

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології**

**ПОГОДЖЕНО**  
**Декан факультету**  
захисту рослин, біотехнологій та  
екології

\_\_\_\_\_ Коломієць Ю.В.  
(підпис) (ПІБ)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
**Завідувач кафедри**  
загальної екології, радіобіології та  
безпеки життєдіяльності

\_\_\_\_\_ Клепко А.В.  
(підпис) (ПІБ)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему «Оцінка впливу воєнних дій на агрофізичні властивості ґрунту та його значення для екологічних умов життя мікробіоти»**

Спеціальність 101 Екологія  
(код і назва)

Освітня програма Екологічний контроль та аудит  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент \_\_\_\_\_ Ладика М.М.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

кандидат біологічних наук, доцент \_\_\_\_\_ Ілленко В.В.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

**Виконала**

\_\_\_\_\_ Дуридівка М.В.  
(підпис) (ПІБ)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**  
загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності

доктор біологічних наук, проф. Клепко А.В.  
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)  
“ ” 20 року

**З А В Д А Н Н Я**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Дуридівці Мар'яні Вікторівні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 101 Екологія  
(код і назва)

Освітня програма Екологічний контроль та аудит  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Оцінка впливу воєнних дій на агрофізичні властивості ґрунту та його значення для екологічних умов життя мікробіоти» затверджена наказом ректора НУБіП України від “06” листопада 2024 р. № 1984 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.11.15  
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи опрацювання літератури, проведення відбору зразків ґрунту для мікробіологічного аналізу, обробка та обговорення отриманих результатів.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Ознайомитися з літературними джерелами з теми дослідження.
2. Відібрати зразки ґрунту на мілітарно порушених територіях і непорушених для порівняння.
3. Підготувати зразки та передати на аналіз у мікробіологічну лабораторію.
4. Провести аналіз отриманих результатів агрохімічного аналізу та мікробіологічного та сформулювати висновки.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) \_\_\_\_\_

Дата видачі завдання “ 23 ” листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи Ілленко В.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняла до виконання Дуридівка М.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

## РЕФЕРАТ

Випускна магістерська робота на тему «Оцінка впливу воєнних дій на агрофізичні властивості ґрунту та його значення для екологічних умов життя мікробіоти» викладена на 57 сторінках машинописного тексту, містить 7 таблиць, 5 рисунків. Список використаних джерел нараховує 40 літературних посилань з них 5 інтернет-джерел.

**Актуальність роботи:** Військові дії на території України спричиняють значні зміни у довкіллі, серед яких одним із найбільш вразливих компонентів є ґрунт. Вибухи, важка техніка та забруднення від військових об'єктів погіршують агрофізичні властивості ґрунту, знижуючи його родючість та життєздатність мікробіоти. Мікробіота відіграє ключову роль у біогеохімічних процесах, які впливають на якість ґрунту, його відновлювальні здатності та стійкість агроecosystem. Вивчення наслідків військових дій на фізико-хімічні характеристики ґрунту та їхній вплив на екологічні умови для мікроорганізмів є критично важливим для забезпечення продовольчої безпеки та відновлення екосистем після війни. Тема роботи є актуальною з огляду на необхідність оцінки масштабів впливу воєнних дій на ґрунтові ресурси та розробки стратегій для їх відновлення.

**Метою** роботи було дослідити мікробіоценоз і агрохімічні властивості ґрунту на мілітарно деградованих територіях та порівняти його з непорушеними ділянками.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні **завдання**:

1. Ознайомитися з літературними джерелами з теми дослідження.
2. Відібрати зразки ґрунту на мілітарно порушених територіях і непорушених для порівняння.
3. Підготувати зразки та передати на аналіз у мікробіологічну лабораторію.

4. Провести аналіз отриманих результатів агрохімічного аналізу та мікробіологічного та сформувані висновки.

**Предмет дослідження:** агрохімічні показники ґрунту, кількість ґрунтових мікроорганізмів різних функціональних груп.

**Об'єкт дослідження:** сільськогосподарські угіддя, порушені внаслідок активних бойових дій.

Агрохімічний аналіз ґрунтів на ділянках, порушених вибухами біля Димера, Топчіївки та Мощуна, показує значне виснаження органічної речовини та азотного живлення. При цьому непорушені ділянки зберігають стабільні показники родючості, що підкреслює негативний вплив вибухів на агрохімічні показники ґрунту. Вивчення ґрунтової мікрофлори дозволило встановити, що у вирвах зафіксовано знижену чисельність мікроорганізмів через термічний та стерилізаційний ефект. Винятково висока активність мікробіоти в Раківці може бути спричинена надходженням органічних техногенних сполук. Мікробіологічні коефіцієнти свідчать про переважання мінералізаційних процесів та втрату органічного вуглецю, тоді як підвищена оліготрофність деяких локацій відображає дефіцит доступних поживних речовин. У цілому дані підтверджують суттєву деградацію ґрунтів, спричинену вибуховим навантаженням, та порушення їхнього поживного й мікробіологічного балансу.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ґрунтові мікроорганізми, агрохімічні властивості ґрунту, мілітарно порушені сільськогосподарські угіддя

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ВОЄННИХ ДІЙ НА ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТУ ТА СТАН ЙОГО МІКРОБІОТИ .....	8
1.1. Ґрунтова мікробіота та її склад. Особливості функціонування різних еколого-функціональних груп ґрунтових мікроорганізмів .....	8
1.2. Теоретичні аспекти впливу механічних і хімічних пошкоджень на ґрунт .	12
1.3. Зміни агрофізичних властивостей (ущільнення, структура, водний режим) ґрунтів у зоні бойових дій .....	21
РОЗДІЛ 2. ПРЕДМЕТ, ОБ’ЄКТ, МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ....	27
2.1. Умови та місце проведення дослідження, відбір проб ґрунту .....	27
2.2. Методи визначення агрохімічних параметрів ґрунту .....	27
2.3. Визначення чисельності бактерій основних фізіологічних груп методом висіву на селективні середовища .....	29
2.4. Визначення коефіцієнтів спрямованості мікробіологічних процесів .....	30
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ .....	35
3.1. Результати агрохімічного аналізу ґрунту .....	35
3.2. Результати визначення чисельності бактерій основних фізіологічних груп методом висіву на селективні середовища.....	44
3.3. Спрямованість мікробіологічних процесів у проба ґрунту на непорушених і мілітарно деградованих землях .....	48
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52

## ВСТУП

Воєнні дії на території України з 2022 року спричинили масштабні порушення природних екосистем, серед яких найбільш вразливою складовою є ґрунтовий покрив. Вибухи боєприпасів, пожежі, переміщення важкої техніки, облаштування фортифікаційних споруд та інші форми військового впливу призводять до інтенсивної деградації ґрунтів, змінюючи їхню структуру, щільність, водно-фізичні характеристики та температурний режим. Такі зміни мають не лише безпосередній екологічний ефект, але й зумовлюють довготривалі наслідки, що впливають на родючість, відновлення рослинного покриву та біологічну продуктивність постраждалих територій.

Особливо чутливою до порушень є ґрунтова мікробіота – сукупність мікроорганізмів, які забезпечують кругообіг елементів, розклад органічної речовини, формування гумусу та стійкість екосистем до зовнішніх стресів. Будь-які зміни агрофізичних параметрів ґрунту, зокрема ущільнення, руйнування агрегатної структури, порушення аераційного та водного режимів, безпосередньо впливають на умови існування мікробних угруповань. У зонах вибухів, де спостерігається термічний вплив високої інтенсивності, механічне переміщення ґрунтових мас та часткова стерилізація поверхневих горизонтів, мікробіота зазнає глибоких якісних і кількісних трансформацій.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексної оцінки того, як воєнні чинники трансформують властивості ґрунтів і як ці зміни позначаються на мікробіологічних процесах, що визначають екологічний стан та відновлювальний потенціал деградованих територій. Отримані дані є важливими для розроблення заходів післявоєнної відновлювальної політики, оцінки придатності земель до подальшого використання, а також для прогнозування довгострокових екологічних ризиків.

Метою роботи було дослідити мікробоценоз і агрохімічні властивості ґрунту на мілітарно деградованих територіях та порівняти його з непорушеними ділянками.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

1. Ознайомитися з літературними джерелами з теми дослідження.
2. Відібрати зразки ґрунту на мілітарно порушених територіях і непорушених для порівняння.
3. Підготувати зразки та передати на аналіз у мікробіологічну лабораторію.
4. Провести аналіз отриманих результатів агрохімічного аналізу та мікробіологічного та сформулювати висновки.

Предмет дослідження: агрохімічні показники ґрунту, кількість ґрунтових мікроорганізмів різних функціональних груп.

Об'єкт дослідження: сільськогосподарські угіддя, порушені внаслідок активних бойових дій.

Недостатність наявних наукових робіт, присвячених комплексному дослідженню агрофізичних і мікробіологічних змін саме у мілітарно порушених ґрунтах України, підкреслює необхідність проведення даної роботи. Наукове опрацювання цих питань сприятиме формуванню сучасної доказової бази щодо механізмів деградації та можливостей відновлення ґрунтів після впливу воєнних дій.

Магістерська робота спрямована на встановлення закономірностей змін агрофізичних властивостей ґрунту під дією вибухових і механічних факторів та визначення їхнього значення для екологічних умов життя ґрунтової мікробіоти. Отримані результати матимуть як наукове, так і прикладне значення, оскільки дадуть змогу уточнити індикатори стану ґрунтів, оцінити ступінь їх деградації й окреслити напрями подальшої рекультивації.

## РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ВОЄННИХ ДІЙ НА ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТУ ТА СТАН ЙОГО МІКРОБІОТИ

### 1.1. Ґрунтова мікробіота та її склад. Особливості функціонування різних еколого-функціональних груп ґрунтових мікроорганізмів

Ґрунт є складною багатокomпонентною екосистемою, у якій мікроорганізми відіграють ключову роль у формуванні родючості, колообігу речовин та енергетичному балансі. Сукупність мікроорганізмів, що мешкають у ґрунті, утворює ґрунтову мікробіоту. Вона представлена бактеріями, актиноміцетами, грибами, водоростями, археями, найпростішими та вірусами, які взаємодіють між собою та з іншими компонентами ґрунтового середовища.

Бактерії – найчисельніша група мікроорганізмів, чисельність яких у 1 г родючого ґрунту може сягати до  $10^9$  клітин. Вони забезпечують процеси мінералізації органічних речовин, фіксації азоту, нітрифікації та денітрифікації. Найпоширеніші роди: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Clostridium* [1].

Актиноміцети – проміжна група між бактеріями та грибами, що беруть активну участь у розкладанні складних органічних сполук (целюлози, хітину, лігніну) та продукують біологічно активні речовини, зокрема антибіотики. Представники: *Streptomyces*, *Micromonospora*.

Гриби (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*) – деструктори органічних решток, які відіграють важливу роль у гуміфікації ґрунту. Завдяки потужній ферментативній системі вони здатні розкласти складні полімери навіть за низьких концентрацій азоту.

Водорості та ціанобактерії – здійснюють фотосинтез, продукуючи органічну речовину у верхньому шарі ґрунту, а також фіксують атмосферний азот, збагачуючи ґрунт біогенними елементами.

Протозої – споживають бактерії та грибні спори, регулюючи їх чисельність і запобігаючи розвитку монодомінантних популяцій. Вони беруть участь у перерозподілі азоту у формі, доступній для рослин.

Еколого-функціональні групи ґрунтових мікроорганізмів:

- сапротрофні мікроорганізми. Використовують органічні рештки як джерело енергії. Здійснюють процеси мінералізації та гуміфікації, перетворюючи органічну речовину на прості неорганічні сполуки, які засвоюються рослинами;

- азотфіксувальні мікроорганізми. Здатні засвоювати атмосферний азот ( $N_2$ ) і переводити його у форму сполук, доступних для рослин. До них належать: симбіотичні (*Rhizobium*, *Bradyrhizobium*) – утворюють бульбочки на коренях бобових рослин; вільноживучі (*Azotobacter*, *Clostridium pasteurianum*); асоціативні (*Herbaspirillum*, *Azospirillum*), що мешкають поблизу коренів злакових культур;

- нітрифікуючі та денітрифікуючі бактерії. *Nitrosomonas* і *Nitrobacter* окиснюють амоній до нітратів – процес нітрифікації. *Pseudomonas denitrificans* та *Thiobacillus denitrificans* здійснюють денітрифікацію, тобто відновлення нітратів до молекулярного азоту, що повертається в атмосферу.

