

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра екології та природозахисних технологій

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Леонід ПЛЯЦУК
(підпис)

_____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр
зі спеціальності 101 «Екологія» освітньо-професійної програми
«Екологія та охорона навколишнього середовища»
на тему:

БІОРЕМЕДІАЦІЯ ҐРУНТІВ,
ПОШКОДЖЕНИХ/ЗАБРУДНЕНИХ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ
ДІЙ, ЗА ДОПОМОГОЮ БІОПРОДУКТІВ

Здобувачки групи ОС-01 Кулик Надії Сергіївни

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Надія КУЛИК
(підпис)

Керівник – доцент

_____ Ірина АБЛЄЄВА
(підпис)

Суми – 2024

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра екології та природозахисних технологій
Спеціальність 101 «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою _____

“ ____ ” _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студентові Кулик Надії Сергіївні Група ОС-01

1. Тема кваліфікаційної роботи: Біоремедіація ґрунтів, пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій, за допомогою біопродуктів.
2. Вихідні дані: БД Scopus та WoS для пошуку статей за темою роботи. Національна академія аграрних наук України, наукові статті.
3. Перелік обов'язкового графічного матеріалу:
 1. Стан ґрунтів в Україні внаслідок воєнних дій.
 2. Методи відновлення ґрунтів, їх особливості, переваги, недоліки.
 3. Візуалізація рекомендацій щодо застосування методів для відновлення ґрунтів за допомогою біопродуктів: дигестату, біочару та компосту.

4. Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

№	Етапи і розділи проектування	ТИЖНІ					
		1	2	3	4	5	6
1	Літературний огляд	+	+				
2	Аналіз проблеми			+			
3	Оброблення результатів				+		
4	Розділ з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях					+	
5	Оформлення роботи						+

Дата видачі завдання 3.04.2024 р.

Керівник _____

Доцент, д.т.н., доцент Аблєєва І. Ю.

АНОТАЦІЯ

Структура та обсяг випускної кваліфікаційної роботи бакалавра. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання, який містить 48 найменувань. Загальний обсяг бакалаврської роботи становить 63 сторінки, у тому числі 3 таблиці, 14 рисунків, перелік джерел посилання 6 сторінок.

Мета роботи – визначення ефективності біоремедіації ґрунтів, пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій, за допомогою біопродуктів.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та виконано такі *завдання*: охарактеризувати вплив воєнних дій на властивості та структуру ґрунтів та ґрунтову мікробіоту; проаналізувати сучасні методи відновлення ґрунтів за допомогою дигестату та вибрати оптимальний для даного дослідження; дослідити властивості біочару для ремедіації ґрунтів з використанням різних видів сировини; визначити механізм впливу компосту на властивості ґрунтів; порівняти біопродукти для ремедіації ґрунтів пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій.

Об'єкт дослідження – проблематика пошкодження/забруднення ґрунтів внаслідок воєнних дій.

Предмет дослідження – вплив та ефективність застосування трьох основних біопродуктів (анаеробний дигестат, біочар та компост) під час проведення біоремедіації пошкоджених/забруднених ґрунтів.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано методи відновлення ґрунтів за допомогою дигестату, біочару та компосту. Виконано аналіз впливу воєнних дій на властивості та структуру ґрунтів та ґрунтову мікробіоту. Розроблено рекомендації щодо особливостей застосування досліджуваних методів для відновлення ґрунтів.

Ключові слова: БІОРЕМЕДІАЦІЯ ГРУНТІВ, БІОЧАР, ВОЄННІ ДІЇ, ДИГЕСТАТ, ЗАБРУДНЕННЯ ГРУНТІВ, КОМПОСТ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ДОСЛІДЖУВАНОЮ ТЕМАТИКОЮ ...	7
1.1 Аналіз впливу воєнних дій на ґрунт.....	7
1.2 Визначення та класифікація забруднень.....	9
1.3 Опис підходів до відновлення порушених ґрунтів.....	16
1.4 Постановка завдань дослідження	18
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ РЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ.....	19
2.1 Механізм відновлення ґрунтів за допомогою дигестату.....	19
2.2 Властивості біочару для ремедіації ґрунтів	21
2.3 Механізм впливу компосту на властивості ґрунтів.....	24
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ БІОПРОДУКТІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТІВ.....	26
3.1 Результати щодо зв'язування важких металів різними біопродуктами	26
3.2 Вплив біопродуктів на відновлення властивостей ґрунту	35
3.3 Ефективність очищення ґрунту за допомогою біоремедіації	38
3.4 Рекомендації щодо особливостей застосування досліджуваних методів для відновлення ґрунтів.....	41
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	46
4.1 Безпека в надзвичайних ситуаціях при виробництві дигестату	46
4.2 Наслідки під час застосування біочару на робочому місці.....	48
4.3 Охорона праці при виробництві компосту	49
ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	53
ДОДАТКИ	59

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№попд.	

ОС 20510040

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата		Літ.	Аркуш	Аркушів
		Кулик			Біоремедіація ґрунтів, пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій, за допомогою біопродуктів			
		Аблесва					4	63
		Батальцев				СумДУ, ф-т ТеСЕТ гр. ОС-01		
		Пляцук						

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Військова діяльність негативно впливає на властивості ґрунту, повільне відновлення яких значно ускладнює екологічну ситуацію.

З військовими діями пов'язані три основні типи забруднень: фізичне, хімічне та біологічне. Фізичні порушення ґрунту викликані: його ущільненням в результаті будівництва інфраструктури, риттям траншей або тунелів, ущільненням в результаті переміщення техніки, обладнання та військ або утворенням вирв через бомби. Хімічні порушення включають вплив таких забруднювачів, як нафта, важкі метали, нітроароматичні вибухові речовини, діоксини з гербіцидів або радіоактивні елементи. Біологічні порушення є побічним ефектом зміни фізичних і хімічних властивостей ґрунту або навмисного введення мікроорганізмів, які є смертельними для тварин та людей (наприклад, ботулін або сибірська виразка).

Структура, склад і біологічні властивості ґрунтів можуть суттєво змінитися під час бойових дій у воєнний час і можуть знадобитися роки чи навіть століття, щоб повністю відновити деякі з їхніх властивостей. Без відповідних методів рекультивациі деякі функції ґрунтів можуть бути остаточно втрачені. Такі методи часто є надзвичайно дорогими, і, як у випадку забруднення діоксином або радіонуклідами, рекультивациа може навіть призвести до повного видалення забрудненого ґрунту та заміни ґрунтовим матеріалом з іншого місця.

Проблема біоремедіації ґрунтів, пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій, за допомогою біопродуктів стає все більш актуальною в Україні та світі. Відновлення ґрунтів за допомогою дигестату, біочару та механізм впливу компосту на властивості ґрунтів є ефективними та важливими для вирішення цього завдання.

Інв. № докл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			5

Мета роботи – визначення ефективності застосування біопродуктів для біоремедіації ґрунтів, пошкоджених або забруднених внаслідок воєнних дій.

Об’єкт дослідження – процеси пошкодження та забруднення ґрунтів під час воєнних дій, а також відновлення їх властивостей у результаті застосування біоремедіації.

Предмет дослідження – вплив та ефективність застосування трьох основних біопродуктів (анаеробний дигестат, біочар та компост) під час проведення біоремедіації пошкоджених/забруднених ґрунтів.

Методи дослідження: аналіз наукової літератури та законодавчої бази щодо використання біопродуктів та їх застосування для ремедіації ґрунтів; літературний огляд; порівняльно-описовий метод.

Для досягнення зазначеної мети поставлено та вирішено такі завдання дослідження:

- охарактеризувати вплив воєнних дій на властивості та структуру ґрунтів та ґрунтову мікробіоту;
- проаналізувати сучасні методи відновлення ґрунтів за допомогою дигестату та вибрати оптимальний для даного дослідження;
- дослідити властивості біочару для ремедіації ґрунтів з використанням різних видів сировини;
- визначити механізм впливу компосту на властивості ґрунтів;
- порівняти біопродукти для ремедіації ґрунтів пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій.

Результати дослідження у межах кваліфікаційної роботи апробовано на XI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 23–26 квітня 2024 р.) з публікацією тез на тему «Органічна речовина дигестату та її роль у біоремедіації забруднених ґрунтів».

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подел.	

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			6

РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ДОСЛІДЖУВАНОЮ ТЕМАТИКОЮ

1.1 Аналіз впливу воєнних дій на ґрунт

Люди впливають на ґрунти головним чином через сільськогосподарську діяльність і урбанізацію. Наслідки військових дій, як правило, вважаються спустошенням надземного світу: міста руйнуються, харчові ланцюги порушуються, а добробут тих, хто вижив, різко знижується. Потенціал для відновлення екологічної та соціальної рівноваги значною мірою залежить від впливу війни на якість ґрунтів. Наслідки зазвичай негативні, починаючи від короточасного зниження родючості та закінчуючи повною втратою ґрунту.

Згідно з офіційним ресурсом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України станом на 01.05.2024 року можна оцінити завдані збитки земельним ресурсам. Площа засмічення земель – 19 224 820 м², шкода оцінюється в 1,06 трлн грн. Площа забруднення ґрунтів – 805 176 м², шкода оцінюється в 16,17 млрд грн [1].

Погіршення хімічного складу ґрунту часто є результатом військових дій, втрати людей, пошкодження інфраструктури чи посівів та зрив військових навчань. Підвищений людський тиск на місці призначення може призвести до серйозних екологічних проблем, оскільки це часто означає надмірну експлуатацію природних ресурсів. Наприклад, вирубування лісів і опустелювання.

Фізичний вплив на ґрунт і викид бойових хімічних речовин може призвести до значних змін у складі та активності ґрунтової біоти. Однак більш рідкісним і менш відомим впливом військових дій на ґрунт є введення дуже небезпечних патогенів або токсинів. Звичайно, мішенню є люди, але біологічна зброя також передбачає певні зміни ґрунтової біоти, коли патоген потрапляє в ґрунт. У

Підп. і дата
Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дата
Інв.№подел.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ОС 20510040		Арк
							7

результаті ґрунт стає непридатним для функції середовища існування організмів та родючості.

Зона згідно з комплексним картографічним зведенням бойових дій та знаходження російських окупаційних військ, що були зібрані українськими користувачами, з урахуванням прифронтової буферної території. На рисунку 1.1 зображена мапа Українських агроландшафтів в контексті російської військової агресії. Більш темний колір позначає агроландшафти України в зоні ризикового сільського господарства [2].

