедіації ґрунтів. *Мікробіологія і біотехнологія*. 2024. № 2. С. 28–55.

42. ДСТУ ISO 14240-2:2003. *Якість ґрунту. Визначення ґрунтової мікробної біомаси. Частина 2: Фумігаційно-екстракційний метод*. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 8 с.
43. ДСТУ ISO 16072:2005. *Якість ґрунту. Лабораторні методи визначення мікробного дихання ґрунту*. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 19 с.
44. ДСТУ ISO 14238:2003. *Якість ґрунту. Біологічні методи. Визначання мінералізації азоту і нітрифікації в ґрунтах та впливу хімічних речовин на ці процеси*; ДСТУ 4729:2007. *Якість ґрунту. Визначення нітратного і амонійного азоту в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського*. Київ : Держспоживстандарт України, 2007.
45. Андреюк К. І., Іутинська Г. О., Антипчук А. Ф. та ін. *Функціонування мікробних угруповань ґрунту в умовах антропогенного навантаження*. Київ : Обереги, 2001. 239 с.
46. Волкогон В. В., Надкернична О. В., Токмакова Л. М. та ін. *Експериментальна ґрунтова мікробіологія : монографія*. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.
47. ДСТУ ISO 16072:2005. *Якість ґрунту. Лабораторні методи визначення мікробного дихання ґрунту*. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 19 с.
48. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ.
49. ДСТУ ISO 45001:2019. *Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці*. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 64 с.
50. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. *Test No. 217: Soil Microorganisms: Carbon Transformation Test*. Paris : Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2000. 16 p.
51. ДСанПіН 3.3.2.007-98. *Державні санітарні правила і норми утримання лабораторій мікробіологічного профілю*. Київ, 1998. 46 с.
52. Звягинцев Д. Г. (ред.). *Методы почвенной микробиологии и биохимии : учеб. пособие*. Москва : Изд-во МГУ, 1991. 304 с.

53. ДСТУ 3321-96. *Безпечність праці. Робота з хімічними речовинами*. Київ : Держстандарт України, 1996. 23 с.
54. ДСП 9.9.5.080-2002. *Безпека роботи з мікроорганізмами I–II груп патогенності*. Київ, 2002. 58 с.
55. НАПБ А.01.001-2014. *Правила пожежної безпеки в Україні*. Київ : МВС України, 2014. 134 с.
56. *Українська лабораторія якості і безпеки продукції АПК*. URL: <http://quality.ua/>
57. FAO. *Soil Pollution: A Hidden Reality*. Rome : FAO, 2018. 142 p.
58. Токмакова Л. М., Шевченко Л. А. Антагоністична активність целюлозолітичних бактерій-деструкторів органічної речовини щодо фітопатогенних мікроміцетів. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 6(843). С. 18–24.
59. Rebai H., Sholkamy E. N., Abdelhamid M. A. A., Thanka P. P., Hassan A. A., Pack S. P., Ki M. R., Boudemagh A. Soil Actinobacteria Exhibit Metabolic Capabilities for Degrading the Toxic and Persistent Herbicide Metribuzin. *Toxics*. 2024. Vol. 12(10), 709. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12100709>
60. Jiang S., Qu H., Cheng Z., Fu X., Yang L., Zhou J. Actinobacteria Emerge as Novel Dominant Soil Bacterial Taxa in Long-Term Post-Fire Recovery of Taiga Forests. *Microorganisms*. 2025. Vol. 13(6), 1262. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13061262>
61. *Uniflor*. *Продукція компанії «Уніфлор»*. URL: <http://www.uniflor.com.ua/products>
62. *Crop Agro*. *Ультрархист — універсальний препарат на основі штамів мікроорганізмів Pseudomonas aureofaciens, Bacillus subtilis, Dietzia maris*. URL: <https://cropagro.com.ua/uk/ultrachyst>
63. Резнік С. В. Вплив різних систем землеробства на еколого-трофічні угруповання мікроорганізмів чорноземів типових в умовах лівобережного лісостепу України. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2021. Вип. 33. С. 62–71.