- целюлолітичні та лігнінолітичні мікроорганізми. *Trichoderma*, *Cellulomonas*, *Bacillus subtilis* розкладають целюлозу, геміцелюлозу та лігнін, забезпечуючи формування гумусу та покращення структури ґрунту;

- фосфатмобілізувальні бактерії та гриби. *Bacillus megaterium*, *Aspergillus niger* переводять нерозчинні фосфати у легкодоступні для рослин форми, активізуючи фосфорний цикл у ґрунті;

- мікоризоутворювальні гриби. *Glomus*, *Suillus*, *Laccaria* формують симбіотичні зв'язки з кореневими системами рослин, покращуючи поглинання води й мінеральних речовин, зокрема фосфору та калію. Мікориза підвищує стійкість рослин до посухи й патогенів [8].

Взаємодія між ґрунтовими мікроорганізмами та рослинами є основою функціонування агроєкосистем. Ці зв'язки мають симбіотичний, коменсальний або антагоністичний характер і визначають стан ґрунтового середовища, ріст і розвиток рослин.

До найважливіших форм симбіозу належать азотфіксувальні асоціації та мікоризні зв'язки:

- бульбочкові бактерії (*Rhizobium*, *Bradyrhizobium*) утворюють симбіотичні комплекси з бобовими культурами (горох, соя, конюшина). У результаті цього симбіозу в бульбочках коренів накопичуються біологічно доступні сполуки азоту, що збагачують ґрунт;

- мікоризоутворювальні гриби (*Glomus*, *Laccaria*, *Suillus*) формують на коренях рослин спеціальні структури – мікоризу. Вона підвищує поглинальну здатність кореневої системи, забезпечує краще постачання фосфору, калію та мікроелементів, а також сприяє стійкості до патогенів і посухи.

Такі взаємовигідні зв'язки підвищують біологічну родючість ґрунту та стійкість агроєкосистем до стресових умов.

Асоціативна взаємодія – це менш тісна форма зв'язку, за якої мікроорганізми мешкають у ризосфері (зоні навколо коренів) і стимулюють ріст рослин через продукцію біологічно активних речовин. Такі мікроорганізми отримали назву PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). До них належать *Azospirillum*, *Herbaspirillum*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*. Вони продукують фітогормони (ауксини, гібереліни, цитокініни), синтезують антибіотики проти фітопатогенів і підвищують доступність поживних речовин.

У ґрунті відбуваються й антагоністичні процеси – конкуренція за субстрати, місце на коренях або вплив через антибіотичні речовини. Наприклад, *Trichoderma* та *Pseudomonas* пригнічують розвиток патогенних грибів (*Fusarium*, *Phytophthora*,

*Rhizoctonia*). Такі взаємодії сприяють біологічному контролю захворювань рослин, зменшуючи потребу у хімічних пестицидах.

Отже, мікробіота ризосфери формує динамічну систему «мікроорганізм – рослина – ґрунт», у якій біологічні процеси забезпечують сталий розвиток агроєкосистем.

Ґрунтова мікробіота є надзвичайно чутливою до змін у навколишньому середовищі. Антропогенний вплив – інтенсивне землеробство, застосування агрохімікатів, забруднення, урбанізація – може істотно змінювати кількісний та якісний склад мікроорганізмів, порушуючи біологічну рівновагу ґрунтової екосистеми.

Застосування мінеральних добрив у помірних кількостях стимулює розвиток ґрунтових мікроорганізмів, особливо тих, що беруть участь у мінералізації органічної речовини. Проте надмірне внесення азотних і фосфорних добрив призводить до зниження активності азотфіксаторів та мікоризних грибів через зміну трофічного балансу. Пестициди можуть мати токсичний вплив на мікроорганізми, пригнічуючи активність нітрифікуючих бактерій і деструкторів органічної речовини [7].

Індустріальні відходи, важкі метали, нафтопродукти та пластикові частинки негативно впливають на мікробні спільноти. Вони порушують структуру мікробних ценозів, знижують активність ферментів і зменшують загальну чисельність життєздатних клітин. Деякі мікроорганізми (*Pseudomonas putida*, *Rhodococcus erythropolis*) здатні адаптуватися до токсичних сполук і навіть використовувати їх як джерело енергії, що робить їх перспективними агентами біоремедіації забруднених ґрунтів [23].

Надмірна оранка, ущільнення ґрунту технікою, спалювання стерні та скорочення сівозмін призводять до руйнування структури ґрунту і зменшення його органічної речовини. Це негативно впливає на різноманіття мікробіоти, особливо

на аеробні бактерії та гриби, які потребують розвиненої пористості й доступу кисню [33].

Водночас застосування біопрепаратів, сидератів, компостів і мінімального обробітку ґрунту сприяє відновленню мікробного балансу та підвищенню біологічної активності.

Порушення мікробного балансу призводить до деградації ґрунту, втрати гумусу, зменшення родючості та біорізноманіття. Для збереження стійкості ґрунтових екосистем важливим є використання біологічних добрив і біопрепаратів замість синтетичних; впровадження системи сталого землеробства; рекультивація забруднених територій з використанням мікроорганізмів-деструкторів; моніторинг стану ґрунтової мікробіоти як біоіндикатора екологічного стану ґрунтів [21].

Ґрунтова мікробіота забезпечує сталість екосистеми та підтримує біогеохімічні цикли елементів (азоту, фосфору, вуглецю, сірки). Її діяльність визначає біологічну родючість ґрунту, формує його структуру, впливає на водно-повітряний режим і здатність до самоочищення. Зниження активності або різноманіття мікроорганізмів під дією антропогенних факторів – забруднення, надмірного використання пестицидів, ерозії – призводить до деградації ґрунтів і зменшення їх продуктивності [20].

Збереження активної та різноманітної мікробіоти є ключовою умовою сталого землекористування та екологічної безпеки агроландшафтів України.

## **1.2. Теоретичні аспекти впливу механічних і хімічних пошкоджень на ґрунт**

Ґрунт є складною багатофункціональною системою, яка виконує низку життєвоважливих екологічних, біохімічних та агрономічних функцій. Його стан безпосередньо залежить від фізичних, хімічних і біологічних властивостей, які в сучасних умовах зазнають значного антропогенного впливу. Серед

найпоширеніших негативних чинників виділяють механічні та хімічні пошкодження, що призводять до деградації ґрунтового покриву, втрати родючості й біологічної активності.

В умовах зростання антропогенного навантаження на довкілля знання про загальні та специфічні закономірності поширення й накопичення забруднювальних речовин у природних середовищах різних регіонів, а також про способи розв'язання екологічних проблем, набувають особливої актуальності для фахівців у сфері охорони біосфери. Зосередження людських ресурсів на обмежених територіях спричиняє інтенсивне зростання виробництва, у тому числі харчової продукції, та збільшення кількості промислових відходів, що, у свою чергу, посилює всі види деградації екосистем, насамперед їх забруднення [31].

У процесі соціально-економічного розвитку людство дедалі активніше впливає на формування структури та функціонування біосфери. Використання природних ресурсів – атмосфери, водних просторів, земель – стає все інтенсивнішим, задовольняючи господарські потреби, але водночас породжуючи низку негативних екологічних наслідків. Серед них [2]: виснаження природних ресурсів; трансформація природних ландшафтів; забруднення довкілля внаслідок розсіювання речовин під час виробничих процесів та експлуатації різних виробів; зміна клімату й порушення теплового балансу планети через надмірне споживання енергії.

Взаємозв'язок у природі підтримується постійним обміном речовини та енергії. Рівновага між протилежно спрямованими потоками є запорукою існування живих організмів. Особливо вразливим до техногенного впливу є ґрунт – центральна ланка будь-якої екосистеми [36].

Характер і рівень впливу хімічних забруднювачів на екологічний стан, окремі біогеоценози та компоненти біосфери залежать від природно-кліматичних умов певної зони, а також від стійкості окремих видів рослин і тварин. Унаслідок цього,

поряд із загальними закономірними проявами токсикоекологічних небезпек, часто виникають локальні порушення природного середовища. За останні два десятиліття значно зросла загроза хімічного забруднення ґрунтів [6].

Під забрудненням у широкому розумінні розуміють надходження до будь-якого природного середовища нових фізичних, хімічних або біологічних агентів, не властивих йому, або перевищення природних концентрацій цих речовин. Екологічну небезпеку становить не лише сама присутність сторонніх компонентів, а й їхній вплив на біогеоценоз – елементарну структурну одиницю біосфери. Потрапляння чужорідних речовин порушує усталені еволюційні механізми регуляції екологічних факторів, змінює обмінні процеси та знижує продуктивність екосистем. Отже, забруднення можна розглядати як сукупність «збоїв» у функціонуванні екологічних систем, що призводить до їх деградації [40].

Згідно з цим, забруднення класифікують за типом впливу, способом потрапляння агентів у навколишнє середовище та характером їхньої дії. Основні види забруднення:

- механічне – фізичне засмічення територій різними відходами та сміттям;
- хімічне – надходження токсичних сполук, які погіршують якість природних компонентів і негативно впливають на живі організми;
- фізичне – вплив, що змінює фізичні властивості середовища (теплові, шумові, світлові, електромагнітні тощо);
- радіаційне – перевищення природного рівня радіації внаслідок антропогенного впливу;
- біологічне – внесення в екосистеми чужорідних організмів, біогенних речовин або порушення природного балансу популяцій [35].

Серед усіх видів забруднення хімічне вважається найнебезпечнішим, оскільки його негативний вплив на живі організми проявляється навіть на

генетичному рівні, а самі забруднювальні речовини здатні поширюватися та впливати глобально. Хімічні забруднювачі поділяються на мінеральні та органічні сполуки. Вони потрапляють у навколишнє середовище з різних джерел – побутових і промислових відходів, викидів, що утворюються під час спалювання кам'яного вугілля та інших видів викопного палива, транспортних вихлопів, відходів металургійної, хімічної, харчової промисловості та сільського господарства, а також через сміття та інші антропогенні джерела [27].

Серед забруднювальних речовин виділяють як природно присутні елементи, так і чужорідні для середовища сполуки. Однак навіть природні речовини стають небезпечними для живих організмів, якщо їхній вміст перевищує регіональні фонові рівні.

Механічні пошкодження – це сукупність процесів, пов'язаних із фізичним руйнуванням структури ґрунту внаслідок господарської діяльності людини. Такі порушення проявляються у ущільненні, ерозії, руйнуванні структури, зменшенні пористості та зниженні водопроникності [25].

Основні причини механічних пошкоджень:

- надмірне механічне навантаження – багаторазова оранка, пересування важкої техніки, повторне проходження тракторів по тих самих ділянках сприяють ущільненню ґрунту;
- відсутність сівозміни та монокультура – призводять до однобічного використання поживних елементів і поступової деградації структури ґрунту;
- ерозійні процеси – водна й вітрова ерозія зменшують товщину родючого шару, порушують гранулометричний склад і знижують здатність ґрунту до самовідновлення.

Наслідками механічних пошкоджень є погіршення повітряного та водного режимів; зниження чисельності ґрунтових мікроорганізмів і мезофауни; порушення

процесів мінералізації та гуміфікації; зменшення біологічної родючості й урожайності сільськогосподарських культур [38].

Ущільнення ґрунту зменшує об'єм порового простору, що обмежує рух повітря та води, ускладнює дихання кореневих систем і розвиток мікроорганізмів. Найбільш чутливо на такі зміни реагують аеробні бактерії та гриби, активність яких знижується при нестачі кисню.

Під час воєнних дій ґрунтовий покрив зазнає механічної деформації внаслідок пересування колісної та гусеничної техніки, будівництва приповерхневих і підземних споруд, розмінування, вибухів і створення оборонної інфраструктури.

Основним видом воєнно-техногенного впливу є ущільнення та руйнування гумусового шару, що призводить до порушення водного балансу, розвитку вітрової та водної ерозії та зниження стійкості екосистеми. Під дією воєнного навантаження частинки ґрунту зміщуються одна відносно одної, що руйнує його природну структуру. Таке ущільнення ускладнює адаптацію рослин до зміни клімату, посухи та нестачі вологи, проте парадоксально робить ґрунт стійкішим до подальших механічних впливів за умов постійного дефіциту води [22].

Деформації також виникають під час будівництва фортифікаційних споруд – бліндажів, окопів, траншей, тунелів, сховищ пального й боєприпасів. Це спричиняє розвиток геоморфологічних процесів: зсувів, заболочування, осідання ґрунту тощо. Тому під час спорудження фортифікацій важливо враховувати глибину залягання ґрунтових вод і ступінь зволоження [1].