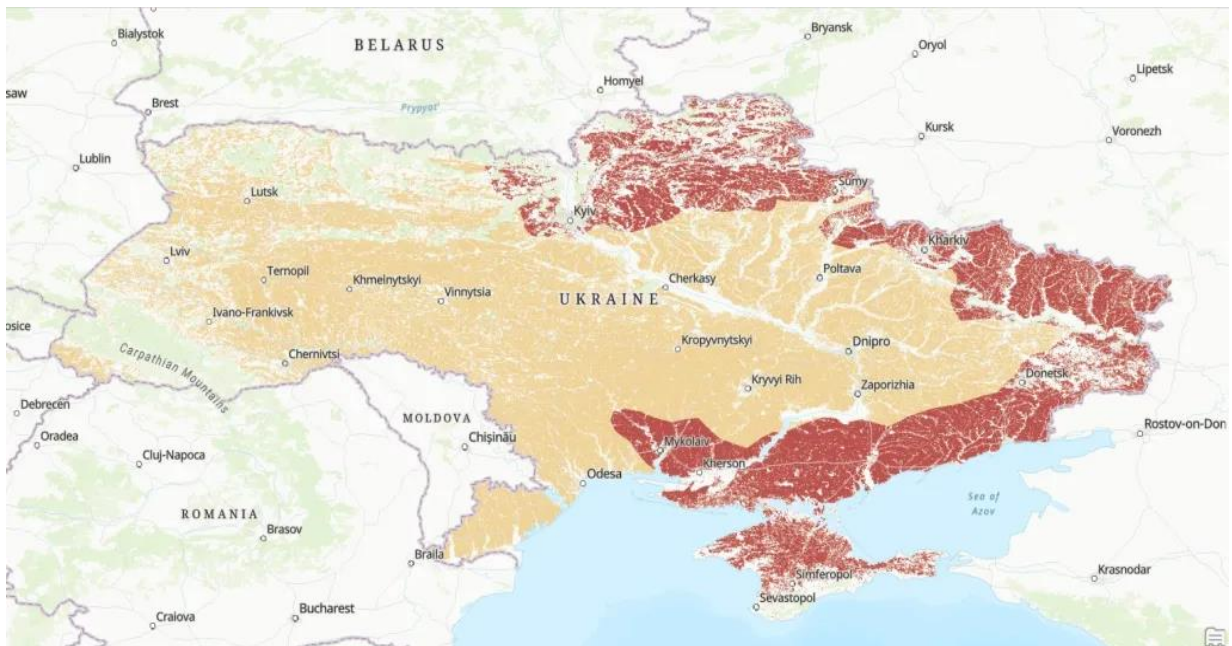


Рисунок 1.1 – Мапа Українських агроландшафтів в контексті російської військової агресії

Вплив військових дій на навколишнє середовище часто недооцінюється, оскільки втрати людських життів та інфраструктури перевищують усе інше в короткостроковій перспективі. Однак погіршення деяких важливих властивостей ґрунту може бути досить тривалим і серйозним, що значно знижує продуктивність та інші важливі властивості ґрунту. Стародавні конфлікти в основному включали фізичні зміни в ґрунті на полі бою або для оборонних цілей. Зараз зростає ризик повного знищення у зоні бойових дій хімічною чи біологічною зброєю.

Підп. і дата
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.
Підп. і дата
Інв.№подл.

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ОС 20510040	Арк 8
-----	-----	----------	-------	------	-------------	----------

1.2 Визначення та класифікація забруднень



Рисунок 1.2 – Основні типи порушення ґрунту, викликаного військовими діями, через пряме пошкодження або непрямий вплив [3]

1. Фізичні порушення ґрунтів викликані воєнними діями

Утворення тріщин внаслідок запеклих боїв на території України, які порушують цілісність ґрунту через розриви від бомбардування, обстрілів ракетами, артилерійськими снарядами та мінами, що призводить до утворення глибоких вирв та урвищ, які порушують природню цілісність генетичних горизонтів, що впливає на зміну рельєфу на значних площах на півночі, сході та півдні країни.

Закопані протитанкові та протипіхотні міни також можуть спричинити порушення ґрунту, якщо вони вибухнуть. Саме розміщення міни може призвести

Інв.№лодл.	Підп. і дата
Взаєм.інв.№	Підп. і дата
Інв.№дубл.	Підп. і дата

до значного порушення ґрунту. Після її активації ґрунт навколо міни швидко забруднюється осколками металу, пластику та залишками вибухових речовин [3].

Військова техніка (танки, БТР) залишала і продовжує залишати свій слід на багатьох полях битв в Україні. У Сполучених Штатах було проведено кілька досліджень із визначення впливу військової техніки на ґрунт. На прикладі гусеничного танка М1А1 масою 57,2 тонни, який рухався зі швидкістю 8 км/год і шириною гусениці 63,5 см, порівнювали вплив військової техніки на пілуватих суглинках і важкосуглинкових ґрунтах (рис 1.3). Результати показують, що пілуваті суглинкові ґрунти зазнають на 1,4–7,3% більше негативного впливу механічного руху, ніж важкосуглинкові ґрунти. При цьому ступінь ущільнення ґрунту залежить від кількості проходів техніки і коливається від 5,6% до 14,4% на пілуватих суглинках і від 1,7% до 16,5 % на важкосуглинкових ґрунтах.

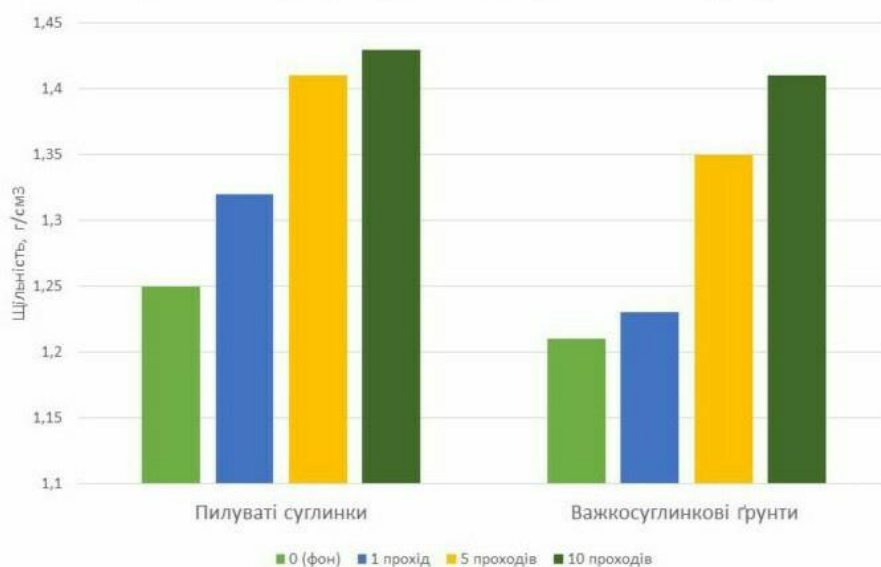


Рисунок 1.3 – Ущільнення від проходження танку М1А1 на різних типах ґрунту

Доречно визнати, що цей тип ґрунтів в Україні поширений у регіонах, які пережили військові дії. У зв'язку з цим пілуваті суглинки розташовані переважно в північних районах Київської, Сумської та Чернігівської областей. Важкосуглинкові ґрунти переважають у Миколаївській, Запорізькій та

Інв.№поذل.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Харківській областях. Однак це розрізнення залежить від типу ґрунту, оскільки на одному полі можуть бути присутні кілька типів ґрунту.

Підтверджено, що в результаті розриву снаряда в полі також створюється вибухова хвиля, що здійснює хімічне забруднення і, як наслідок, утворюються вирви, ущільнюється ґрунт, знищується рослинність (в тому числі утворюється гідрофобний шар на невеликих глибинах, який обмежує інфільтрацію води), і гине ґрунтова фауна. Таким чином, режим гідролізу змінюється і структура ґрунту руйнується, можливі невеликі зсуви та селеві потоки, що в кінцевому підсумку призводить до ерозії ґрунту та опустелювання.

Ущільнений ґрунт структурно пошкоджений, оскільки змінилася інтенсивність процесів, які переважали в довоєнному ґрунтовому ландшафті (гуміфікація, вивітрювання, вилуговування, колообіг вологи). Швидкість регенерації ґрунту повільна, оскільки середня глобальна швидкість утворення ґрунту становить близько 0,06 мм на рік [4].

2. Хімічні забруднення ґрунтів викликані воєнними діями

Хімічні речовини (сполуки, що не піддаються біологічному розкладанню), які використовуються у військовій зброї та вибухових речовинах, можуть негативно впливати на ґрунт і водне середовище, що може призвести до проблем зі здоров'ям і значних змін в екосистемі [5].

Усе це призводить до того, що зони інтенсивних конфліктів, військових навчань, стрільб та виробництв вибухових матеріалів та боєприпасів вважають один з головних джерел забруднення екосистем [6]. Забруднення включають великий перелік органічних і неорганічних речовин у ґрунті та воді, які потенційно можуть становити серйозну загрозу для здоров'я людини та навколишнього середовища. Наприклад, після перебування в навколишньому середовищі більшість потенційно токсичних елементів (ПТЕ) у боєприпасах схильні до окиснення при контакті з повітрям, особливо це стосується вологого середовища. Завдяки їхній покращеній розчинності в певних хімічних середовищах вони стають мобільні та доступні. Можливість впливу на людину

Інв.№подел.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
-------------	--------------	-------------	------------	--------------

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			11

призводить до несприятливих наслідків, включаючи пошкодження життєво важливих органів, таких як печінка та нирки, патологію еритроцитів і подразнення епітеліальних тканин [6].

Забруднення ґрунту важкими металами може мати значні довгострокові наслідки. Наприклад, кулі можуть викидати свинець, який поглинають рослини. Свинець, розповсюджується у різних фракціях ґрунту, тому на початку може бути інертним, але згодом через зміну умов ґрунту (рН, вологість) стає реакційноздатним.

Окрім свинцю (Pb) із залишками зброї у ґрунт потрапляють інші метали, такі як: сурма (Sb), хром (Cr), нікель (Ni), цинк (Zn), кадмій (Cd), миш'як (As), ртуть (Hg), уран (U), 2, 4-динітротолуол (DNT), 2, 4, 6-тринітротолуол (TNT), 1, 3, 5-тринітро-1, 3, 5-триазациклогексан (RDX) [7, 8]. Значна кількість цих сполук є стійкими до біологічного розкладання або обробки і залишаються в біосфері, стаючи джерелом забруднення, потенційно шкідливим для здоров'я людини та навколишнього середовища через їх негативний вплив [9].

Оцінка еколого-геохімічного стану території воєнно-техногенного навантаження показала, що більшість типів воєнно-техногенного навантаження є потужними забруднювачами ґрунтового покриву і є співставними з їхніми видами впливу. Така ситуація пояснюється специфікою воєнних впливів, яка характеризується використанням та експлуатацією систем озброєння та військової техніки (таблиця А.1) [10].

Про вплив вибухонебезпечного забруднення на довкілля варто згадати дослідження військових дій на сході України (в Амвросіївському та Шахтарському районах Донецької області), проведене міжнародною організацією «Екологія-Право-Людина». За допомогою супутникових знімків було визначено розміри та кількість воронок, оцінено тип снаряду, розрив якого відбувся та масштаби руйнування ґрунтового покриву, а також збитки, завдані державі. Дослідники змогли зробити висновок про утворення 15 505 воронок, які виникли внаслідок розриву снарядів на території, яка має площу 225 км². На місцях з

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

ОС 20510040

Арк

12

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

великою кількістю воронок були змішані шари ґрунту, підстилаючи породу та уламки чавуну. Крім того, в результаті вибуху в навколишнє середовище потрапила велика кількість токсичних речовин. За оцінками, щонайменше 392 тонни металевих уламків розкидано по всій території, що робить ці поля непридатними для сільськогосподарських цілей. Також у навколишнє середовище потрапили інші продукти окиснення не менше 58 тонн вибухових речовин, 70 тонн алюмінію, які утворилися в результаті окиснення порошкоподібного алюмінію, який разом з тротилом застосовують в якості вибухової речовини [11].

Згідно з дослідженням цієї організації проведено хімічний аналіз ґрунту на території заказника «Крейдяна флора» (поблизу міста Слов'янськ). Концентрація титану в зразку ґрунту на момент руйнування снаряда в 150 разів перевищувала фонові показники. Концентрація ванадію становила 100 мг/кг. Сплав на основі титану з додаванням ванадію використовують в авіаційній і ракетній техніці. Дослідники також спостерігали перевищення сульфатів у 2,3 рази, рухомих форм важких металів: кадмію – у 1,5 рази, свинцю – у 1,3 рази. Також в селі Заквітне на місці розривів снаряда виявлено надлишок стронцію, концентрація якого становила 150 мг/кг в місці утворення воронки загальною площею 12 м². Концентрація кадмію в цій же пробі в 9 разів перевищувала норму, а для сульфатів – у 4 рази. На місцях розривів снарядів у Донецькій області задокументовано надлишок рухомих форм важких металів, зокрема марганцю, міді, заліза, свинцю, цинку, кадмію та хрому [12].

3. Біологічні порушення ґрунту викликані воєнними діями

Природна рослинність місцевості може бути сильно пошкоджена від вибухів, також рослинності залишиться дуже мало. Вибухи також можуть знищити водонепроникний шар корінних порід, який збільшує просочування води в ґрунт, вода в ньому не затримується оскільки сильно розмиває стінки вирв. Це прискорює відкладення органічної речовини всередині ґрунту через збільшення мікро- та макрофауни, але також сприяє закисленню, а не збагаченню [13]. Це також дозволяє агресивним забруднювачам потрапляти у водоносні

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подел.	

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			13

горизонти та водні шляхи, деякі з яких можуть переноситися далеко за межі поля бою, погіршуючи біоту та екосистемні послуги, від яких залежать люди.

Для більш детального розуміння механізму впливу детонації боєприпасів на навколишнє середовище пропонується схема (рис 1.4) [14]. Спостерігаючи ланцюжки реакцій бачимо, що наслідок ерозії ґрунтів – це втрата родючого шару та вивільнення накопиченої в ньому органіки в атмосферу, що є головною причиною глобальних змін клімату та опустелювання.

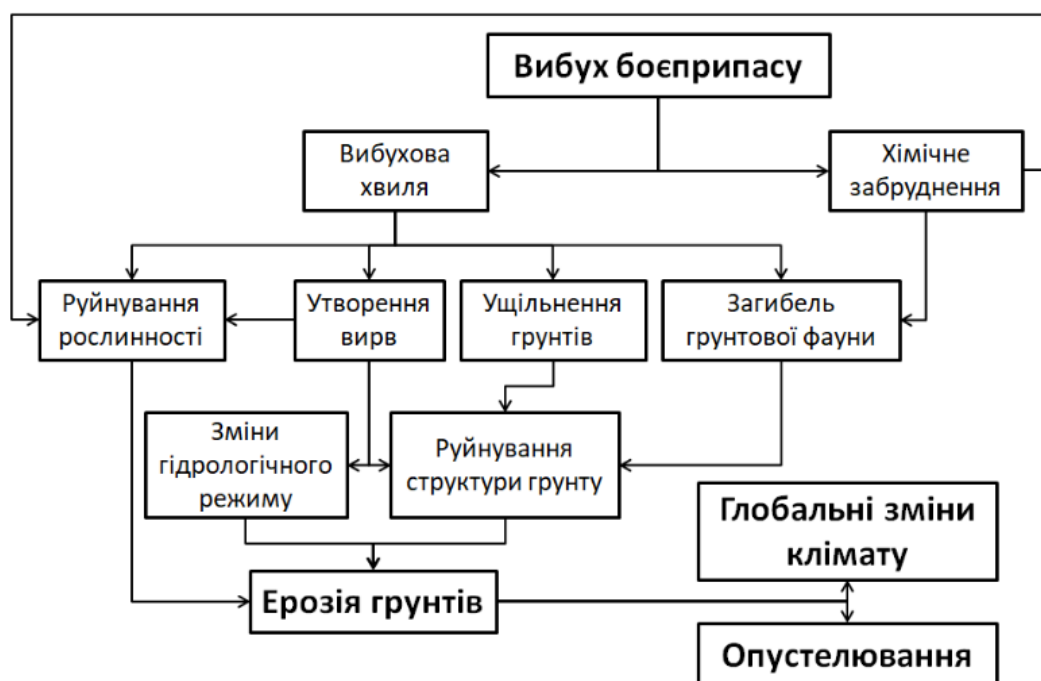


Рисунок 1.4 – Схема впливу детонації боєприпасів на довкілля

Військова техніка знищується, перетворюючись на тонни металобрухту, тобто канцерогенних відходів, що становить небезпеку. Після закінчення війни утилізація великої кількості металобрухту стане ще одним викликом, адже це є досить складним і трудомістким процесом.

Іншим важливим впливом військових дій на ґрунт є негативний вплив на ріст сільськогосподарських культур та забруднення врожаю, внаслідок потрапляння важких металів у ґрунт і через нього в сільськогосподарські культури, що знижує їх продуктивність та якість [15]. В такому випадку продукти рослинного походження мають меншу поживну цінність та підвищену

Інв.№подел.	Підп. і дата
Взаєм.інв.№	Підп. і дата
Інв.№дубл.	Підп. і дата

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ОС 20510040

Арк

14

концентрацію токсичних елементів, що може негативно впливати на здоров'я людей.

Важкі метали потрапляють у рослини з ґрунту через кореневу систему, важкі метали можуть рухатися активно (метаболічним шляхом) або пасивно. У випадку активного руху поглинання і переміщення іонів металів здійснюється системою, що складається з протопластів клітин, пов'язаних плазмодесмами. При пасивному транспорті іони рухаються по рослині разом з транспіраційним струмом. Деякі метали переміщуються по рослині разом з активним транспортом, деякі метали виконують певні біологічні функції (мідь, цинк, кобальт), а також метали, хімічно схожі з необхідними елементами (кадмій є хімічним аналогом цинку). Однак більшість металів, які не є необхідними для рослин (свинець), переміщуються шляхом дифузії. При контакті з клітинними стінками і певними мінеральними й органічними сполуками, присутніми в клітинах, метали осідають і втрачають біологічну активність. У той же час, коли ґрунт забруднений великою кількістю металів, деякі з цих металів можуть обійти захисну систему рослин і бути токсичними для них.

Вважається, що важкі метали негативно впливають на фотосинтезуючі пігменти, через це рослини страждають від такої хвороби, як хлороз. З метою експериментального дослідження [16] впливу важких металів (хрому, свинцю та міді) на фотосинтетичний апарат рослин використовували їх концентрацію від 1 до 30 ГДК. Встановлено, що через кореневу систему вони не чинять пригнічувальної дії на фотосинтетичний апарат рослин, оскільки показники співвідношення хлорофілів а та b (Chl a/b) знаходяться в межах від 3,2 до 3,7 за нормального діапазону від 2,5 до 3,0. При досліді з аеральним нахожденням важких металів на листки рослин, результати показали, що важкі метали не мають негативного впливу на рослини.

У цьому контексті на увагу заслуговує місце України на ринку органічних продуктів, оскільки за останні роки країна входила до п'ятірки найбільших постачальників органічної продукції до ЄС. Одразу після початку

Підп. і дата
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.
Підп. і дата
Інв.№поодл.

					ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата		15

широкомасштабного вторгнення росії на територію України сільськогосподарські виробники були позбавлені доступу щонайменше до 30 % земель, на якій до війни відбувалося органічне виробництво. Значна частина земель, що використовуються для органічного виробництва, розташовані в зонах бойових дій або на землях, що були під окупацією [17, 18].

Зважаючи на це, обрано важкі метали як основні види хімічного забруднення ґрунтів, тому подальші дослідження щодо відновлення ґрунтів спрямовані саме на очищення від важких металів.

1.3 Опис підходів до відновлення порушених ґрунтів

Згідно з порядком визначення шкоди та збитків, завданих Україні внаслідок збройної агресії російської федерації: шкода, завдана земельним ресурсам, – напрям, що включає шкоду від пошкодження і знищення родючого шару ґрунту та шкоду, зумовлену забрудненням і засміченням земельних ресурсів [19].

Основні показники, які оцінюються:

- витрати на рекультивацию земель, які були порушені внаслідок бойових дій, будівництво, облаштування та утримання інженерно-технічних і фортифікаційних споруд, огорож, прикордонних знаків, прикордонних просік, комунікацій для облаштування державного кордону;

- збитки, завдані власникам (землекористувачам) земельних ділянок сільськогосподарського призначення;

- витрати на відновлення меліоративних систем;

- шкода, завдана ґрунтам та земельним ділянкам внаслідок забруднення ґрунтів речовинами, які негативно впливають на їх родючість та інші корисні властивості;

- шкода, завдана ґрунтам та земельним ділянкам внаслідок засмічення земельних ділянок сторонніми предметами, матеріалами, відходами та/або іншими речовинами.

Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подел.

ОС 20510040

Арк

Вип. Арк. № докум. Підп. Дата

16

Забруднення ґрунту важкими металами (Cd, Cr, Hg, Pb, Cu, Zn, As, Co, Ni та Se) та стійкими органічними забруднювачами (СО₃, такими як поліциклічні ароматичні вуглеводні, поліхлоровані біфенілів, поліхлорованих дибензо-р-діоксинів і поліхлорованих дибензофуранів) є проблемою, яка загрожує екологічній стійкості, харчовій безпеці та здоров'ю людини. Щоб контролювати небезпечні наслідки та ідеально відновити екосистемні послуги забруднених ґрунтів, було розроблено низку методів рекультивації *in situ* та *ex situ*, включаючи покриття поверхні, інкапсуляцію, захоронення, промивання ґрунту, вентиляцію ґрунту (розбризування повітря), вакуумна вентиляція (парова екстракція), термічна екстракція, електрокінетична екстракція, хімічна деградація, стабілізація, затвердіння, склування, біоремедіація та фіторемедіація. Ці методи використовують фізичні, хімічні, термічні, електричні та біологічні методи та процеси для утримання, знерухомилення та остаточного усунення забруднень ґрунту. У польовій практиці всі доступні методи демонструють певні переваги та недоліки ефективності відновлення, економічності та застосування.

Було досліджено зміну біочару для зменшення забруднення ґрунту та сприяння його рекультивації. Біочар іммобілізує важкі метали та СО₃ у забруднених ґрунтах і знижує їхню біодоступність переважно через осадження, електростатичну взаємодію, поверхневу адсорбцію, структурну секвестрацію та полегшене розкладання. Ефективність дезактивації залежить від джерела біочару, швидкості поліпшення, типу ґрунту та виду забруднювачів. Більшість дослідницьких випробувань, були короткочасними лабораторними експериментами. Довгостроковий (більше 5 років) вплив зміни біочару на рухливість забруднюючих речовин і біоактивність у польових ґрунтах залишається неясним [20].

Інв. № подел.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			17

1.4 Постановка завдань дослідження

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання дослідження:

- охарактеризувати вплив воєнних дій на властивості та структуру ґрунтів та ґрунтову мікробіоту;
- проаналізувати сучасні методи відновлення ґрунтів за допомогою дигестату та вибрати оптимальний для даного дослідження;
- дослідити властивості біочару для ремедіації ґрунтів з використанням різних видів сировини;
- визначити механізм впливу компосту на властивості ґрунтів;
- порівняти біопродукти для ремедіації ґрунтів пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій.

Інв.№подел.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата					
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ОС 20510040				Арк
									18

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ РЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ

2.1 Механізм відновлення ґрунтів за допомогою дигестату

Дигестат – це побічний продукт процесу анаеробного зброджування після відновлення біогазу. Його можна використовувати як добриво на землі завдяки його чудовим добривним якостям, заснованим на багатому вмісті рослинних макроелементів, включаючи азот (N), фосфор (P), калій (K) і сірку (S), різні мікроелементи, а також органічні речовини (рис 2.1) [21].