Окремим проявом воєнного впливу є утворення кратерів від вибухів, що змінюють мікрорельєф і викликають подальше порушення гідрологічного режиму територій. Результатом вибухової дії є швидке вивільнення енергії, що формує кругову ударну хвилю, яка поширюється навколо епіцентру вибуху, утворюючи воронку. Унаслідок вибуху частина ґрунту викидається назовні, формуючи

котлован, який у геоєкології визначають як прояв бомбтурбації – механічного порушення ґрунту під впливом вибухових процесів.

Під дією вибухової хвилі відбувається руйнування послідовності ґрунтових горизонтів, що призводить до порушення повітряно-водного режиму та деградації структури ґрунту. Великі фрагменти ґрунтової маси після вибуху осідають на дні кратера або щільно прилягають до його стінок [34].

Місця бомбтурбації часто стають осередками накопичення води й органічної речовини, що створює сприятливі умови для розвитку гідрофільної рослинності. Такий рослинний покрив зазвичай суттєво відрізняється від типового флористичного складу прилеглої території, що вказує на підвищену вологість та зміну мікрокліматичних умов. Якщо ж вибух стався на ділянках із близьким заляганням ґрунтових вод, розвиток нового ґрунту та вегетації значно сповільнюється.

Під час розмінування територій також відбувається значне порушення ґрунтового покриву – руйнується гумусовий горизонт, змінюються фізико-хімічні властивості, гранулометричний склад і агрегатний стан ґрунту. Це безпосередньо впливає на потенційну родючість та водоутримувальну здатність [32].

Установлення мін передбачає подальшу турбулентність ґрунту, оскільки детонація супроводжується забрудненням території металевими уламками та залишками вибухових речовин. Процеси очищення від мін є складними, тривалими та дороговартісними, тому для багатьох країн, що розвиваються, такі території фактично становлять втрачені ґрунтові ресурси.

Наслідком бойових дій також стають пожежі, які є первинним проявом воєнно-техногенного впливу на екосистеми. Вони активізують процеси водної та вітрової ерозії, спричиняють винос гумусових речовин і утворення гідрофобного шару, який перешкоджає проникненню води вглиб ґрунту. Це, у свою чергу, знижує його здатність до самовідновлення та погіршує екологічний стан території [3].

Хімічне пошкодження полягає у зміні хімічного складу ґрунту внаслідок надмірного накопичення токсичних речовин або порушення природного балансу біогенних елементів. Це одна з найнебезпечніших форм деградації, оскільки може мати тривалий і часто незворотний характер.

Джерела хімічного забруднення:

- мінеральні добрива – надлишкове внесення азотних сполук (аміачна селітра, сечовина) призводить до засолення та закислення ґрунтів;
- пестициди та гербіциди – за тривалого застосування накопичуються у ґрунті, порушуючи мікробіоценоз і токсично впливаючи на рослини;
- промислові відходи – містять важкі метали (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni), які блокують ферментативну активність і знижують біологічну продуктивність ґрунту;
- атмосферні викиди – кислотні дощі змінюють рН середовища, викликаючи деградацію гумусу.

Хімічне забруднення ґрунтів негативно впливає на їхню екологічну рівновагу та родючість. Воно призводить до порушення кислотно-лужного балансу, через що ґрунт підкислюється, знижується рухливість кальцію та магнію, а токсичність алюмінію і важких металів зростає. Під впливом шкідливих хімічних сполук відбувається деструкція гумусових речовин, що погіршує структуру ґрунту та зменшує його здатність утримувати поживні елементи. Окрім цього, спостерігається зниження мікробіологічної активності, зокрема скорочується чисельність нітрифікуючих, азотфіксувальних і фосфатмобілізувальних мікроорганізмів, які відіграють ключову роль у кругообігу поживних речовин [28]. Також у ґрунті накопичуються ксенобіотики – стійкі пестициди та важкі метали, які мають здатність переходити в харчовий ланцюг, створюючи серйозну екологічну та санітарну небезпеку для живих організмів, зокрема людини.

Механічне ущільнення часто посилює хімічне забруднення, оскільки ускладнює фільтрацію та міграцію токсичних речовин, сприяючи їх накопиченню

у верхніх горизонтах. Таке поєднання призводить до комплексної деградації ґрунту – зменшується гумусовий шар, порушується мікрофлора, знижується здатність ґрунту до самоочищення та відновлення.

Хімічний вплив воєнних заходів призводить до зміни природних параметрів ґрунтового покриву під дією забруднювальних речовин, що утворюються внаслідок використання систем зброї та військової техніки. Довготривала військова діяльність спричиняє утворення локальних воєнно-техногенних геохімічних аномалій з різним спектром вибухових та інших токсичних речовин, що може накласти на невизначений термін заборону на використання земель [29].

До хімічного забруднення воєнно-техногенного походження належать паливо транспортних засобів, мастильні матеріали, сольвенти, відходи гальванічного виробництва, залишки вибухових речовин, дезактиваційні речовини, важкі метали та їхні сполуки, радіоактивні речовини. Небезпечними речовинами фізико-хімічного типу є вибухонебезпечні матеріали. Під час здійснення стрільб використовуються боєприпаси з різним складом пороху та вибухових речовин, при горінні яких утворюються речовини, як-от азот, сажа, вуглеводні, свинець, двоокис марганцю та інші похідні, що негативно впливають на здоров'я людини та навколишнє природне середовище.

Нерозірвані боєприпаси та наземні міни завдають тривалого негативного впливу на ґрунти, який може зберігатися десятиліттями. Основна небезпека полягає у виділенні токсичних речовин унаслідок корозії металевих оболонок боєприпасів, а також у ризиках випадкових вибухів. Забруднення ґрунтів мінами призводить до втрати місцевими громадами доступу до земельних ресурсів і природних багатств. Значну частку такого забруднення становлять важкі метали [8].

Згідно з дослідженнями, проведеними у зонах АТО/ООС у 2016–2020 роках, у ґрунтах виявлено підвищений вміст свинцю, міді, миш'яку, цинку, хрому, кадмію, молібдену, барію, калію, магнію та вольфраму. Ці елементи формують основний

спектр військово-техногенного забруднення та виступають ключовими індикаторами для прогнозування екологічних змін у постраждалих і суміжних територіях. Найвищі концентрації нафтопродуктів спостерігаються в місцях розливів паливно-мастильних матеріалів.

У таких зонах відбувається зміна хімічного складу ґрунту, внаслідок чого знижується його здатність до самовідновлення та падає біологічна активність. Ґрунти, насичені вуглеводнями, стають джерелом токсичних газів і пилу, що поширюються повітрям і завдають шкоди ґрунтовому біорізноманіттю. Сполуки, такі як бензол, толуол, етилбензол і ксилол, які виділяються зі свіжозабруднених ділянок, можуть спричиняти хронічні порушення здоров'я людей. Потрапляючи у ґрунт, вуглеводні заповнюють його поровий простір, блокуючи циркуляцію повітря та води.

Наукові засади охорони ґрунтів базуються на принципах раціонального землекористування та сталого розвитку агросистем. Основними напрямками профілактики механічних і хімічних пошкоджень є застосування мінімального обробітку ґрунту (No-till, Strip-till); оптимізація структури посівів і впровадження сівозмін; використання органічних добрив, біопрепаратів, сидератів; очищення стічних вод і промислових відходів перед потраплянням у ґрунт; моніторинг стану ґрунту з використанням біоіндикаторів та мікробіологічних тестів.

Механічні та хімічні пошкодження є взаємопов'язаними процесами, які призводять до деградації ґрунтів на фізичному, хімічному та біологічному рівнях. Вони знижують екологічну стійкість агроєкосистем, продуктивність сільськогосподарських культур та спричиняють порушення природних біогеохімічних циклів. Розуміння теоретичних аспектів цих впливів є основою для розроблення ефективних стратегій охорони ґрунтів і раціонального використання земельних ресурсів.

### **1.3. Зміни агрофізичних властивостей (ущільнення, структура, водний режим) ґрунтів у зоні бойових дій**

Воєнні дії справляють тривалий і руйнівний вплив на ґрунтове середовище, погіршуючи його якісні характеристики та суттєво знижуючи продуктивність. Відновлення функціональних властивостей ґрунтів можливе, однак цей процес залежить від їхнього типу, характеру воєнно-техногенного впливу та ландшафтних умов конкретної території. Рівень воєнно-техногенного навантаження на ґрунти у повоєнних ландшафтах визначають за інтенсивністю бойових дій і видами бойового забруднення.

Від початку повномасштабного вторгнення 24 лютого 2022 року в Україні відбуваються активні бойові дії, які призвели до масштабного порушення ґрунтового покриву. Наразі площі забруднених земель обчислюються мільйонами гектарів. Точні дані поки відсутні, оскільки оцінка екологічного стану триває. Попри це, аграрний сектор залишається ключовим для економіки країни, забезпечуючи близько 30% ВВП. Дослідження ґрунтів на звільнених територіях проводяться не лише з економічних, а й з екологічних міркувань, адже саме вони визначають стратегію відновлення земель. Безпекові правила суттєво впливають на діяльність ґрунтознавців у воєнний час, адже близько 40% території України нині заміновано. Середня швидкість розмінування становить приблизно один гектар на день, тому науковці активно застосовують геоінформаційні технології, зокрема супутникові знімки та їх аналітичну обробку [3].

Ґрунт – це складна, багаторівнева екосистема з чіткою ієрархією горизонтів, які відображають послідовність його формування. Важка військова техніка, така як танки Т-64 (вагою близько 40–50 тонн), руйнує структуру ґрунту, порушуючи зв'язки між його частинками. Ущільнення призводить до втрати родючості, погіршує водо- та повітрообмін, а також знижує здатність рослин адаптуватися до

посух і змін клімату. Найбільша шкода виникає за багаторазового проходження важкої техніки, особливо на вологих ґрунтах [24].

Окрему загрозу становлять вибухи, які спричиняють серйозні механічні та хімічні порушення. Воронки від обстрілів, наприклад поблизу Ізюма Харківської області, стали наочним свідченням цього. За оцінками експертів UWEC (червень 2022 року), уламки боєприпасів та продукти їх вибуху змішуються з ґрунтом, забруднюючи територію в радіусі до 5 метрів від епіцентру, а окремі частини розлітаються на понад 100 метрів. Українські науковці провели комплексну оцінку ступеня пошкодження ґрунтів у пілотних районах – Вільхівській громаді на Харківщині та Сартанській на Донеччині.

Серед основних факторів шкоди виділяють пожежі та обстріли. На більшості постраждалих ділянок головною проблемою є не руйнування структури ґрунту, а велика кількість уламкового сміття. У таких випадках очищення території часто є достатнім заходом для її відновлення. Проте на землях із сильним забрудненням необхідні спеціальні процедури рекультивації або тимчасова консервація для природного самовідновлення.

У постраждалих регіонах вирощують культури, як-от соняшник і ріпак, проте їх подальше використання в харчовій промисловості після рекультивації суворо заборонено. Окрім безпосередніх ризиків, таких як наявність нерозірваних боєприпасів і забруднення важкими металами, війна спричиняє глобальні екологічні процеси деградації ґрунтів, найнебезпечнішим серед яких є опустелювання [2].

Найінтенсивніші бойові дії під час російського вторгнення в Україну відбуваються на сході та півдні держави – у регіонах із найпосушливішим кліматом і найродючішими чорноземами. Ці території вже раніше були вразливими до змін клімату через нестачу опадів, проте тепер вони додатково потерпають від втрати родючості на мільйонах гектарів через воєнні дії. За умови системного підходу до

відновлення ґрунтів та реалізації сталих природоохоронних заходів можна зупинити або суттєво сповільнити процес опустелювання. Над цим активно працюють українські наукові установи: Управління екологічної безпеки та протимінної діяльності Міністерства оборони України розробляє власну методіку відновлення, а Національна академія аграрних наук України пропонує низку відповідних проєктів [37].

Поточні дослідження зосереджено на рівні громад – найменших адміністративно-територіальних одиниць, аналогічних муніципалітетам. Саме на громади, найімовірніше, буде покладено завдання з оцінки збитків, розроблення планів відновлення та реалізації конкретних програм рекультивації пошкоджених земель. Однак результати цих досліджень не можна автоматично поширювати на всю територію України, адже кожна громада має свої природно-географічні, кліматичні та соціально-економічні особливості. Тому плани з відновлення земель повинні бути індивідуальними для кожної місцевості, хоча загальна методологія може бути використана на національному рівні.

Завдяки комплексному підходу, належному фінансуванню та ефективному плануванню Україна зможе поєднати заходи з ліквідації наслідків забруднення ґрунтів із глобальними стратегіями боротьби з опустелюванням – однією з найсерйозніших кліматичних проблем сучасності [26].