Найбільш ефективний підхід до біоремедіації на місці зосереджується на зміні параметрів ґрунту (наприклад, кислотності, лужності, здатності до катіонного обміну), а також на іммобілізації важких металів у міцних хімічних матеріалах шляхом біосорбції, біопреципітації та фіксації або комплексоутворення. У цьому контексті стратегія внесення добрив, заснована на добривах, що не містять важких металів, може як запобігти забрудненню ґрунту, так і відновити вже забруднені ділянки, якщо сполуки в добривах зв’язуватимуть важкі метали. Дигестат анаеробного зброджування органічних залишків наразі широко використовується як біодобриво в ЄС. Крім позитивного впливу на врожайність культур і властивості ґрунту, дигестат містить розчинну органічну речовину, яка відіграє важливу роль для зв’язування важких металів. При внесенні дигестату в ґрунти розчинена органічна речовина впливає на рухливість важких металів, і це потенційно може сприяти відновленню ґрунтових ресурсів.

У цьому контексті використання дигестату анаеробного зброджування може бути перспективною стратегією зниження концентрації біодоступних важких металів у ґрунтах. У той же час поживні речовини в дигестаті можуть замінити частину хімічних добрив, які використовуються для підвищення врожайності.

Підп. і дата					
Підп. і дата					
Взаєм.інв.№	Інк.№дубл.				
Інк.№подл.					

ОС 20510040

Арк

19

Вип. Арк. № докум. Підп. Дата

Дигестат також можна перетворити на продукти з доданою вартістю, такі як біочар, активоване вугілля або композитні матеріали, які є ефективними адсорбентами, здатними відновлювати ґрунти, які забруднені важкими металами. Біочар може мати кілька позитивних впливів на ґрунти, наприклад, іммобілізація іонів важких металів, зберігання вуглецю, стимуляція мікробної активності ґрунту та покращення родючості та якості ґрунту.

Розчинена органічна речовина можна використовувати для біовилуговування важких металів із ґрунтів завдяки наявності карбоксильних, гідроксильних, фенольних і сульфгідрильних груп, які можуть утворювати комплекси з металами. Окрім таких факторів, як тип металу та умови навколишнього середовища, присутність відповідних молекулярних груп у розчинених органічних речовинах є основним фактором, що впливає на властивості зв'язування розчинених органічних речовин та важких металів.

Як альтернатива, спосіб збільшити потенціал дигестату для зв'язування важких металів полягав би у виробництві нових біокомпозитних матеріалів, наприклад, шляхом змішування з неорганічними сполуками, такими як фосфогіпс [22].

Сільське господарство включає найбільш потенційну сировину для анаеробного зброджування. Гній як субстрат для анаеробного зброджування дає відносно низькі виходи біогазу на одиницю вологої ваги, з цієї причини часто сільськогосподарські відходи перероблюються разом з іншою багатою на енергію сировиною, щоб забезпечити більший вихід біогазу. Зазвичай субстрати включають енергетичні культури через їх високий вміст целюлози та геміцелюлози. Силос можна зберігати протягом тривалих періодів часу та використовувати для виробництва біогазу протягом року [23].

Переробка дигестату в сільськогосподарських системах зменшує використання мінеральних добрив, що потім призводить до збереження ресурсів, пом'якшення зміни клімату та підтримки якості ґрунту. Дослідження показали позитивний вплив дигестату на якість ґрунту. Цінність дигестату як поліпшувача

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подел.	

					ОС 20510040		Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			20

грунту можна підвищити, поєднавши його з іншими джерелами органічних і мінеральних добрив. Біочар було змішано з дигестатом, щоб підвищити якість матеріалу [24].

2.2 Властивості біочару для ремедіації ґрунтів

Біочар – це багатий вуглецем продукт, одержаний шляхом піролізу (тобто нагрівання за відсутності O_2 при $300-700^\circ C$) залишкових матеріалів біомаси та використовується як доповнення до ґрунту в сільському господарстві та навколишньому середовищі. Чорна вуглецева тверда речовина є пористою, стійкою до навколишнього середовища та містить велику кількість поверхневих функціональних груп. Відносно висока пористість і поверхнева функціональність створюють біочар з великою питомою поверхнею та здатністю до катіонного обміну, що дозволяє матеріалу утримувати воду, поживні речовини та забруднюючі речовини в ґрунті. Крім того, біочар містить значні частини лабільного органічного вуглецю (OC) і, можливо, поживних речовин для рослин (наприклад, N, P, K, Ca, Mg і S). Лабораторні дослідження та польові випробування продемонстрували, що біочар є ефективним для покращення фізичних, хімічних і біологічних властивостей ґрунту, підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, зниження біодоступності важких металів і органічних забруднень у ґрунті. Біочар використовується для покращення ґрунту, зменшення забруднення, меліорації землі та пом'якшення кліматичних змін [25].

Основні властивості біочару залежать від матеріалу та методів, які використовуються для його створення [26]. Механізми ремедіації біочару передбачають видалення як органічних (поліциклічні ароматичні вуглеводні), так і неорганічних (важкі метали) проілюстровано на рисунку 2.1. Механізми видалення часто визначаються взаємодією забруднюючих речовин з різними властивостями біочару [27].

Інв. № подел.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

						OC 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			21

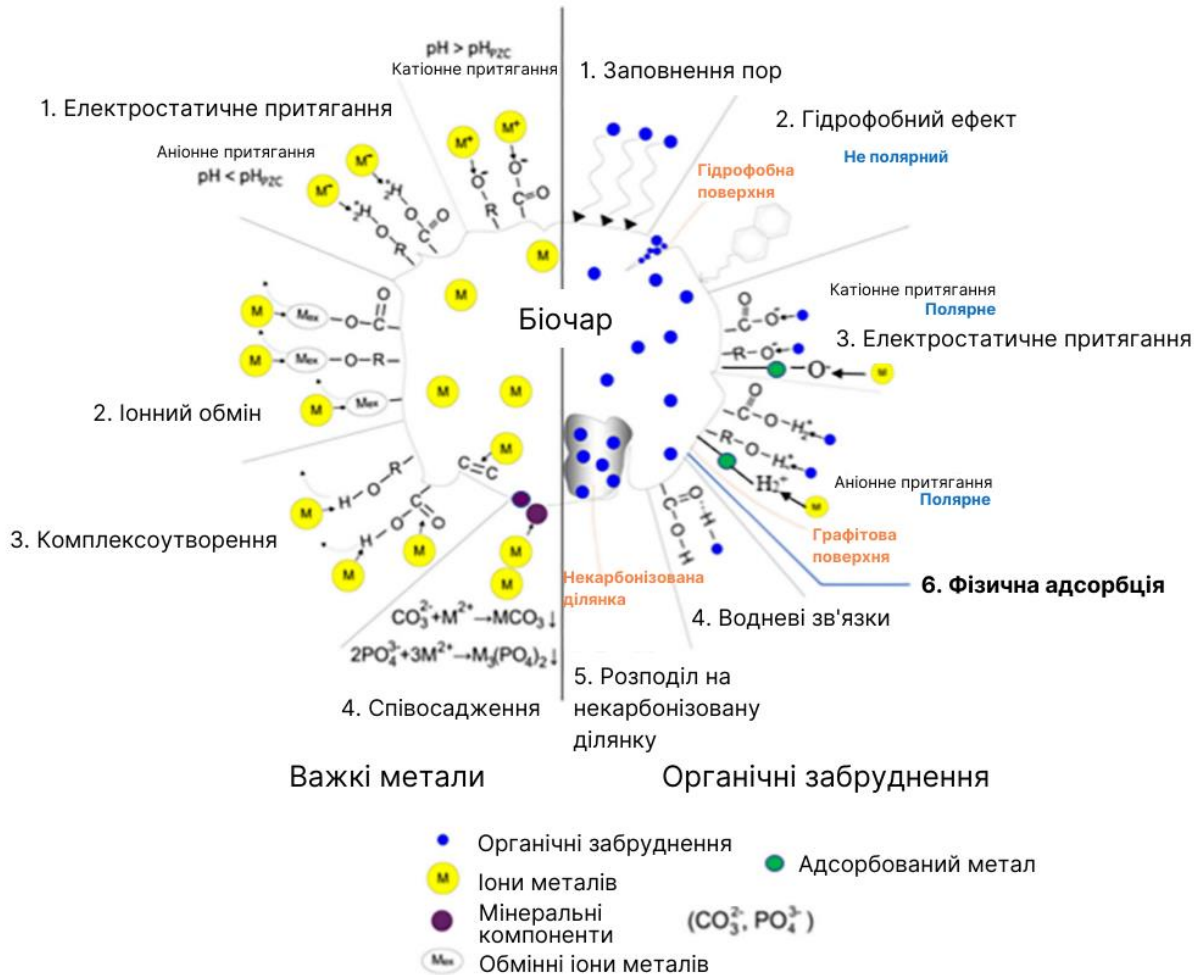


Рисунок 2.1 – Сорбційні взаємодії між біочаром та забруднювачами

На властивості біочару та його придатність для рекультивації ґрунту сильно впливає температура піролізу та тип вихідної сировини (рис 2.2) [27]. Оскільки майже будь-яка форма органічного матеріалу може бути піддана піролізу, нещодавно почали використовувати альтернативну сировину.

Для виробництва біочару компост і тверда фракція анаеробного дигестату є привабливою сировиною завдяки їх доступності та наявності стійких органічних сполук (тобто лігнін), які піддаються термічній деструкції під час піролізу. Хоча кілька досліджень показали, що біочар, отриманий з компосту, або дигестату придатний для видалення металів зі стічних вод, його використання як поліпшувача ґрунту, забрудненого металами, не досліджувалося.

Підп. і дага	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дага	
Інв.№подл.	

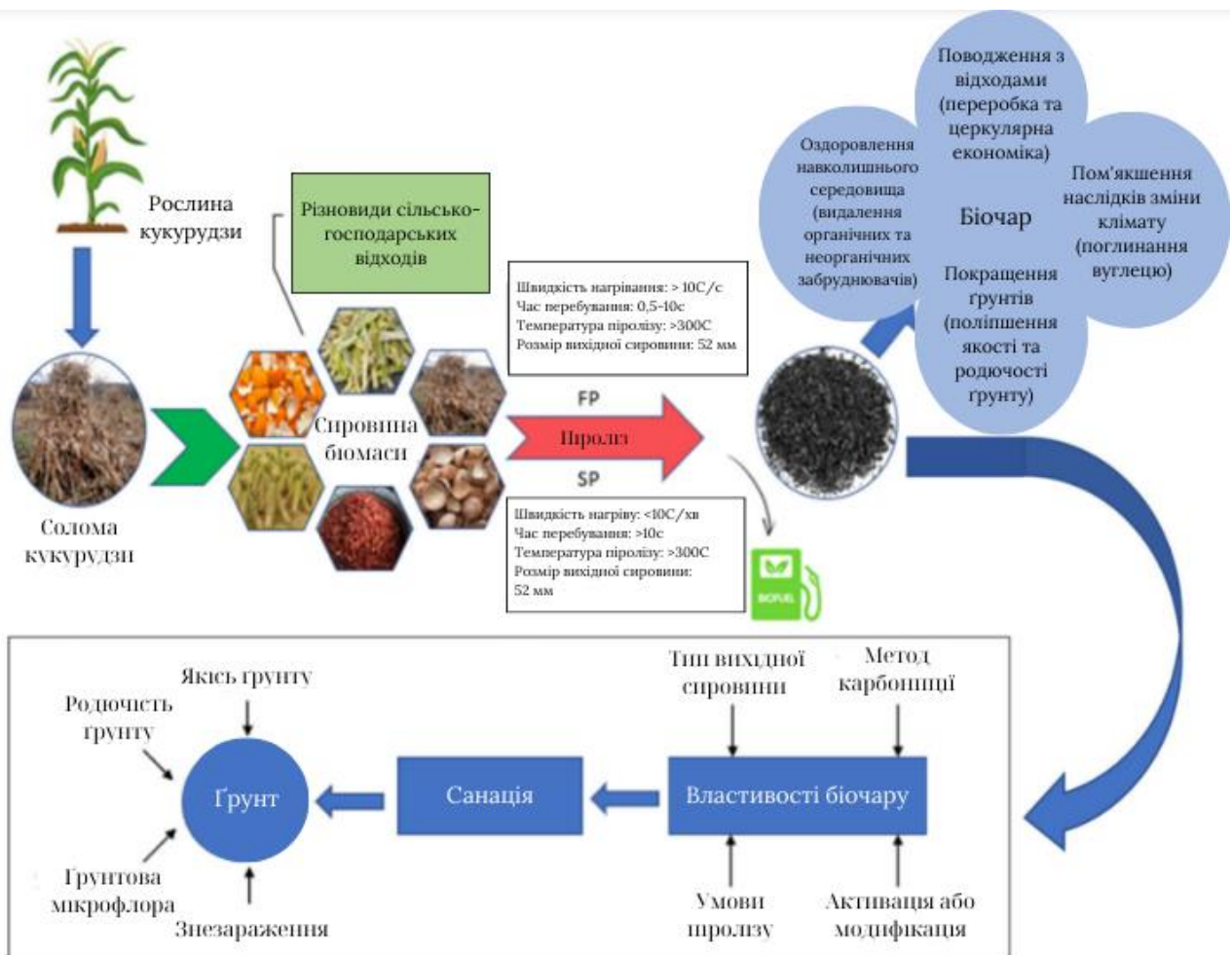


Рисунок 2.2 – Виробництво та застосування біоچارу з повторним використанням біомаси сільськогосподарських відходів

Компост має певні фізико-хімічні властивості (наприклад, вміст лігніну), які є бажаними для піролізу, а піролізований компост може мати вищий рН, таким чином уникаючи потенційного збільшення рухливості металу після доповнення ґрунту непіролізованим компостом. Наприклад, доповнення ґрунту компостом із соснової кори підвищило біодоступність Cu та Zn, що, ймовірно, було пов'язано з низьким рН компосту (рН 5,6) і його низьким коефіцієнтом гуміфікації, що сприяло утворенню розчинних металоорганічних комплексів. Щоб підвищити рН компосту та уникнути цієї проблеми, його можна обвуглити, щоб зменшити кількість розчиненого в ньому органічного вуглецю.

У випадку анаеробного дигестату швидкий розвиток виробництва біогазу робить імовірним те, що виникне потреба в інших способах утилізації дигестату,

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

крім сільськогосподарського використання. Було визначено, як температура піролізу (300 або 600°C) і тип вихідної сировини впливають на фізико-хімічні властивості біочару та їхню придатність для іммобілізації металів у ґрунті. З цією метою порівнювали біочар, вироблений із традиційної (кукурудзяний силос, дерев'яні гранули) та альтернативної (компост з опадів стічних вод і тверда фракція залишків дигестату) сировини [28].

2.3 Механізм впливу компосту на властивості ґрунтів

Компостування – це процес, у якому органічні речовини, отримані з рослин, тварин або людини, розкладаються в аеробних умовах мільйонами мікроорганізмів. Процес компостування повертає рослинним культурам цінні поживні речовини, що представляють собою органічну речовину, а також покращує якість і родючість ґрунту. Органічна речовина, яка була розкладена мікробними спільнотами в процесі компостування, виділяє продукти та побічні продукти, такі як H₂O, CO₂, NH₃, SO₄²⁻, вологу кислоту та тепло. Процес компостування має чотири фази: мезофільну, термофільну, охолодження та дозрівання. Додавання компосту в ґрунт для вирощування може підвищити продуктивність сільськогосподарських культур і вміст органічної речовини в ґрунті завдяки достатній кількості поживних речовин у компостованих матеріалах і наявності організмів, що стимулюють ріст рослин (рис 2.3) [29]. Компост можна розглядати як корисний матеріал для підвищення рН кислого ґрунту, покращує фізичні, хімічні та біохімічні характеристики засолення ґрунту. Крім того, використання компосту в сільському господарстві було б корисним для скорочення викидів парникових газів [30].

Дивлячись на результати дослідження було виявлено, що за допомогою вермікомпостування змогли отримати дрібніший і більш однорідний кінцевий продукт порівняно з класичним компостуванням. Для компосту найвища частка найдрібнішої фракції була досягнута в продуктах, що походять з кухонних

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			24

відходів із використаним папером, потім йдуть дигестат із соломою та осад стічних вод із садовими біовідходами. Агрохімічні властивості найдрібнішого вермікомпосту перевершують класичний компост будь-якого гранулометричного складу [30].

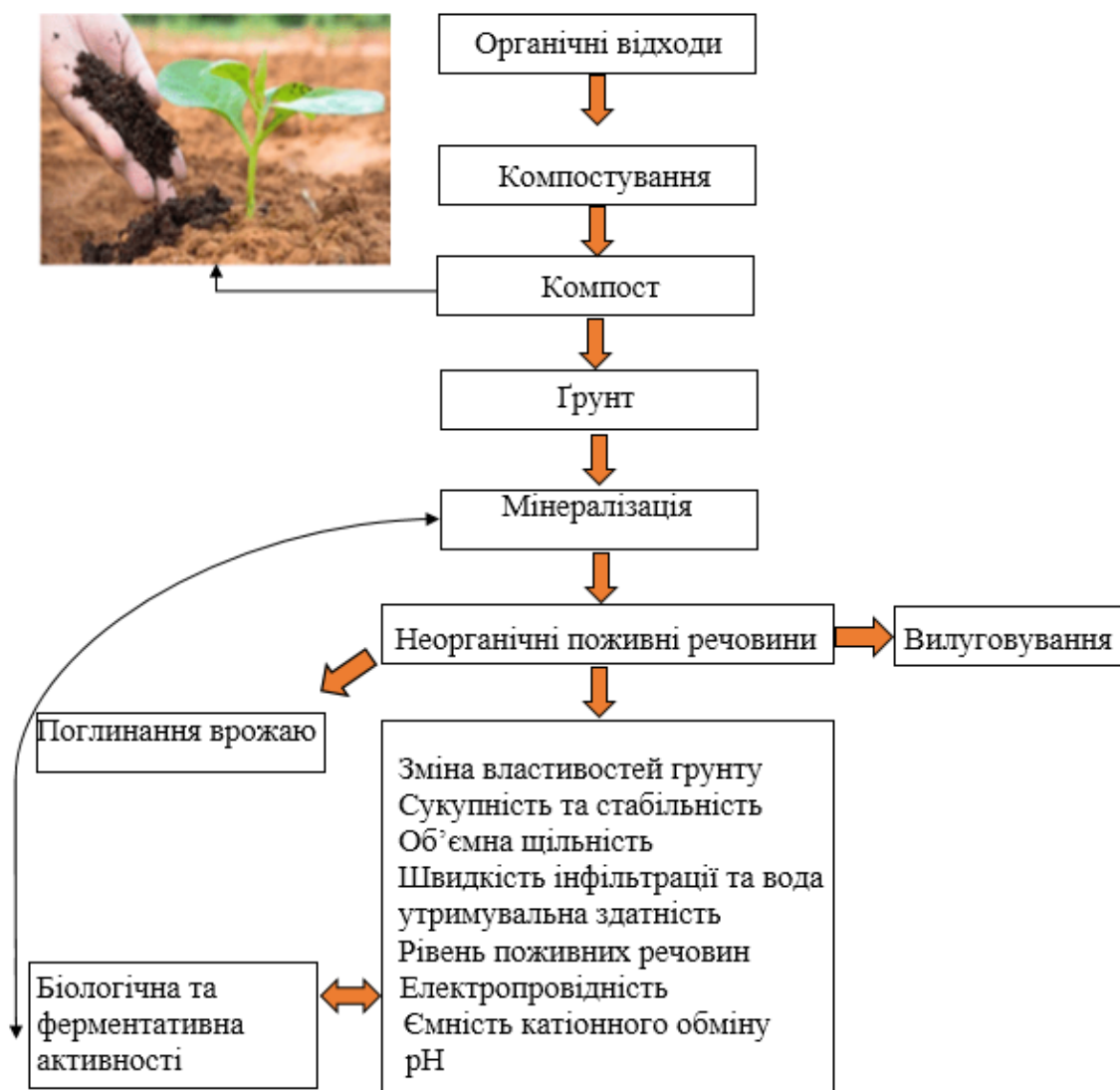


Рисунок 2.3 – Схема мінералізації компосту після внесення в ґрунт

У таблиці Б.1 (додаток Б) зазначено деякі основні переваги та недоліки використання біочару, дигестату та компосту для санаційних цілей. За природою свого біологічного генезису та складу ці методи відновлення вважаються екологічно чистими, економічними та стійкими підходами для біоремедіації [10, 27, 32].

Підп. і дата	Підп. і дата
Взаєм.інв.№	Взаєм.інв.№
Інв.№дубл.	Інв.№дубл.
Вип	Арк
№ докум.	Підп.
Дата	Дата

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ БІОПРОДУКТІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТІВ

3.1 Результати щодо зв'язування важких металів різними біопродуктами

3.1.1 Вплив дигестату на зв'язування та екстрагування важких металів

Механізми зв'язування важких металів з розчиненою органічною речовиною були проаналізовані в огляді літератури та визначені основні фактори, які впливають на властивості зв'язування важких металів продуктами на основі дигестату.

Сучасні відомості стверджують, що [22]:

– Гуміноподібні речовини мають найкращі зв'язувальні властивості з іонами Cu^{2+} та Zn^{2+} .

– Фульвоподібні компоненти мають найвищу стабільність зв'язування для іонів Cr^{3+} та Pb^{2+} .

– Комбінація фульвоподібних і білковоподібних речовин знижує стабільність зв'язування для всіх іонів важких металів.

– Стабільні комплекси розчинених органічних речовин з іонами Fe^{3+} утворюються незалежно від домінуючих органічних компонентів.

– Константа умовної стабільності білковоподібних і гуміноподібних компонентів вища при рН, близькому до нейтрального, ніж при кислому рН.

Теоретичне моделювання та аналіз компонентів флуоресценції та органічних функціональних груп, які зв'язуються з важкими металами, показують, що курячий послід буде кращою сировиною для анаеробного зброджування, ніж осад стічних вод, якщо метою є виробництво дигестату з високим рівнем гумінових речовин і хорошими властивостями зв'язування важких металів (рис 3.1).