Порушення ґрунтового покриву, спричинені війною, умовно поділяють на дві групи:

- первинні – безпосередні механічні пошкодження, теплове забруднення, захаращення поверхні;
- вторинні – наслідки відсутності повоєнних заходів з відновлення, що призводять до підтоплення, засолення, ерозії, дегуміфікації, пірогенної деградації тощо.

Воєнні дії викликають цілий спектр механічних, фізичних і хімічних впливів на ґрунт, що призводить до руйнування його структури та зниження екологічних функцій. Руйнування рослинного покриву, дефіцит природного зволоження, посилення ерозійних процесів і поступове опустелювання є типовими наслідками воєнно-техногенного навантаження. У результаті зменшується рівень біорізноманіття, що порушує рівновагу біологічних популяцій і змінює структуру та функціонування ландшафтів.

Військові дії є потужним антропогенним фактором, що призводить до глибоких і часто незворотних змін у структурі та властивостях ґрунтів. Вплив вибухів, пересування важкої техніки, пожежі, руйнування рослинного покриву та забруднення паливно-мастильними матеріалами зумовлюють деградацію ґрунтового покриву і порушення його агрофізичних характеристик. Найбільш істотними є зміни у трьох ключових компонентах – ущільненні, структурі та водному режимі [4].

Ущільнення є одним із найпоширеніших наслідків бойових дій. Рух важкої військової техніки, вибухи артилерійських снарядів та авіабомб спричиняють механічний тиск на ґрунт, що призводить до зменшення пористості, порушення агрегатної структури та зниження повітропроникності. У зоні епіцентрів вибухів формується так званий «вибуховий шар» – ущільнений, часто цементований прошарок, у якому відбувається перемішування мінеральних і органічних часток.

Такі зміни зумовлюють зниження інфільтраційної здатності ґрунту, погіршення умов дихання кореневих систем і мікроорганізмів. Як наслідок, відбувається пригнічення росту культурних рослин, зменшується активність ґрунтової біоти та посилюються процеси поверхневого стоку.

У результаті вибухових навантажень та механічного перемішування руйнується природна грудкувата та зерниста структура ґрунту. Частинки верхнього шару ущільнюються або, навпаки, розпорошуються, утворюючи пилюваті агрегати.

Зменшується кількість стійких водостійких агрегатів, що призводить до втрати структурної стабільності ґрунту.

Крім того, руйнування рослинного покриву позбавляє ґрунт корневих систем, які відіграють ключову роль у підтриманні його структури. На ділянках, де відбулися пожежі, органічна речовина вигорає, і ґрунт стає схильним до ерозії та дефляції.

Таким чином, втрата структури безпосередньо впливає на фізико-механічні властивості ґрунту, його водопроникність, вологоємність і здатність до самооновлення. Порушення структури та ущільнення тісно пов'язані з трансформацією водного режиму. Зниження пористості та проникності призводить до скорочення запасів вологи у верхніх горизонтах і посилення поверхневого стоку. Вода не встигає проникати в глибші шари, що викликає засушування ґрунтів, зменшення запасів ґрунтової вологи і порушення гідрологічного балансу території.

У районах, де руйновано іригаційні системи (особливо на півдні України), спостерігається різке зниження рівня зволоження, що загрожує опустелюванню. Водночас на ущільнених ділянках можливе тимчасове перезволоження після сильних опадів через утворення поверхневих калюж і заболочення [39].

Зміни водного режиму ґрунту мають ланцюговий ефект: вони впливають на температурний режим, біологічну активність, процеси гуміфікації та врожайність культур. Порушення агрофізичних властивостей у зоні бойових дій призводить до деградації орних земель і зниження їхньої родючості. Спостерігається зменшення врожайності сільськогосподарських культур; зростання ризику ерозії; погіршення структури ґрунту і водного балансу; ускладнення обробітку землі через надмірне ущільнення або кам'янистість у місцях вибухів. Відновлення таких ґрунтів потребує багаторічної роботи, застосування органічних добрив, сидератів, меліоративних заходів і проведення глибокого розпушення.

У результаті військових дій уражені ґрунти зазнають значного погіршення агрофізичних властивостей. Основними проявами деградації є ущільнення, руйнування структури та порушення водного режиму, що веде до втрати родючості та біологічної активності. Реабілітація таких земель має базуватись на системному підході – моніторингу, меліорації, внесенні органічної речовини та відновленні рослинного покриву, який є природним стабілізатором структури і водного балансу ґрунту.

## РОЗДІЛ 2. ПРЕДМЕТ, ОБ'ЄКТ, МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Умови та місце проведення дослідження, відбір проб ґрунту

Протягом осінньо-літнього періоду 2025 року були відібрані зразки ґрунту на мілітарно-порушених ділянках Київської та Чернігівської областей. Всього було відібрано 10 зразків (рис. 2.1).

Лабораторні дослідження були проведені в мікробіологічній лабораторії ТОВ «Інститут прикладної біотехнології».

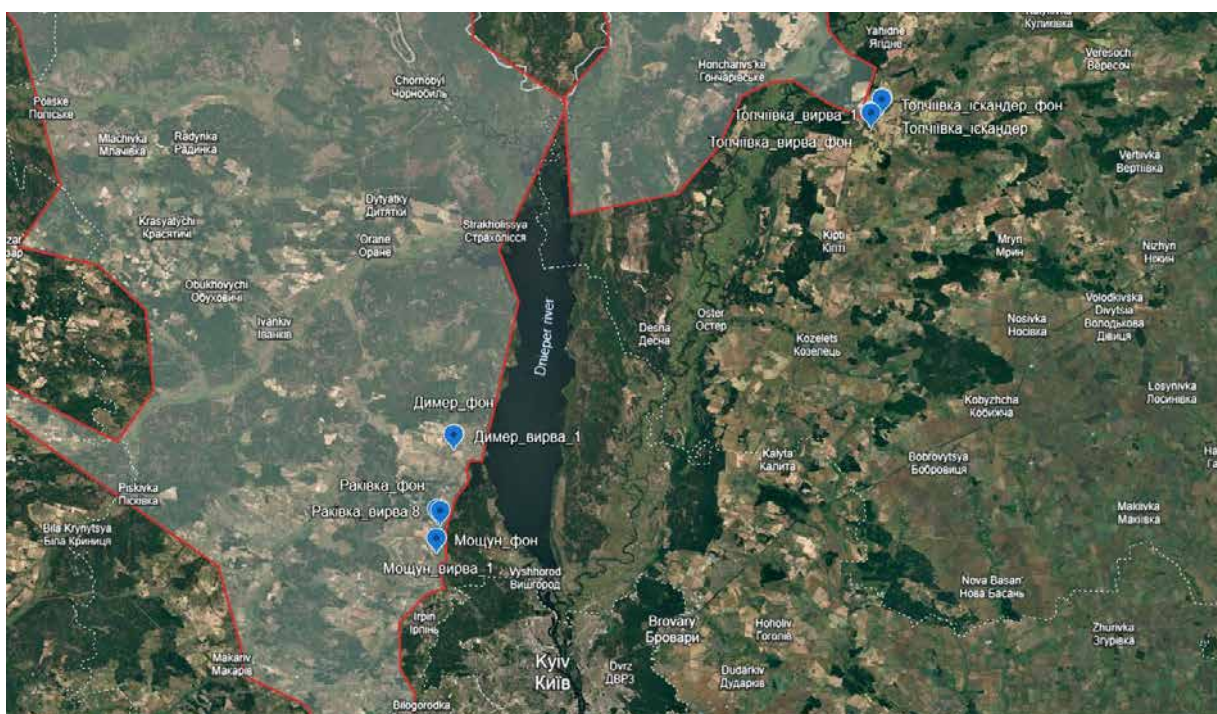


Рис. 2.1. Розміщення точок відбору проб ґрунту у місцях активних бойових дій

### 2.2. Методи визначення агрохімічних параметрів ґрунту

Для оцінювання агрохімічного стану ґрунтів, відібраних у зонах вибухового ураження та на фонових ділянках, використовували комплекс стандартизованих методів, що забезпечують точність і відтворюваність результатів. Визначення обмінної кислотності (рН сольового розчину) проводили відповідно до вимог ДСТУ ISO 10390:1994, який передбачає потенціометричний метод із застосуванням 1M

КСІ. Цей підхід дозволяє отримати надійні показники кислотно-лужного стану, чутливі до фізико-хімічних порушень ґрунтового профілю внаслідок вибухів.

Вміст органічної речовини у перерахунку на гумус визначали за ДСТУ 4289:2004, що базується на оксидаційно-титриметричному методі (модифікація Тюріна). Метод забезпечує оцінку ступеня дегуміфікації або, навпаки, збагачення ґрунту продуктами термічного розкладу, що є характерним для вибухових впливів.

Визначення гідролізованого азоту, доступного для мінералізації, проводили згідно з ДСТУ 7863:2015, який регламентує реакцію з 1% розчином солянокислого гідролізату та подальше фотометричне вимірювання. Мінеральні форми азоту (нітратний і амонійний азот) визначали відповідно до ДСТУ 4725:2007 та ДСТУ 4729-1:2007, що забезпечує роздільний аналіз  $N-NO_3^-$  та  $N-NH_4^+$ . Ці методи є критично важливими, оскільки азотні сполуки є найбільш чутливими до вибухових навантажень і різко змінюються внаслідок згорання, детонації та порушення гумусового горизонту.

Концентрацію рухомих форм фосфору та калію визначали за ДСТУ 4405:2005 у витяжці з ацетат-амонійного буфера (рН 4,8), що є одним із найбільш інформативних методів для оцінки доступності макроелементів рослинам. Метод дозволяє виявити як збіднення ґрунту внаслідок руйнування структури, так і можливе техногенне збагачення фосфором або калієм у місцях детонації вибухових речовин.

Загалом використані методики забезпечують комплексну характеристику агрохімічного стану ґрунтів, дозволяючи порівняти природний фон із трансформованими ділянками та кількісно оцінити ступінь їх деградації під впливом бойових дій.

### **2.3. Визначення чисельності бактерій основних фізіологічних груп методом висіву на селективні середовища**

Визначення чисельності мікроорганізмів основних фізіологічних груп проводили відповідно до вимог ДСТУ 7847:2015, який регламентує методику висіву ґрунтової суспензії на селективні поживні середовища. Метод передбачає поетапне приготування серій розведень ґрунтового зразка, подальший висів на чашки Петрі та інкубацію за оптимальних умов для кожної групи мікроорганізмів. Кількість колоній, що вирости, перераховували в млн КУО/г абсолютно сухого ґрунту, що дозволяє кількісно визначити рівень розвитку амоніфікаторів, амілолітичних бактерій, оліготрофів, педотрофів, фосфатмобілізаторів, целюлолітичних мікроорганізмів та актиноміцетів.

Ступінь збагачення ґрунтів бактеріями окремих фізіологічних груп оцінювали за шкалою Д. Г. Звягінцева, яка дозволяє встановити рівні «дуже бідний», «бідний», «середній», «багатий» та «дуже багатий» у порівнянні з типовими показниками незабруднених ґрунтів. Така градація особливо важлива для визначення ступеня деградації мікробного ценозу у зонах вибухового ураження. Для фізіологічних груп, щодо яких шкали інтерпретації не розроблено (наприклад, для частини фосфатмобілізуючих та алюміній-мобілізуючих бактерій), оцінювання проводили шляхом порівняння значень вирви і фонового зразка.

Для інтегральної оцінки спрямованості ґрунтових мікробіологічних процесів розраховували коефіцієнти мінералізації–імобілізації, оліготрофності та педотрофності згідно з ДСТУ 3750-98, що дозволяє визначити баланс між процесами розкладання органічних речовин і синтезу мікробної біомаси. Додатково оцінювали коефіцієнт мікробної трансформації органічної речовини за методикою Мухи В. Д., що характеризує інтенсивність перетворення вуглецевих сполук у ґрунті. Саме ці індикатори дають змогу кількісно оцінити глибину порушення

мікробіоти внаслідок вибухів та порівняти активність ґрунтових процесів на різних локаціях.

#### **2.4. Визначення коефіцієнтів спрямованості мікробіологічних процесів**

Дослідження мікробіологічних процесів у ґрунті є важливим напрямом ґрунтової мікробіології та екології. Центральне місце в цих дослідженнях посідає використання коефіцієнтів спрямованості, які дозволяють кількісно оцінити домінування процесів мінералізації (розкладу органічної речовини) або іммобілізації (синтезу мікробної біомаси, утворення гумусу).

Ключовим показником у цій галузі є коефіцієнт мінералізації–іммобілізації. Коефіцієнт мінералізації–іммобілізації (КМ-І) є розрахунковим показником, який використовується для оцінки балансу між двома основними процесами трансформації поживних елементів (найчастіше азоту або вуглецю) в ґрунті: мінералізацією та іммобілізацією [9; 10].

Цей коефіцієнт визначається як співвідношення чисельності або активності різних фізіологічних груп мікроорганізмів, які опосередковують ці процеси [11]. У загальному вигляді, формула для розрахунку коефіцієнта має такий вигляд.

$$K_{M-I} = \frac{\text{Кількість(або активність)мікроорганізмів мінералізаторів}}{\text{Кількість(або активність)мікроорганізмів іммобілізаторів}}$$

Зокрема, широко застосовується підхід, що передбачає використання крохмало-аміачного агару (КАА) та м'ясо-пептонного агару (МПА). Відношення кількості мікроорганізмів, що виростили на цих середовищах, дає уявлення про баланс між споживанням легкодоступних органічних сполук та мінеральних форм азоту. Для визначення чисельності мікроорганізмів використовують стандартні мікробіологічні методи, наприклад, метод посіву на живильні середовища (метод В. Штатнова, або ж сучасніші модифікації) [11]. Конкретні групи мікроорганізмів,

які беруть до уваги, можуть відрізнятися залежно від методики, але зазвичай це: Мікроорганізми-мінералізатори: Це групи, які активно руйнують складні органічні сполуки. Приклади: целюлозоруйнівні бактерії та мікроміцети, амілолітичні мікроорганізми, амоніфікатори [9; 12; 13]. Мікроорганізми-імобілізатори: Це групи, які активно споживають прості мінеральні форми елементів і переводять їх у свою біомасу. Приклади: мікроорганізми, що асимілюють мінеральні форми азоту (наприклад, нітрати або амоній), олігонітрофіли [9; 10; 13].

Значення коефіцієнта інтерпретується наступним чином. Якщо  $K_{M-I} > 1$ , то переважають процеси мінералізації. Це означає, що органічна речовина активно розкладається, а поживні елементи вивільняються в доступній для рослин мінеральній формі. Якщо  $K_{M-I} < 1$ , то переважають процеси імобілізації. Це свідчить про активне поглинання мінеральних елементів мікроорганізмами, що може спричинити дефіцит живлення для культурних рослин. Якщо  $K_{M-I} \approx 1$ , то в ґрунті спостерігається динамічна рівновага між процесами. Таким чином,  $K_{M-I}$  є важливим індикатором азотного режиму та загальної біологічної активності ґрунту [14; 13].

У літературі розглядаються й інші коефіцієнти, що характеризують екологічний стан ґрунту, наприклад, коефіцієнт оліготрофності ( $K_O$ ). Коефіцієнт оліготрофності є важливим еколого-мікробіологічним показником, який характеризує стан ґрунту та рівень його забруднення або деградації [14; 11]. Він відображає співвідношення між двома основними еколого-трофічними групами мікроорганізмів: оліготрофами та педотрофами (або евтрофами) [14].

Оліготрофи це мікроорганізми, які здатні ефективно розвиватися в умовах вкрай низького вмісту поживних речовин (бідні субстрати, низька концентрація органічного вуглецю) [14; 11]. Педотрофи (евтрофи) це мікроорганізми, які

потребують високої концентрації легкодоступних поживних речовин для свого росту і розмноження (багаті органічні субстрати) [14].

Коефіцієнт оліготрофності визначається як розрахункове співвідношення чисельності цих двох груп мікроорганізмів, за формулою:

$$K_o = \frac{\text{Чисельність оліготрофних мікроорганізмів}}{\text{Чисельність педотрофних (евтрофних) мікроорганізмів}}$$

Для визначення чисельності цих груп використовують метод посіву на різні живильні середовища [14]. Для педотрофів (евтрофів) зазвичай використовують багаті органічним субстратом середовища, такі як м'ясо-пептонний агар (МПА) або агар із ґрунтовим екстрактом, що містить багато легкодоступних сполук. Для оліготрофів використовують бідні, сильно розведені середовища з низькою концентрацією поживних речовин. Після інкубації підраховують кількість колоній, що виростили на відповідних середовищах, і використовують ці дані для розрахунку коефіцієнта [14].

Значення коефіцієнта оліготрофності дозволяє судити про якість ґрунту [11]. Високий  $K_o$  (наприклад,  $>1$  або значно більше 1): Свідчить про те, що в ґрунті переважають оліготрофні мікроорганізми. Це характерно для чистих, природних, непорушених ґрунтів з низьким вмістом легкодоступної органіки [14]. Низький  $K_o$  (наприклад,  $<1$ ): Вказує на переважання педотрофів. Це типово для ґрунтів, які піддаються антропогенному впливу: забруднених ґрунтів (наприклад, нафтопродуктами, пестицидами) або ґрунтів з інтенсивним внесенням органічних чи мінеральних добрив [14; 12].

Таким чином, коефіцієнт оліготрофності є чутливим біологічним індикатором, який допомагає оцінити рівень антропогенного навантаження та екологічний стан ґрунтового середовища [11].

Коефіцієнт педотрофності ( $K_{П.}$ ) розраховували за відношеннями кількостей мікроорганізмів на ґрунтовому агарі ( $C_{Гр.А}$ ) до кількості мікроорганізмів, що вирости на м'ясопептонному агарі ( $C_{МПА}$ ):

$$K_{П.} = \frac{C_{Гр.А}}{C_{МПА}}$$

Коефіцієнт трансформації органічної речовини ( $K_{ТОР}$ ) визначається як частка органічної речовини, що залишається в ґрунті у вигляді стабільного гумусу після процесу мікробної деструкції та синтезу [15]. Визначення цього коефіцієнта зазвичай не ґрунтується на одній простій польовій формулі, а є результатом комплексних лабораторних досліджень та моделювання динаміки ґрунтової органічної речовини (ОР) в довгострокових експериментах [16].

Основні підходи до визначення розглянемо нижче. Балансовий метод (наближений) передбачає розрахунок загального надходження органічної речовини в ґрунт (рослинні рештки, добрива тощо) та визначення кінцевої кількості стабільного гумусу через певний період часу [15]. Кількість ОР вимірюють через вміст органічного вуглецю (C).

У наукових дослідженнях використовуються складні математичні моделі динаміки ґрунтового органічного вуглецю, які враховують різні фракції ОР (лабільну, стійку) та швидкість їх мінералізації ( $k_2$ ) і гуміфікації ( $k_1$ ) [16]. Ці моделі використовують дані довгострокових польових спостережень за вмістом вуглецю в ґрунті (SOC stocks) та щорічним надходженням вуглецю.

До лабораторних та аналітичних методів визначення відносять вимірювання "дихання ґрунту" або Інтенсивність емісії  $CO_2$ . Ґрунтове дихання є інтегрованим

показником біологічної активності ґрунту і відображає інтенсивність процесів деструкції ОР [17].

Використовуються методи фізичного та хімічного фракціонування для виділення різних за стійкістю фракцій ОР (наприклад, лабільної та стійкої до мінералізації) [18]. Застосування стабільних ізотопів (наприклад,  $^{13}\text{C}$ ) дозволяє відстежувати шляхи трансформації конкретних органічних субстратів мікробними угрупованнями та оцінювати ефективність їх утилізації [17]. Сучасні аналітичні техніки включають наступні: піролізна мас-спектрометрія, ядерний магнітний резонанс та інші методи високої роздільної здатності допомагають визначити хімічну структуру та склад ОР, що трансформується.

Коефіцієнт трансформації не є сталою величиною і залежить від багатьох чинників, які впливають на мікроорганізми [15]:

Тип органічної речовини: Склад і співвідношення легко- та важкодоступних сполук (наприклад, співвідношення C:N).

Умови навколишнього середовища: Температура, вологість, аерація (наявність кисню), рН ґрунту.

Склад мікробного угруповання: Домінування певних груп мікроорганізмів та їхня функціональна спрямованість (деструкція чи синтез).

Агротехнічні заходи: Обробіток ґрунту, системи удобрення.

У нашій роботі для оцінки мікробної трансформації ми використовували співвідношення мікробної біомаси до загального органічного вуглецю ( $C_{\text{mic}} / C_{\text{org}}$ ) [19].

Низькі значення  $C_{\text{mic}} / C_{\text{org}}$  вказують на переважання процесів мінералізації над синтезом мікробної біомаси та гумусу, що може свідчити про втрату органічної речовини ґрунту. Високі значення  $C_{\text{mic}} / C_{\text{org}}$  спостерігаються в природних екосистемах і вказують на активний синтез мікробної біомаси та ефективну гуміфікацію [19].

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

### 3.1. Результати агрохімічного аналізу ґрунту

У результаті лабораторних вимірювань були отримані наступні результати агрохімічного аналізу досліджуваних ґрунтів (табл. 3.1). Таблиця відображає порівняння агрохімічних властивостей ґрунту в епіцентрі вирви (рис. 3.1) та на фоновій непошкодженій ділянці неподалік села Мощун (рис. 3.2). Обидва зразки мають близькі до нейтральних значення рН, однак у вирві кислотність дещо вища (5,1 проти 5,6). Вміст органічної речовини дуже низький у центрі вирви (0,55%) та низький на фоні (1,14%). За мінеральним азотом спостерігається різке зниження всіх форм у вирві: гідролізований азот – 28,7 мг/кг проти 54,6 мг/кг; амонійний – 10,2 проти 3,0 мг/кг; нітратний – 3,4 проти слідів. Рухомий фосфор має підвищене значення у вирві (181 мг/кг), тоді як фонові значення значно вищі – 424 мг/кг. Вміст калію істотно нижчий у центрі вирви (34 мг/кг) порівняно з фоновими 88 мг/кг.



Рис. 3.1. Фото вирви біля с. Мощун



Рис. 3.2. Загальний вигляд поля біля с. Мошун

Отримані значення відображають деградацію родючості ґрунту внаслідок вибухової дії снаряда. Звертає на себе увагу суттєве зниження органічної речовини й азотного комплексу у вирві, що свідчить про руйнування гумусового горизонту. Різке зменшення нітратної форми азоту також є наслідком окисно-відновних процесів і втрати доступного азоту. Водночас підвищені показники фосфору у вирві можуть бути пов'язані з присутністю вибухових залишків або порушенням адсорбційних властивостей ґрунту. Загалом, ґрунт у центрі вирви демонструє ознаки агрохімічного виснаження, тоді як ґрунт з непорушеної ділянки характеризується більш стабільними параметрами родючості.

Таблиця 3.1

Результати агрохімічного аналізу зразків ґрунту, відібраних біля населеного пункту Мощун, Київська область

Показники, одиниці вимірювань		Мощун вирва		Мощун фон	
		Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004	Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004
Обмінна кислотність, рН сольовий		5,1	слабокислі	5,6	близькі до нейтральних
Уміст органічної речовини в перерахунку на гумус, %		0,55	дуже низький уміст	1,14	низький уміст
Гідролізований азот, мг/кг		28,7	дуже низький уміст	54,6	дуже низький уміст
Мінеральний азот	Нітратний азот, N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	3,4	-	сліди	-
	Амонійний азот, N-NH <sub>4</sub> , мг/кг	10,2	-	3,2	-
	Всього мінерального азоту, N, мг/кг	13,6	низький уміст	3,2	дуже низький уміст
Рухомий фосфор, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг		181,2	високий уміст	424,0	дуже високий уміст
Рухомий калій, K <sub>2</sub> O, мг/кг		34,0	дуже низький уміст	88,2	середній уміст

Результати вимірювання зразків ґрунту, відібраних біля населеного пункту Димер демонструють істотні відмінності між агрохімічними показниками ґрунту на порушеній ділянці з вирвою та фоновією ділянкою (табл. 3.2). рН у вирві становить 6,9 (нейтральний), тоді як фон має показник 5,6 (слабокислий). Гумус у вирві –

2,04% (низький), що майже вдвічі нижче, ніж на фоні (3,38%). Нітратний азот у вирві міститься у слідових кількостях, тоді як у фоні – 2,2 мг/кг. Загальний мінеральний азот суттєво нижчий у вирві (8,4 мг/кг проти 16,0). Рухомий фосфор є високим у вирві (232,5 мг/кг), тоді як у фоні – середній (82,5 мг/кг). Вміст калію у вирві також знижений – 35,5 мг/кг проти 54,5 мг/кг.