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

ОС 20510040

Арк

26

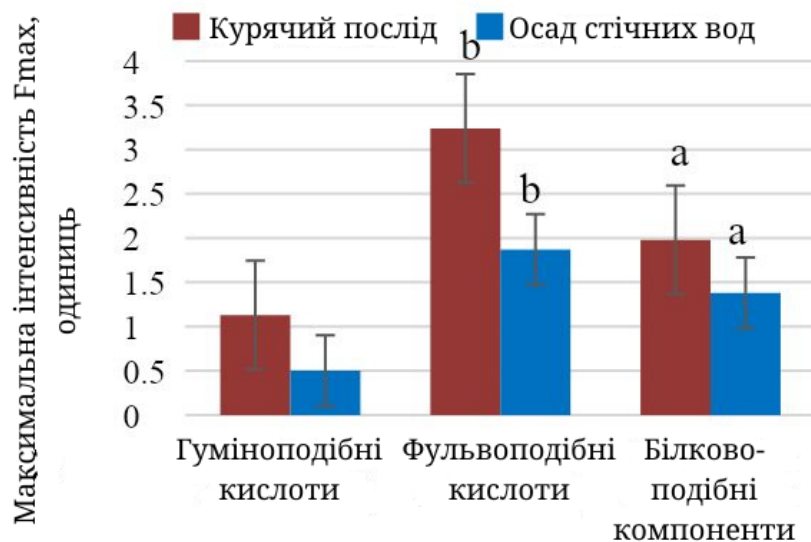


Рисунок 3.1 – Середні значення максимальних інтенсивностей для компонентів флуоресценції (гумусових, фульво- та білковоподібних речовин) дигестату після анаеробного зброджування курячого посліду та осаду стічних вод

У дослідженні дигестат розчиненої органічної речовини використовувався для вилучення важких металів із гірських ґрунтів [48]. Не всі іони важких металів зросли, як очікувалося, порівняно з розчиненою органічною речовиною ґрунту. Екстрагований Cr(III) продемонстрував очевидне збільшення у ґрунтах сільськогосподарського призначення та ґрунтах лісових угідь, що свідчить про те, що застосування дигестату може збільшити рухливість Cr(III) у ґрунтах сільськогосподарського призначення та лісових угідь. Водночас дигестат розчиненої органічної речовини отримав відносно високу концентрацію флуоресцентних компонентів, які можуть зв'язуватися з іоном Cr (III) і утворювати комплекси з високою хімічною стабільністю, такі як C1, C2 та C4. У луговий та шлакових ґрунтах вміст Cr(III) не змінився. Однак вміст у гірських ґрунтах показав нижчий рівень, ніж у екстракті з експерименту розглядалися як розчинені органічні речовини ґрунту BMS.

Що стосується Cu(II), то вміст розчиненої органічної речовини у ґрунті був вищим, ніж у екстрактах розчиненої органічної речовини дигестату, що вказує на те, що розчиненої органічної речовини дигестату може зменшити рухливість

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№поодл.	

Cu(II), за винятком BSS. Повідомляється, що білі опади можуть утворюватися, коли до розчину розчиненої органічної речовини додають іон Cu(II), таким чином виявлено можливість зниження концентрації Cu(II). Утворення флокулентних осадів сильно вплинуло на рухливість важких металів при високому рН. Тому для проведення експерименту було обрано $pH = 7 \pm 0,05$, щоб зменшити утворення осаду гідроксиду. Fe(III) демонструє очевидне збільшення в ґрунтах сільськогосподарського призначення, лугових, ґрунтах лісових угідь та зниження в гірських ґрунтах. Високі значення CL і f для Fe(III) – розчинених органічних речовин забезпечили умови для рухливості Fe(III). Такі ж явища спостерігалися також для Cr(III) – розчинених органічних речовин та Pb(II) – розчинених органічних речовин. Проте Pb(II) показав найвищий вміст порівняно з іншими металами, хоча розчинена органічна речовина у дигестаті та Pb(II) отримали відносно низькі значення константи стабільності $\log K_M$. Крім того, значення C_L були надзвичайно низькими для компонентів C1-C4. C5 представив більш високе значення C_L , що свідчить про те, що C5 може відігравати вирішальну роль у рухливості Pb(II). Дигестат розчиненої органічної речовини не збільшував розчинення іонів Zn(II). Вміст Zn(II) був нижчим у екстрактах розчиненої органічної речовини дигестату, ніж у розчиненої органічної речовини ґрунту. Таким чином, експерименти з вилучення показали, що загальний вміст важких металів збільшився в ґрунтах сільськогосподарського призначення, лугових, ґрунтах лісових угідь та зменшився в шлаковому та гірському ґрунтах.

На рисунку 3.2 показано, значення F_{max} слідує порядку $C3 > C2 > C1 > C5 > C4$. C3 представляв найвище значення F_{max} завдяки комбінації білковоподібних і фульвоподібних речовин. Порівняно з C2, нижчу відносну кількість можна знайти в C5, що пояснюється тим, що фульвоподібні речовини при коротшій довжині хвилі мають тенденцію до розкладання легше, ніж при більшій довжині хвилі. Стійкий і важко розкладається компонент (C4) виявив найнижче значення F_{max} .

Інв. № подел.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			28

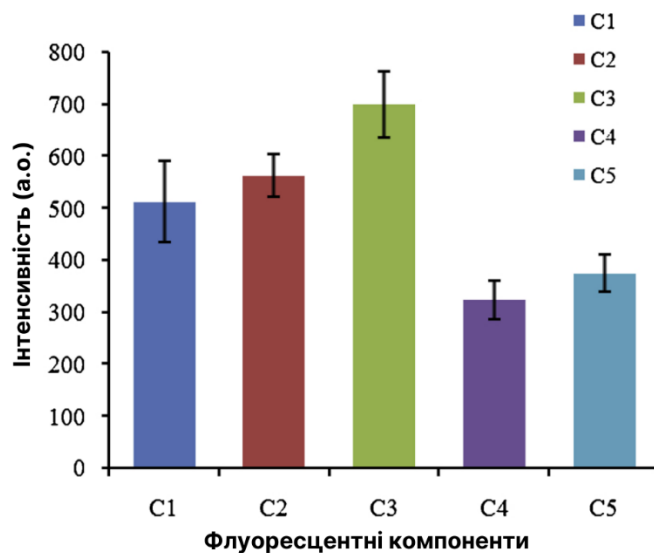


Рисунок 3.2 – Інтенсивність п’яти флуоресцентних компонентів, визначених моделлю паралельного факторного аналізу (без важких металів)

3.1.2 Зв’язування важких металів за допомогою біочару

Сировина для виробництва біочару. Для приготування біочару використовували чотири види сировини: кукурудзяний силос (MS), компост з осаду стічних вод (SC), деревні пелети (WP) і тверду фракцію залишків дигестату (DR). MS збирали безпосередньо з силосів на фермі. SC був виготовлений із осаду стічних вод, змішаного з деревною стружкою, соломою ріпаку та травою. Процес компостування проводився в двоступінчастій системі з аерованим біореактором (1 м³) і періодично повертаним валом. SC збирали через 12 місяців після початку дозрівання у валок. WP (1–1,8 см у довжину та 0,5 см у діаметрі), виготовлені з дуба та сосни (60% / 40%), були комерційно доступні на місцевому ринку. Зневоднений DR був отриманий на біогазовому заводі, який використовує суміш гною великої рогатої худоби, свинячого гною та кукурудзяного силосу для виробництва біогазу. Перед піролізом всю сировину сушили при 60°C протягом 48 годин і зберігали в пластикових контейнерах [28].

Піроліз. Повільний піроліз індивідуальної сировини проводили в реактор з нержавіючої сталі загальним об’ємом 3 л. Реактор нагрівався трифазним

Підп. і дата
Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дата
Інв.№поодл.

електричним нагрівачем, керованим шафою енергосистеми, обладнаною комп'ютером. Маса піролізований матеріал був зафіксований вагами з точністю до 0,001 г. Щоб перевірити вплив температури піролізу на властивості біочару та його придатність як доповнення до ґрунту, кожен вихідну сировину піддавали піролізу при 300°C і 600°C. Швидкість нагріву становила 5°C/хв. А час витримки становив 30 хв. Початкова маса вихідної сировини 300 г. Вихід біочару (% мас.) розраховували як відношення маси отриманого біочару до маси вихідної сировини, використаної для піролізу. Вихід біочару змінювався залежно від типу вихідної сировини та був нижчим при вищих температурах піролізу: 52% (MS300) і 34% (MS600), 79% (SC300) і 61% (SC600), 61% (WP300) і 41% (WP600), а також 51% (DR300) і 50% (DR600). Після охолодження біочар зберігали в пластикових контейнерах.

Вплив біочару на рухливість металів в ґрунті. Вплив біочару на рухливість металу в ґрунті залежить як від типу металу, так і від типу біочару. В зміні ґрунту, більшість біочару краще знижує рухливість Cu та Zn після піролізу при 600°C, ніж після піролізу при 300°C (рис 3.3). Найбільш придатними біочаром для цього ґрунту були SC300 і SC600, які зменшили рухливість Cu так само, як біочар DR у перший день після внесення змін, і найбільше знизили рухливість Cu після 30 днів іммобілізації. Ці ефекти обумовлені тим, що SC біочар мали найнижчу концентрацію розчиненого органічного вуглецю і найвищий вміст золи.

Інв. № покл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			30

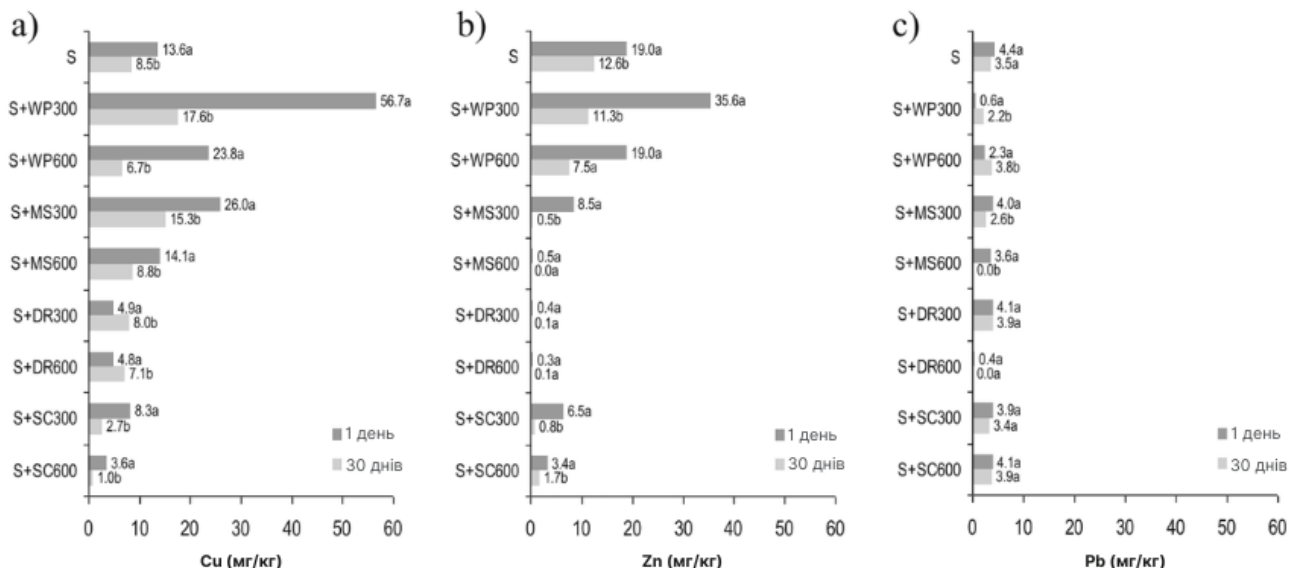


Рисунок 3.3 – Вплив різних видів біоچارу на концентрацію металу в рухомій фракції (0,01 М CaCl₂) під час короткочасної іммобілізації: а) Cu, б) Zn, в) Pb

Примітка: Різні літери поруч із парою смужок вказують на те, що концентрації металів у рухомій фракції цього варіанту значно відрізнялися через 1 і 30 днів, $p < 0,05$.

На поверхні золи функціональними групами є оксиди, переважно SiO₂. Атоми кисню, які зв'язані з іонами кремнію, мають низьку основність, яка змушує поверхню кремнезему діяти як слабка кислота. Оскільки ґрунт був вологим під час іммобілізації, ці атоми кисню могли реагувати з водою з утворенням силанольних (SiOH) поверхневих груп. При високому рН ці групи негативно заряджені та мають високу спорідненість до катіонів металів, таких як Zn, Cu та Pb. У цьому дослідженні біочар SC не вплинув суттєво на концентрацію Pb у рухомій фракції, але це значення вже було низьким у ґрунті без змін. Загалом, ці результати вказують на те, що SC біочар може бути корисним матеріалом для покращення промислового ґрунту.