Таблиця 3.2

Результати агрохімічного аналізу зразків ґрунту, відібраних біля населеного пункту Димер, Київська область

Показники, одиниці вимірювань	Димер вирва		Димер фон	
	Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004	Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004
Обмінна кислотність, рН сольовий	6,9	нейтральні	5,6	близькі до нейтральних
Уміст органічної речовини в перерахунку на гумус, %	2,04	низький уміст	3,38	підвищений уміст
Гідролізований азот, мг/кг	76,3	дуже низький уміст	118,4	низький уміст
Мінеральний азот	Нітратний азот, N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	сліди	-	-
	Амонійний азот, N-NH <sub>4</sub> , мг/кг	8,4	-	-
	Всього мінерального азоту, N, мг/кг	8,4	дуже низький уміст	12,0
Рухомий фосфор, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	232,5	високий уміст	82,5	середній уміст
Рухомий калій, K <sub>2</sub> O, мг/кг	35,5	низький уміст	54,5	низький уміст

Аналіз отриманих результатів агрохімічних параметрів ґрунту мілітарно порушеної ділянки біля населеного пункту Димер свідчить про деградацію органічної складової та азотного живлення ґрунту, що характерно для зон значного термічного та механічного руйнування. Суттєве зменшення мінерального азоту у вирві обумовлене руйнуванням структури гумусу та інтенсифікацією мінералізаційних процесів одразу після вибуху. Підвищений вміст фосфору у вирві може бути техногенного походження або результатом звільнення фосфатів після деструкції органічних зв'язків при дії високих температур в умовах вибуху боєприпасу. Фонова непорушена ділянка демонструє стабільний азотний потенціал та більш збалансоване забезпечення елементами живлення, що підтверджує негативний вплив вибуху на родючість.

Результати визначення агрохімічних показників ґрунту відібраного біля населеного пункту Раківка демонструють різкі контрасти між мілітарно порушеною ділянкою та фоном (табл. 3.3). рН коливається в межах слабокислих значень (5,7–6,5). Вміст органічної речовини у вирві надзвичайно високий – 27,6%, що майже утричі більше за фонові 8,85%. Мінеральний азот різко зростає у вирві: гідролізований азот – 1416 мг/кг проти 697 мг/кг на фоні; амонійний – 176 мг/кг проти 78 мг/кг. Фосфор у вирві також має дуже високі показники – 7000 мг/кг, тоді як фон демонструє 2370 мг/кг. Калій у вирві становить 140 мг/кг, що суттєво вище за фонові 100 мг/кг.

Надзвичайно високі концентрації азоту, фосфору та органічного вуглецю у зразках вирви можуть свідчити про техногенне забруднення вибуховими речовинами, продуктами горіння або включенням органічних матеріалів. Такі значення не можуть бути природними для типових агроєкосистем і характеризують ґрунт як різко трансформований. Водночас високий рівень амонію та фосфору є типовим слідом детонаційної хімії боєприпасів, що містять нітро- та фосфатні

компоненти. Фонові ділянки демонструють підвищені, але значно нижчі показники, що підтверджує локальність техногенного впливу.

Таблиця 3.3

Результати агрохімічного аналізу зразків ґрунту, відібраних біля населеного пункту Раківка, Київська область

Показники, одиниці вимірювань		Раківка вирва		Раківка фон	
		Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004	Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004
Обмінна кислотність, рН сольовий		5,7	близькі до нейтральних	6,2	нейтральні
Активна кислотність, рН водний		6,0	-	6,5	-
Уміст органічної речовини в перерахунку на вуглець (С), %		27,60	дуже високий уміст	8,85	дуже високий уміст
Гідролізований азот, мг/кг		1416,6	підвищений уміст	697,2	підвищений уміст
Мінеральний азот	Нітратний азот, N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	126,0	-	25,4	-
	Амонійний азот, N-NH <sub>4</sub> , мг/кг	176,7	-	78,3	-
	Всього мінерального азоту, N, мг/кг	302,7	дуже високий уміст	103,7	дуже високий уміст
Рухомий фосфор, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг		7000,0	дуже високий уміст	2370,0	дуже високий уміст
Рухомий калій, K <sub>2</sub> O, мг/кг		140,0	підвищений уміст	100,0	середній уміст

Результати визначення агрохімічних показників ґрунту відібраного на мілітарно порушеній ділянці біля населеного пункту Топчіївка (табл. 3.4) характеризуються близьким до нейтрального рН (7,3–7,9), такі ж як для ґрунту з непорушеної ділянки.

Таблиця 3.4

Результати агрохімічного аналізу зразків ґрунту, відібраних біля населеного пункту Топчіївка, Чернігівська область

Показники, одиниці вимірювань		Топчіївка вирва		Топчіївка фон	
		Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004	Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004
Обмінна кислотність, рН сольовий		7,3	близькі до нейтральних	7,4	близькі до нейтральних
Активна кислотність, рН водний		7,9	-	7,7	-
Уміст органічної речовини в перерахунку на гумус, %		1,13	дуже високий уміст	1,76	низький уміст
Гідролізований азот, мг/кг		40,5	підвищений уміст	77,7	дуже низький уміст
Мінеральний азот	Нітратний азот, N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	1,7	-	3,2	-
	Амонійний азот, N-NH <sub>4</sub> , мг/кг	5,9	-	9,8	-
	Всього мінерального азоту, N, мг/кг	7,6	дуже високий уміст	13,0	низький уміст
Рухомий фосфор, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг		27,5	низький уміст	48,2	низький уміст
Рухомий калій, K <sub>2</sub> O, мг/кг		53,8	середній уміст	55,0	середній уміст

Вміст гумусу в зоні вибуху становить 1,13%, що відповідає дуже низькому рівню, тоді як на фоні – 1,76% (низький). Мінеральний азот у вирві збільшений (40,5 мг/кг гідролізованого азоту), тоді як у фоні його значення удвічі вищі (77,7 мг/кг). Нітратів у зразку з вирви дуже мало (1,7 мг/кг), у фоні вони сягають 3,2 мг/кг. Рухомий фосфор має низькі значення у вирві (27,5 мг/кг), але у фоні суттєво зростає до 48 мг/кг.

Аналіз результатів вимірювання дозволяє встановити в даній локації загалом помірний вплив вибуху на агрохімічні властивості ґрунту. Втрата органічної речовини і азоту у вирві свідчить про часткове руйнування орного шару та зниження біологічної активності. Водночас ґрунт непорушеної ділянки зберігає вищий рівень азотного та фосфорного живлення, що підкреслює локальний характер руйнування. Низькі концентрації фосфору у вирві можуть бути наслідком вимивання чи втрати адсорбційної здатності структурно порушеного ґрунту. Загалом у ґрунті біля населеного пункту Топчіївка спостерігається менш інтенсивна деградація порівняно з іншими локаціями.

У зразках із зони ураження ракетою Іскандер (табл. 3.5) рН становить близький до нейтрального рівень (5,8–5,9). Гумус у місці вибуху – 1,41%, що менше за фонові 1,64%. Гідролізований азот становить 64,4 мг/кг у ґрунті на порушеній ділянці та 81,2 мг/кг на фоні. Нітратів у обох зразках майже немає. Мінеральний азот у місці вибуху – 6,8 мг/кг, що трохи менше, ніж у фоновому 8,7 мг/кг. Рухомий фосфор має підвищені значення у місці вибуху (112 мг/кг), у фоні ж – 100 мг/кг. Калій також вищий у місці вибуху – 106 мг/кг проти 92,5 мг/кг.

На відміну від інших ділянок, зона ураження Іскандера демонструє не стільки зниження, скільки перерозподіл елементів мінерального живлення. Незначні відмінності між порушеною та непорушеною ділянками свідчать про те, що вибух мав менший вплив на агрохімічний стан або ж ґрунт має високу природну

резистентність. Підвищення фосфору і калію у вирві може бути пов'язане з мінеральним складом ракети або з виходом фосфатів після термічної деструкції органічних сполук (пожежа після вибуху). Загалом дані вказують на локальну зміну структури ґрунту без катастрофічної деградації.

Таблиця 3.5

Результати агрохімічного аналізу зразків ґрунту, відібраних біля населеного пункту Топчіївка, Чернігівська область (вибух Іскандеру з касетною боеголовкою)

Показники, одиниці вимірювань		Топчіївка іскандер		Топчіївка іскандер фон	
		Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004	Результати випробувань	Оцінка результатів згідно з ДСТУ 4362:2004
Обмінна кислотність, рН сольовий		5,8	близькі до нейтральних	5,9	близькі до нейтральних
Уміст органічної речовини в перерахунку на гумус, %		1,41	низький уміст	1,64	низький уміст
Гідролізований азот, мг/кг		64,4	дуже низький уміст	81,2	дуже низький уміст
Мінеральний азот	Нітратний азот, N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	сліди	-	сліди	-
	Амонійний азот, N-NH <sub>4</sub> , мг/кг	6,8	-	8,7	-
	Всього мінерального азоту, N, мг/кг	6,8	дуже низький уміст	8,7	дуже низький уміст
Рухомий фосфор, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг		112,5	підвищений уміст	100,0	середній уміст
Рухомий калій, K <sub>2</sub> O, мг/кг		106,2	підвищений уміст	92,5	підвищений уміст

### **3.2. Результати визначення чисельності бактерій основних фізіологічних груп методом висіву на селективні середовища**

Відібрані були також зразки у описаних вище точках для проведення дослідження стану мікробіоти ґрунту та визначення впливу активних бойових дій на її стан.

Таблиця 3.6 демонструє кількісний розподіл основних груп ґрунтової мікробіоти: амоніфікаторів, амілолітичних, оліготрофів, фосфатмобілізаторів, актиноміцетів, целюлолітичних та інших груп. Найбільш насичені мікробіотою ґрунти – це Раківка (вирва та фон), де чисельність амоніфікаторів сягає 24–32 млн КУО/г. Найменші показники фіксуються у Мощуні (рис. 3.3 і 3.4). Фонові ділянки майже завжди мають вищі значення біомаси, ніж мілітарно порушені, що демонструє деградацію мікробних угруповань у зоні вибухів. Також важливо, що в Топчіївці та Димері показники наближені до середніх значень.

Дані свідчать про суттєвий вплив вибухів на зміни мікробіоценозу ґрунту. У всіх локаціях вирви характеризуються нижчою чисельністю мікроорганізмів, що підтверджує руйнування або стерилізаційний ефект високих температур. Водночас надзвичайно високі значення мікробної активності в Раківці можуть бути пов'язані з надходженням органічних та азотних речовин техногенного походження, які слугують субстратом для мікрофлори. Дисбаланс між групами мікроорганізмів також відображає зміну спрямованості процесів: зниження целюлолітичних бактерій і збільшення амоніфікаторів указує на переважання мінералізації над гуміфікацією.

Таблиця 3.6

Чисельність мікроорганізмів основних фізіологічних груп у досліджуваному зразку ґрунту, млн КУО/г ґрунту (\* - тис. КУО/г ґрунту)

Зразок	Групи мікроорганізмів												Біогенність ґрунту
	Амоніфікатори	Амілолітики	Олігонітрофіли	Оліготрофи	Педотрофи	Фосфатмобілізатори				Гумаг-трансформуючі	Целюлозо-руйнівні	Актиноміцети	
						органічних сполук	мінеральних сполук						
							всього	кальцію	алюмінію та заліза				
Мощун вирва	4,9	9,2	7,5	15,7	21,1	5,9	7,0	2,6	4,4	2,0	53,7	0,0	73,3
Мощун фон	8,9	8,4	7,3	11,4	9,6	8,7	9,7	5,6	4,1	3,8	96,5	0,0	67,8
Димер, вирва	14,7	9,2	9,4	15,4	16,6	18,4	18,5	6,5	12,0	2,8	81,2	0,79	105,3
Димер фон	10,4	10,1	8,4	18,9	31,5	11,2	24,7	6,6	18,1	2,0	119,2	0,82	117,3
Раківка вирва	24,1	28,1	29,5	46,9	42,4	28,0	57,8	23,4	34,4	10,4	79,1	1,58	267,2
Раківка фон	13,2	24,0	25,6	32,2	31,7	19,3	46,5	17,9	28,6	7,8	81,5	0,78	200,3
Топчіївка вирва	8,9	5,0	9,3	16,1	7,3	15,4	19,6	7,4	12,2	4,4	35,6	0,08	85,9
Топчіївка фон	30,1	23,3	26,4	47,0	48,9	22,2	59,6	27,1	32,5	15,6	97,7	0,44	237,3
Топчіївка іскандер	5,6	5,3	8,0	16,4	13,6	8,9	12,3	4,5	7,8	0,62	77,6	0,31	70,9
Топчіївка іскандер фон	8,8	8,1	10,0	10,7	13,4	10,9	21,7	6,3	15,4	3,0	60,5	0,21	86,6

Ступінь збагачення ґрунту мікроорганізмами:



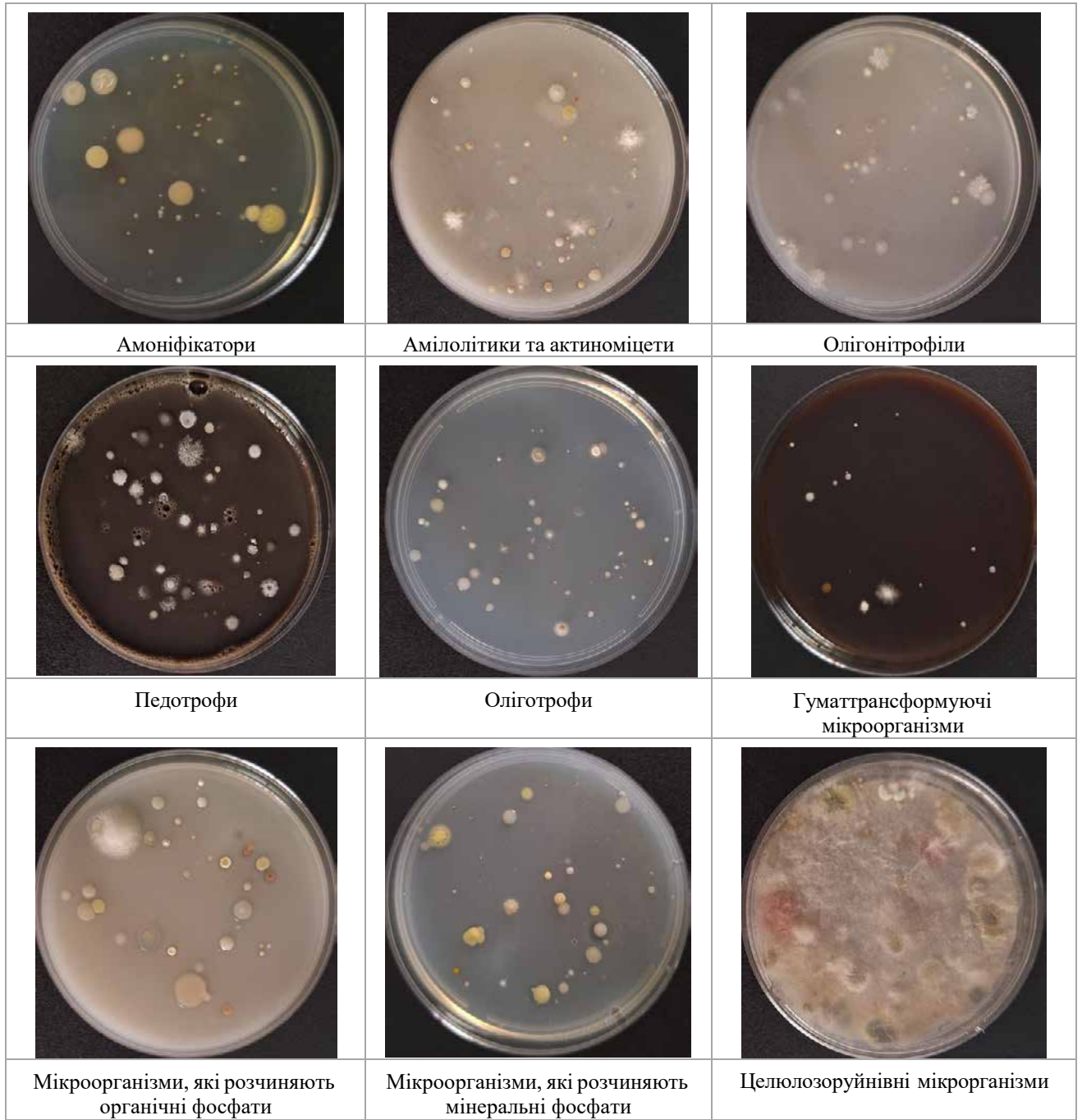


Рис. 3.3. Колонії мікроорганізмів, виділені із проби ґрунту Мощун фон

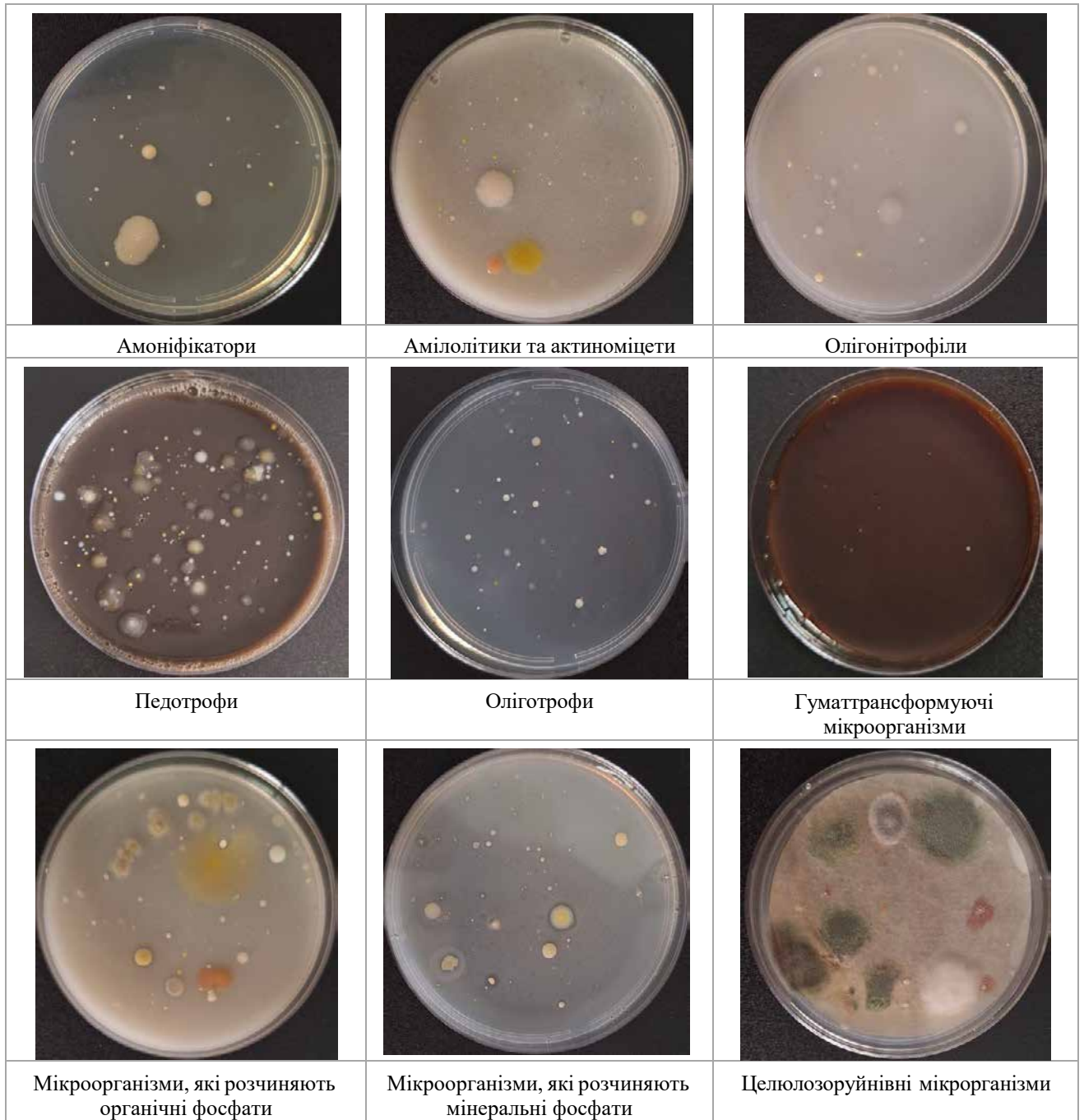


Рис. 3.4. Колонії мікроорганізмів, виділені із проби ґрунту Моцун вирва

### 3.3. Спрямованість мікробіологічних процесів у проба ґрунту на непорушених і мілітарно деградованих землях

У таблиці 3.7 подані коефіцієнти мінералізації-іммобілізації, оліготрофності та педотрофності, а також коефіцієнт трансформації органічної речовини, що визначені за результатами аналізів відібраних зразків.

Загалом серед усіх зразків коефіцієнт мінералізації-іммобілізації ( $K_{m-i}$ ) варіюється від 0,56 (Топчіївка вирва) до 1,87 (Мощун вирва). Коефіцієнт Оліготрофності ( $K_o$ ) варіюється від 1,05 (Димер вирва) до 3,18 (Мощун вирва). Коефіцієнт педотрофності ( $K_p$ ) варіюється від 0,82 (Топчіївка вирва) до 4,28 (Мощун вирва). Коефіцієнт трансформації органічної речовини ( $K_{top}$ ) варіюється від 7,6 (Мощун вирва) до 69 (Топчіївка фон).

Ґрунт з точки відібраної біля с. Мощун характеризується високою мінералізаційною активністю у вирві ( $K_{m-I} = 1,87$ ), тоді як фон має показник майже вдвічі нижчий – 0,95.

У Раківці значення  $K_{top}$  сягає 44–69, що є найвищим серед усіх ділянок. Топчіївка демонструє помірні значення коефіцієнтів, тоді як «Іскандер» характеризується низькими показниками педотрофності та середніми показниками мінералізації.

У більшості відібраних зразків (Димер, Раківка, Топчіївка) значення цих коефіцієнтів мінералізації-іммобілізації ( $K_{m-i}$ ) та педотрофності ( $K_p$ ) нижчі в умовах "вирва" порівняно з "фон" у тому ж населеному пункті. Це може свідчити про зміну процесів мінералізації та трофності ґрунту в місцях порушення. Винятком є Мощун, де "вирва" демонструє значно вищі  $K_{m-i}$  та  $K_p$ .

Спостерігається чітка закономірність: у всіх випадках, окрім Мощуна,  $K_{top}$  значно вищий в умовах "вирва" порівняно з "фон". Це може вказувати на інтенсивнішу трансформацію органічної речовини в порушених ґрунтах.

Щодо коефіцієнту оліготрофності ( $K_o$ ), то закономірність менш виражена і варіюється залежно від локації. У Мощуні "вирва" має вище значення, тоді як в інших місцях значення "вирва" та "фон" ближчі або "фон" має вище значення.

Загалом варто відмітити, що зразок Мощун вирва виділяється як зразок із найвищими показниками  $K_{m-i}$ ,  $K_o$  та  $K_p$  серед усіх зразків.

Топчіївка фон має найвищий коефіцієнт трансформації органічної речовини (69) із значним відривом.

Димер та Раківка мають схожі тенденції, де порушені ділянки ("вирва") демонструють нижчі показники  $K_{m-i}$ ,  $K_o$  та  $K_p$ , але різко вищий  $K_{top}$  порівняно з фоновими ділянками.

Отже, дані вказують на те, що порушення ґрунту (умови "вирва") суттєво змінюють екологічні показники, причому характер цих змін може відрізнятися залежно від конкретного місця розташування

Коефіцієнти направленості мікробіологічних процесів підтверджують загальну тенденцію: у зонах вибухів переважають процеси мінералізації, що зумовлює втрату органічного вуглецю та зниження гумусового балансу. Високий  $K_{top}$  у точці Раківка вирва свідчить про інтенсивну трансформацію органічної речовини, ймовірно стимульовану доступними вибуховими домішками. Підвищена оліготрофність у Мощуні та Димері вказує на виснаження поживних ресурсів і стресовий стан мікробіоти. Загалом мікробіологічні коефіцієнти посилюють картину деградації ґрунтів, отриману з агрохімічного аналізу.