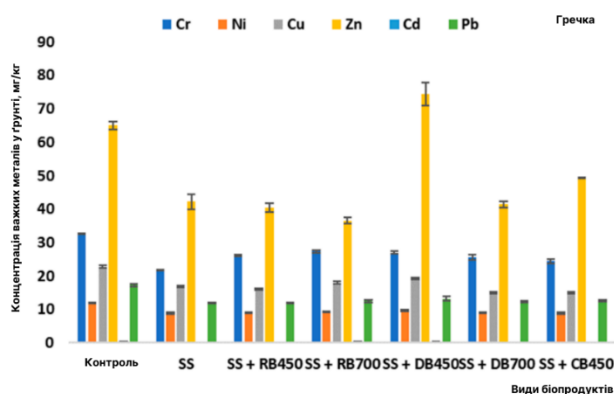
Тип вихідної сировини та температура піролізу впливають на фізико-хімічні властивості біоچارу та його придатність для зміни промислового ґрунту, який сильно забруднений Cu, а також Zn і Pb. Загалом властивості всієї сировини покращилися після піролізу та були кращими після обвуглювання при 600°C, ніж

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

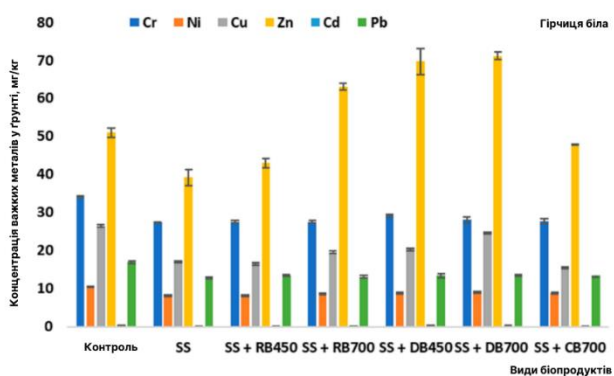
при 300°C. SC і DR біочар дуже ефективно зменшили рухливість Cu і Zn під час короткочасної корекції (30 днів), швидше за все, через їх високий рН, високий вміст золи і, у випадку SC біочар, дуже низький вміст розчиненого органічного вуглецю. Цікаво, що SC300 був майже таким же ефективним, як SC600, ймовірно, завдяки набагато вищому вмісту золи в обох біочарах [28].

Завдяки своїй особливій пористій структурі та великій кількості кисневмісних функціональних груп на своїй поверхні біочар може знерухомити забруднювачі в ґрунті та діяти як кондиціонер ґрунту, надаючи поживні речовини, які сприяють розвитку рослин. Вміст важких металів у контрольному ґрунті було класифіковано в наступному порядку: Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > Cd (рис 3.4). У всіх досліджуваних варіантах ґрунтів після збирання гірчиці білої та гречки вміст Cd виявлено нижче межі кількісного визначення. Порівнюючи послідовність важких металів під час інших розглянутих біопродуктів з послідовністю, показаною в контролі, було помічено, що Zn займає вищу позицію через його вищу концентрацію.

Інв. № подел.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата	ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата		32



(А)



(В)

Рисунок 3.4 – Концентрація важких металів (середнє ± стандартне відхилення) у ґрунті після вирощування гречки (А) та гірчиці білої (Б)

Примітка: SS – осад стічних вод; SS + RB450 – осад стічних вод + біочар ріпаку при 450°C; SS + RB700 – осад стічних вод + біочар ріпаку при 700°C; SS + DB450 – осад стічних вод + дигестат біочар при 450°C; SS + DB700 – осад стічних вод + дигестат біочар при 700°C; SS + CB450 і 700 осад стічних вод + біочар зі стебла кукурудзи при 450°C; і 700°C.

Результати дослідження [41] показали, що коріння рослин діє як буфер і стримує забруднення з надземних частин. У надземній біомасі було виявлено лише два важких метали – Cu та Zn (рис 3.5). Мікроелементи Cu та Zn поглинаються культурами із субстрату більшою мірою, ніж інші елементи. Дослідження виявили, що важкі метали менш ефективно переносяться в рослини, оскільки вони більш міцно зв'язані комплексом поглинання ґрунту. Отримані

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№поодл.	

результати узгоджуються з дослідженням [43], де стверджується, що Zn і Cu є компонентами ряду високих і помірних накопичень.

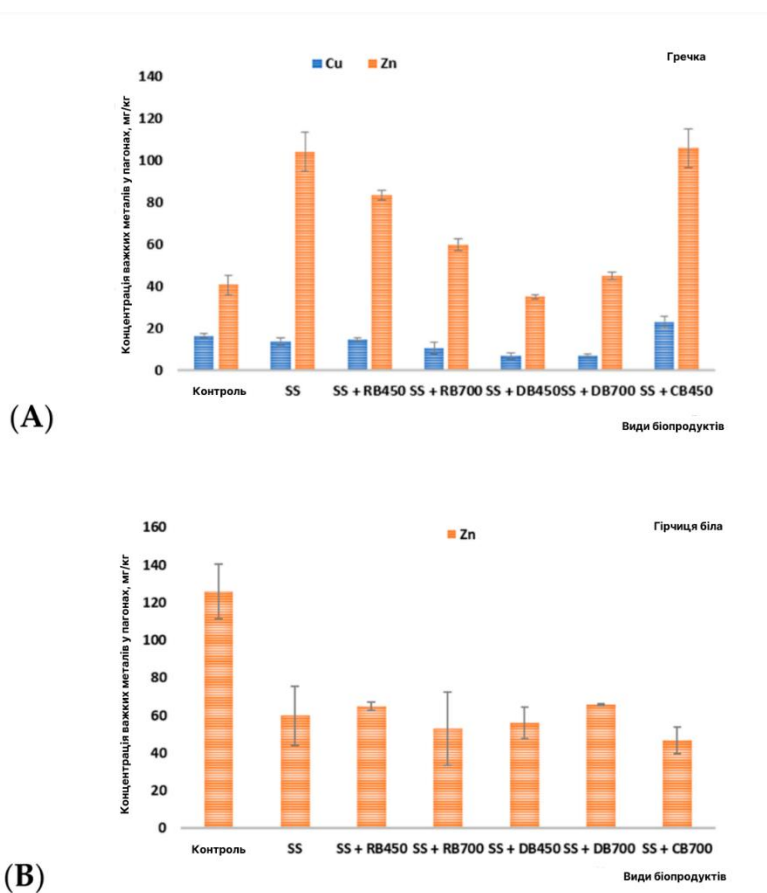


Рисунок 3.5 – Концентрація важких металів (середнє \pm стандартне відхилення) у пагонах гречки (А) та гірчиці білої (В) після внесення біочару

Примітка: SS – осад стічних вод; SS + RB450 – осад стічних вод + біочар ріпаку при 450°C; SS + RB700 – осад стічних вод + біочар ріпаку при 700°C; SS + DB450 – осад стічних вод + дигестат біочар при 450°C; SS + DB700 – осад стічних вод + дигестат біочар при 700°C; SS + CB450 і 700 осад стічних вод + біочар зі стебла кукурудзи при 450°C; і 700°C [41].

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№поодл.	

3.2 Вплив біопродуктів на відновлення властивостей ґрунту

3.2.1 Вплив дигестату на властивості ґрунту

Застосування дигестату істотно вплинуло на хімічні, біохімічні та біологічні властивості. Ці властивості вплинули на мікробну активність у ґрунті, що призвело до зниження активності ферментів, пов'язаних із циклами P і C, особливо при високих рівнях перетворення. Активність фосфатази, кількість грам + бактерій, а також рівні загального та доступного фосфору були більш релевантними змінними для розрізнення впливу поліпшувачів на ґрунти. Висока частка неорганічного фосфору до загального P у дигестатах призвела до накопичення P у мікробній біомасі ґрунту. Дигестати показали важливу цінність добрива для основних поживних речовин, причому вплив на функціональність ґрунту залежить від норми внесення. Застосування дигестату разом із мінеральними добривами виявилось найбільш сприятливим методом для функціональності ґрунту. Таким чином, це спільне застосування може сприяти стійкості сільськогосподарських систем шляхом переробки азоту з дигестатів [47].

Дигестат, використаний у дослідженні [24], покращив хімічні та біологічні характеристики ґрунту. Порівняно з необробленим ґрунтом, найвища доза внесення 5% призвела до найвищого зниження рН і призвела до значного збільшення загального органічного C, виробництва CO₂, розчинений органічний C, лужнорозчинних фенолів, антиоксидантна здатність, мікробної біомаси C і активності дегідрогенази. Це пов'язано з надходженням C, який частково знаходиться в легкодоступній формі та може бути використаний і метаболізований ґрунтовими мікроорганізмами.

Додавання біочару до дигестату зменшило розчинність органічних сполук (розчинений органічний C і феноли), таким чином обмежуючи кількість (мікробної біомаси C) і активність мікроорганізмів (виробництво CO₂ і ДН-аза). Отже, спостерігалось найменше зниження загального C, особливо при найвищій дозі, протягом усього експериментального періоду. Як окремо, так і в поєднанні з

Інв.№лодл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
------------	--------------	-------------	------------	--------------

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			35

дигестатом, біочар збільшував поглинання С у ґрунті за рахунок зменшення дихання ґрунту та пов'язаної з цим активності мінералізації [24].

3.2.2 Вплив біочару на властивості ґрунту

Для дослідження [28] придатності біочару для зміни ґрунту, забрудненого важкими металами, біочар було додано до ґрунту, забрудненого мідеплавильним заводом, і були визначені зміни рН ґрунту, органічна речовина та розчинений органічний вуглець. Біочар значно не підвищував загальний вміст металу в зміненому ґрунті, оскільки їх дозування становило 10% (від маси).

Через день після того, як WP300 і WP600 були додані в ґрунт, рН був подібним до контрольного, тоді як для інших біочарів, особливо тих, що виробляються при вищій температурі, рН був вищим. Під час короткочасної інкубації (30 днів) рН збільшився більше у зміненому ґрунті, ніж у незміненому. Однак це збільшення було найменшим у ґрунті, доповненому біочаром WP300. Зміна рН у зміненому ґрунті має впливати на рухливість металу.

Через день після внесення біочару зразки ґрунту мали підвищені концентрації органічної речовини і розчиненого органічного вуглецю. Це збільшення було особливо вираженим після додавання біочару MS, WP і DR, що пов'язано з вищим вмістом летючих речовин і розчиненого органічного вуглецю у цих біочарах порівняно з біочаром SC. У змінених ґрунтах органічна речовина дещо знизилася протягом 30 днів інкубації, що є додатковою ознакою стабільності біочару. У всіх зразках, включно з контролем, протягом 30-денної інкубації концентрація розчиненого органічного вуглецю знижувалася. Зниження концентрації розчиненого органічного вуглецю може призвести до зниження рухливості металу в ґрунті [28].

3.2.3 Вплив компосту на властивості ґрунту

Компост містить велику кількість органічних сполук, які позитивно впливають на біологічні процеси в ґрунті та можуть покращити фізико-хімічні

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ОС 20510040	Арк
						36

властивості ґрунту, включають його рН, вміст органічних речовин, кількість гумусових речовин, пористість, агрегатну стійкість, вологість і вміст поживних речовин (наприклад, N, P і K). Ці фактори важливі для росту рослин, розвитку мікроорганізмів, виживання рослин-патогенів, дренажу води, контролю температури ґрунту та доступності макро- та мікроелементів.