Таблиця 3.7

Коефіцієнти спрямованості мікробіологічних процесів у пробі ґрунту

Зразок	Коефіцієнт Мінералізації- імобілізації ( $K_{M-I}$ )	Коефіцієнт Оліготрофності ( $K_{O.}$ )	Коефіцієнт Педотрофності ( $K_{П.}$ )	Коефіцієнт Трансформації органічної речовини ( $K_{ТОР}$ )
Мощун вирва	1,87	3,18	4,28	7,6
Мощун фон	0,95	1,28	1,08	18,3
Димер вирва	0,62	1,05	1,13	38,4
Димер фон	0,97	1,82	3,03	21,1
Раківка вирва	1,17	1,95	1,76	44,7
Раківка фон	1,81	2,43	2,40	20,5
Топчіївка вирва	0,56	1,82	0,82	24,6
Топчіївка фон	0,77	1,56	1,62	69,0
Топчіївка іскандер	0,95	2,93	2,42	11,5
Топчіївка іскандер фон	0,91	1,20	1,51	18,5

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз отриманих результатів визначення агрохімічних параметрів ґрунту мілітарно порушених ділянок біля населених пунктів Димер, Топчіївка, і Мощун свідчить про деградацію органічної складової та азотного живлення ґрунту, що характерно для зон значного термічного та механічного руйнування. Суттєве зменшення мінерального азоту у вирвах обумовлене руйнуванням структури гумусу та інтенсифікацією мінералізаційних процесів одразу після вибуху. Підвищений вміст фосфору може бути техногенного походження або результатом звільнення фосфатів після деструкції органічних зв'язків при дії високих температур в умовах вибуху боєприпасу. Фонові непорушені ділянки демонструють стабільний азотний потенціал та більш збалансоване забезпечення елементами живлення, що підтверджує негативний вплив вибуху на показники родючості ґрунту.

2. У всіх локаціях вирви характеризуються нижчою чисельністю мікроорганізмів, що підтверджує руйнування або стерилізаційний ефект високих температур. Водночас надзвичайно високі значення мікробної активності в Раківці можуть бути пов'язані з надходженням органічних та азотних речовин техногенного походження, які слугують субстратом для мікрофлори.

3. Коефіцієнти направленості мікробіологічних процесів підтверджують загальну тенденцію: у зонах вибухів переважають процеси мінералізації, що зумовлює втрату органічного вуглецю та зниження гумусового балансу. Високий Ктор у точці Раківка вирва свідчить про інтенсивну трансформацію органічної речовини, ймовірно стимульовану доступними вибуховими домішками. Підвищена оліготрофність у Мощуні та Димері вказує на виснаження поживних ресурсів і стресовий стан мікробіоти. Загалом мікробіологічні коефіцієнти посилюють картину деградації ґрунтів, отриману з агрохімічного аналізу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грунтові бактерії та їх функції | Цінність всіх типів ґрунтових бактерій. *АГРОТЕСТ*. URL: <https://agrotest.com/article/zdorov-ya-gruntu-tsinnist-ta-tipi-gruntovih-bakterij/>
2. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко. Київ: ГО Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 32 с. <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary.pdf>
3. Все про забруднення земель в Україні внаслідок воєнних дій. Куркуль – онлайн-асистент фермера. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/1423-chi-mojna-vilikuвати-grunt-vid-viyni--vidpovid-na-nauposhirenishi-zapitannya>
4. Забруднення земель внаслідок агресії росії проти України / А. Сплодитель, О. Голубцов, С. Чумаченко, Л. Сорокіна Київ: ГО Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 154 с. <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>
5. Ізвошківа А. У ДСНС розповіли про обсяги забруднення України вибухонебезпечними предметами. Суспільні новини. 2023. URL: <https://suspilne.media/445278-u-dsns-rozpovili-pro-obsagi-zabrudnenna-ukraini-vibuhonebezpecnimi-predmetam>
6. Карпенко В. П., Притуляк Р. М., Полторецький С. П. Елементи біологізації в рослинництві: монографія.; за ред. В. П. Карпенка. Умань: «Сочінський М. М.», 2017. 112 с. <https://lib.udau.edu.ua/items/63858beb-83fa-4dd5-92f2-fabc91a6bc3b>
7. Симочко Л. Ю., Симочко В.В., Бігарій І.Й. Спрямованість мікробіологічних процесів у ґрунті агробіоценозів при застосуванні різних

агрозаходів. *Наук. вісник Ужгородського ун-ту*. 2010. № 28. С. 37–45.  
<https://dspace.uzhnu.edu.ua/items/a7987010-cee7-4822-bf51-a04526ebc0a0>

8. Lugtenberg, B., Kamilova, F. Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 2009, vol. 63, pp. 541–556.  
[https://www.researchgate.net/publication/229138683\\_Plant-Growth-Promoting\\_Rhizobacteria](https://www.researchgate.net/publication/229138683_Plant-Growth-Promoting_Rhizobacteria)

9. Кведорець С. П., Криворучко С. І., Кведорець Г. І., Саблук В. І. *Особливості формування чисельності мікроорганізмів та спрямованість мікробних процесів ґрунту за вирощування пшениці озимої*. Сільськогосподарська мікробіологія. 2015. №1. С. 106–114.

10. Кведорець С. П., Криворучко С. І., Кведорець Г. І. та ін. *Питомі втрати азоту й вуглецю як показник спрямованості процесів мінералізації–синтезу органічної речовини в агроземах*. Сільськогосподарська мікробіологія. 2019. №2. С. 63–71.

11. *Методологічні аспекти сталого розвитку агроєкосистем в умовах сучасних кліматичних змін: науково-методичний посібник з оцінювання ґрунтового біорізноманіття* / авт. кол.: Волкогон В. В., Надточій О. В., Тоцький Л. М. та ін. Київ: Аграрна наука, 2021. 150 с.

12. Білявська Н. О., Булигіна С. Ю., Пасічник Н. І. та ін. *Спрямованість та інтенсивність мікробіологічних процесів у забрудненому нафтопродуктами темно-сірому опідзоленому ґрунті*. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2010. № 4. С. 83–86.

13. Шевченко М. В. *Спрямованість мікробіологічних процесів у ґрунті за різних систем удобрення в умовах Лісостепу України* : автореф. дис. ... канд. с.-г. наук : 06.01.03. Інститут землеробства УААН. Чабани, 2004. 20 с.

14. Шевченко М. В., Гопцій Т. І., Бобро А. А. *Мікробіологічний моніторинг ґрунту природних екосистем та агроценозів* : монографія. Харків, 2013. 224 с.

15. Позняк, С. П. *Ґрунтознавство і географія ґрунтів: підручник*. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. 416 с.
16. Jenkinson, D. S., & Coleman, K. A conceptual framework for the dynamics of soil organic matter in arable soils. *European Journal of Soil Science.*, 1994, 45(3), 355–364.
17. Paul, E. A. Dynamics of soil organic matter: a review. *Soil Science Society of America Journal.*, 2001, 66(1), 1–15.
18. Ponomareva, V. V., & Nikolaeva, L. F. Patterns of humus formation in soils of different types. *Soviet Soil Science.*, 1985, 17(6), 33–40.
19. Symochko L., Demyanyuk O., Crisan V., Dinca L. Microbial transformation of soil organic matter under varying agricultural management systems in Ukraine. *Frontiers in Microbiology.*, 2024 Jan 11;14:1287701. doi: 10.3389/fmicb.2023.1287701.
20. Писаренко, П. В., Самойлік, М. С., Галицька, М. А., Диченко, О. Ю., & Тараненко, С. В. (2022). Дослідження впливу техногенного забруднення внаслідок воєнних дій на показники ґрунту агроценозів. *Аграрні інновації*, (14), 94-102.
21. Балюк, С. А., Кучер, А. В., Солоха, М. О., & Соловей, В. Б. (2024). Оцінювання впливу збройної агресії РФ на ґрунтовий покрив України. *Український географічний журнал*, (1), 7-18.
22. Михайлюк, В. І. (2024). Вплив воєнних дій на вміст органічної речовини і елементів живлення в ґрунтах півдня України. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*, 29(1 (44)), 109-123.
23. Чайка, Т. О., & Короткова, І. В. (2022). Відновлення родючості ґрунту в Україні після воєнних дій. *Захист і відновлення екологічної рівноваги та забезпечення самовідновлення екосистем: колективна монографія*, 232-281.
24. Михайлюк, В. (2024). Вплив воєнних дій на ґрунтовий покрив та проблеми його оцінювання. *Міністерство освіти і науки України*, 279.

25. Кратко, О. В., Головатюк, Л. М., & Бондаренко, Т. Є. (2023). Вплив воєнних дій на водне, ґрунтове та повітряне середовище України. *Екологічні науки: науковопрактичний журнал. К.: Видавничий дім «Гельветика», (47), 157-162.*

26. Крайнюков, О. М., & Філатов, В. М. (2024). Оцінка мілітарного впливу на ґрунти в районі бойових дій. *Рекомендовано до друку рішенням Науково-методичної ради Харківського національного університету імені ВН Каразіна (протокол № 2 від 24.10. 2024 р.) Посвідчення УкрІНТЕІ МОН України № 553 від 17 грудня 2023 р. Редакційна колегія, 36.*

27. Разанов, С. Ф., Разанова, А. М., Разанов, О. С., & Куценко, М. І. (2025). Біоіндикація порушених унаслідок воєнних дій ґрунтів у період високого ризику проведення контролю за техногенним навантаженням на сільськогосподарські угіддя. *Науково-виробничий журнал "бджільництво України", (14), 81-87.*

28. Вплив воєнних дій на стан ґрунту, розвиток рослин та урожай – SuperAgronom.com. *Superagronom.com*. URL: <https://superagronom.com/cards/vpliv-voyennih-diy-na-stan-gruntu-rozvitok-rosli-id29816> (дата звернення: 15.11.2025).

29. Гнізюк, М. Р., & Дрозд, О. М. (2023). Вплив воєнних дій на потенціал екосистемних функцій лісових ґрунтів (на прикладі Ізюмської територіальної громади). *Редакційна колегія, 184.*

30. Демченко А. В. Вплив бойових дій на стан ґрунтів в областях України, що постраждали від повномасштабного вторгнення : кваліфікаційна робота ступеня вищої освіти «Бакалавр» : 101, Екологія / Артем Віталійович Демченко ; наук. кер. Т. В. Ананьєва ; Дніпровський держ. аграр.-екон. ун-т. Факультет водогосподарської інженерії та екології , Кафедра екології. – Дніпро, 2023. – 57 с

31. Матківський, М. П. (2024, January). Section: Chemistry Зміни хімічного складу ґрунтів внаслідок впливу воєнних дій. In *VIII International scientific and practical conference «Scientific Research as a Mechanism of Effective Human*

*Development»(January 31-February 2, 2024) Sofia, Bulgaria, International Scientific Unity. 2024. 379 p. (p. 51).*

32. Ільків, Л. А., & Пацьора, М. О. Вплив воєнних дій на земельні ресурси аграрних підприємств України. In *The XXX International Scientific and Practical Conference «Modernity and current problems of society regarding the development of science», July 31–August 02, Graz, Austria. 191 p. (p. 33).*

33. Бережняк, Є. М., Бондарь, В. І., Наумовська, О. І., Ракоїд, О. О., Клепко, А. В., Ладика, М. М., ... & Дем'янюк, О. С. (2024). Аналіз прояву деградаційних процесів ґрунтового покриву Київської області за впливу воєнних дій. *Збалансоване природокористування*, (4), 116-128.

34. Вплив воєнних дій на стан ґрунтів в Україні – Агробізнес сьогодні. *Агробізнес сьогодні*. URL: <https://agro-business.com.ua/zberezhennia-hruntu/item/31567-vplyv-voiennykh-dii-na-stan-gruntiv-v-ukraini.html> (дата звернення: 17.11.2025).

35. Dehtiarov, V. V., & Konshyn, R. V. (2023). Вплив воєнних дій на фізичний стан чорноземів типових лівобережного лісостепу України. *Дегтярьов ВВ, д-р с.-г. наук, професор, головний редактор РОМАНОВ ОВ, канд. с.-г. наук, доцент, заступник головного редактора. ГОПЦІЙ ТІ, д-р с.-г. наук, професор, БОБРО МА, д-р с.-г. наук, чл.-кор. НААН України, професор; ВЕСЕЛІН Ілієв Кутев, д-р біол. наук, професор, Лісотехнічний університет, Болгарія, 90.*

36. Гавва, Д. В., & Крохін, С. В. (2024). Використання дистанційних методів діагностики ґрунтів при обстеженні територій, що зазнали впливу воєнних дій. *Редакційна колегія*, 16.

37. Харченко, С. О. (2025). Вплив військових дій на стан ґрунтів України. 253-257.

38. Кратко, О. В., & Кратко, С. В. (2023, February). Вплив воєнних дій на навколишнє природне середовище України. In *The 5th International scientific and*

*practical conference “Prospects of modern science and education” (February 07–10, 2023) Stockholm, Sweden. International Science Group. 2023. 664 p. (p. 63).*

39. Соркіна, Д. К., & Баранова, А. О. (2022). *Вплив воєнних дій на навколишнє середовище* (Doctoral dissertation, Національний технічний університет" Харківський політехнічний інститут"). С. 362.

40. Бойко, М., & Гальчук, І. (2023). *Вплив бойових дій на родючість українських ґрунтів* (Doctoral dissertation). С. 117.