При внесенні в ґрунт компосту покращуються фізичні, хімічні та біологічні властивості ґрунту. Гумінові речовини в компості покращують пористість ґрунту, утворюючи агрегати та покращуючи структуру ґрунту. Використання компосту також може підвищити рН, пористість, вологість, агрегатну стабільність, вміст органіки та вміст P і K, а також зменшити об'ємну щільність ґрунту. Додавання компосту значно покращувало хімічні та фізичні властивості ґрунту, хоча при низькій швидкості ефект був. Додавання компосту збільшило концентрацію основних поживних речовин для рослин P і K.

Коли властивості ґрунту покращуються, це сприяє росту та розвитку ґрунтових мікроорганізмів. Ці мікроорганізми безперервно розкладають органічні сполуки та мінеральні речовини в ґрунті та компостують у ґрунтовий гумус, покращують поживний баланс ґрунту. Таким чином збільшується пористість, що призводить до посиленого дихання коренів рослин і поглинання води або поживних речовин для росту рослин. Додавання компосту під час вирощування сільськогосподарських культур може допомогти зменшити рівень ерозії ґрунту та стікання поживних речовин, що призведе до зниження потреби в хімічних добривах і зрошенні водою завдяки покращеному утриманню води та поживних речовин, а потім підвищить продуктивність сільськогосподарських культур [33].

На рисунку 3.6 показано індекс мікробної біомаси, виражений у мікрограмах дцДНК $г^{-1}$ сухого ґрунту, протягом трьох років експерименту. У перший рік (2019) суттєвих відмінностей між двома варіантами обробки не спостерігалось, зі значеннями в межах 32-35 мкг дцДНК $г^{-1}$ сухого ґрунту. У другий рік (2020) мікробна біомаса зросла в обох обробках із середньорічним

Інв. №подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. №дубл.	Підп. і дата

збільшенням на +63% і +48% для Сmp і Fert. Значна різниця між Сmp і Fert спостерігалася після збору врожаю. Тенденція до збільшення мікробної біомаси була підтверджена також у 2021 році (середнє щорічне збільшення +100% для Сmp і +72% для Fert), зі значно вищими значеннями для Сmp в обидва періоди відбору проб (цвітіння та після збору врожаю) [42].

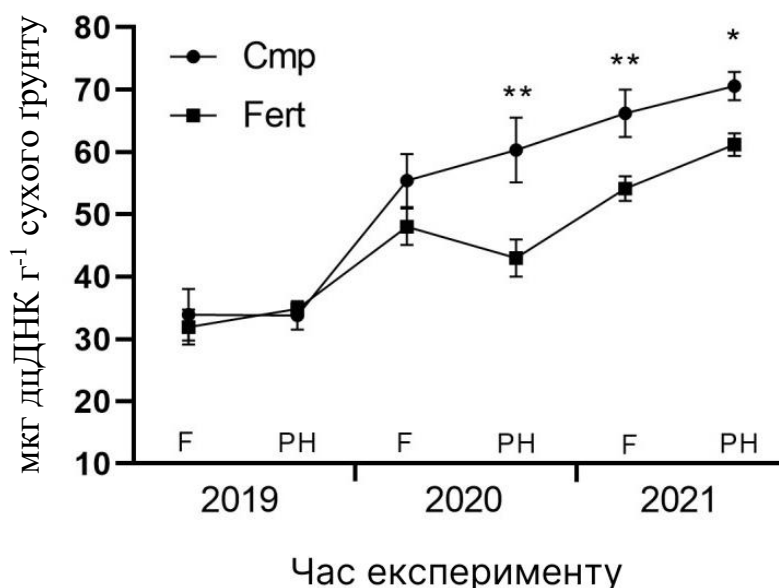


Рисунок 3.6 – Тенденція зміни мікробної біомаси ґрунту протягом дослідження

Примітка: Протягом кожного року зразки ґрунту аналізували на фенологічних стадіях цвітіння (F) і після збору врожаю (PH). Дані є середніми для п'яти повторів. Зірочки вказують на статистично значущі відмінності ($p < 0,05^*$, $p < 0,01^{**}$). Поліпшувач ґрунту компост (Сmp), підживлення мінеральним добривом (Fert), дволанцюгова ДНК (дцДНК).

3.3 Ефективність очищення ґрунту за допомогою біоремедіації

Біоремедіація – це використання біологічних систем, таких як рослини та мікроорганізми, для знищення або зменшення забруднюючих речовин і концентрації токсичних речовин у забрудненому середовищі. Метою біоремедіації є зменшення органічних і неорганічних забруднювачів до

Підп. і дата	
Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

концентрацій, які неможливо виявити, нижче меж, встановлених як безпечних або відповідних за допомогою рослин і мікроорганізмів.

Існують польові застосування біоремедіації для очищення розливів нафти, починаючи від простих і закінчуючи складними технологіями, включаючи комбіноване використання двох або більше методів біоремедіації. Проведено польові експерименти, щоб дослідити здатність консорціуму різних бактерій руйнувати вуглеводневе забруднення ґрунту та встановлено, що бактерії показали значну ефективність видалення вуглеводнів [44]. Для стимулювання деградаційної здатності місцевих мікроорганізмів ефективним є додавання поживних речовин у вигляді біопродуктів, розглянутих в попередніх пунктах. Крім того, у разі застосування добрив, наприклад з дигестату, буде досягтися максимальний ефект для комплексного забруднення ґрунту важкими металами та нафтопродуктами. Це пов'язано із дослідженими та описаними вище комплексоутворюючими властивостями дигестату по відношенню до важких металів та наявністю поживних речовин, необхідних для життєдіяльності нафтодеструктивних мікроорганізмів.

У роботі [34] змоделивали діяльність місцевих мікроорганізмів ґрунту, і результати показали, що загальна концентрація вуглеводнів у ґрунті зменшилася. Хоча застосували посилене природне послаблення для деградації нафтових розливів. У дослідженні добрива та валки використовувалися для доповнення потреби в поживних речовинах і кисні бактерій, що розкладають вуглеводні до забруднювачів розпаду. Їхні результати показали, що концентрація нафтових вуглеводнів у ґрунті була знижена до 94,3%, що свідчить про ефективність рекультивації шляхом посиленого природного ослаблення.

Таким чином, біоремедіація є дуже важливим екологічно відповідальним методом відновлення ґрунту:

- Екологічна стійкість: біоремедіація пропонує стійку альтернативу традиційним методам рекультивації, включаючи розкопки, спалювання та хімічну обробку, які зазвичай мають значний шкідливий вплив на навколишнє

Інв. № подел.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата	ОС 20510040					Арк
					Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	39

середовище та призводять до високих викидів енергії та вуглецю. Використання природних біологічних процесів біоремедіація мінімізує екологічні порушення, зберігає родючість ґрунту, захищає біорізноманіття та підвищує стійкість екосистеми.

– Економічна ефективність: оскільки біоремедіація не потребує дорогої інфраструктури, обладнання чи хімічних речовин, вона часто менш дорога, ніж звичайні процедури рекультивації. Як основні елементи біоремедіації, мікроорганізми широко розповсюджені, саморозмножуються, і після того, як вони закріпилися в забруднених місцях, потребують незначних витрат на обслуговування чи експлуатацію. Витрати на рекультивацію можна ще більше зменшити, використовуючи біоремедіацію на місці, що усуває потребу в земляних роботах, транспортуванні та утилізації забрудненого ґрунту.

– Універсальність та застосування: серед багатьох токсинів, які можна видалити з ґрунту за допомогою біоремедіації, входять пестициди, важкі метали, органічні забруднювачі, нафтові вуглеводні та інші хімічні речовини. Численні методи біоремедіації надають індивідуальні рішення для різних типів забруднювачів, труднощів конкретної ділянки та умов навколишнього середовища. Завдяки своїй здатності до адаптації біоремедіація може бути використана в різноманітних контекстах навколишнього середовища, включаючи міські ландшафти, промислові території та сільськогосподарські поля.

– Мінімізація вторинних екологічних ризиків: на відміну від певних методів рекультивації на основі хімічних речовин, які можуть утворювати токсичні побічні продукти або посилювати вторинні екологічні проблеми, біоремедіація забезпечує безпечний і неінвазивний спосіб зменшення забруднення. Забруднювачі розщеплюються мікроорганізмами на менш небезпечні, простіші молекули, які часто інтегруються в їх біомасу або мінералізуються в нешкідливі побічні продукти, такі як вуглекислий газ, вода та біомаса.

– Сумісність із цілями сталого розвитку: оскільки біоремедіація стосується кількох аспектів екологічної, соціальної та економічної стійкості, вона

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			40

узгоджується з цілями сталого розвитку. Завдяки відновленню наземних екосистем і збереженню біорізноманіття, це допомагає досягти цілі 15 (збереження екосистем суходолу) цілей сталого розвитку ООН. Крім того, заохочуючи технологічні інновації та розвиваючи стійкі методи управління навколишнім середовищем та відновлення, біоремедіація сприяє досягненню цілі 9 (Інновації та інфраструктура).

– Захист громадського здоров'я: оскільки біоремедіація зменшує небезпеку впливу забрудненого ґрунту та води, вона має важливе значення для підтримки громадського здоров'я. Біоремедіація зменшує ймовірність того, що люди будуть піддаватися впливу токсичних хімікатів і патогенів, шляхом усунення або деградації небезпечних забруднювачів.

– Довгострокова ефективність та довговічність: коли справа доходить до видалення забруднень і відновлення ділянки, біоремедіація має потенціал бути тривалою та ефективною в довгостроковій перспективі. Мікробні спільноти можуть витримувати та продовжувати розщеплювати забруднювачі протягом тривалого періоду часу після їх створення, пропонуючи постійні переваги очищення навіть після завершення активного втручання. Крім того, використовуючи вроджену стійкість екосистем до самоочищення та регенерації з часом, біоремедіація може працювати разом із природними процесами ослаблення, щоб збільшити довговічність та ефективність операцій з рекультивації [35].

3.4 Рекомендації щодо особливостей застосування досліджуваних методів для відновлення ґрунтів

3.4.1 Особливості застосування дигестату

Після видалення з метантенку дигестат можна використовувати як добриво без будь-якої подальшої обробки. Оскільки зберігання, транспортування та використання дигестату є дорогими через низький вміст сухої речовини, переробка дигестату є необхідним варіантом для зменшення об'єму та

Інв.№подел.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

підвищення якості. Переробка дигестату може бути частковою (розділення твердої та рідини, зменшення об'єму) або може бути повною, розділяючи дигестат на тверді волокна, концентрати добрив і чисту воду. Мета полягає в тому, щоб виробити стандартизоване тверде або рідке біодобриво з покращеною якістю (вищі концентрації поживних речовин для рослин, ніж у необробленому дигестаті, окремі поживні речовини в мінеральній формі) і товарним виглядом.

Рекультивация (відновлення ландшафту) зосереджена на територіях, порушених діяльністю людини, з метою повернення цих територій до оптимальних умов сталого природного або антропогенного середовища. Унікальна методологія, розроблена для рекультивациі, включає додавання рекультивацийного компосту або подібних добре стабілізованих органічних чи органо-мінерального субстрату (включаючи аеробно стабілізований відокремлений дигестат) у ґрунтове виробництво. Ця добавка у великих кількостях, зазвичай від 800 до 1200 т/га, відбувається лише один раз під час біологічної рекультивациі з міркувань швидкого відновлення верхнього шару ґрунту. Після цього в наступні роки ґрунт обробляють звичайними методами відповідно до діючих чинних норм у сфері використання органічних добрив (включаючи дигестати) під час сільськогосподарського виробництва. Меліорація, з використанням дигестату веде до покращення запасів органічних речовин у ґрунті та оптимізації структури ґрунту [23].

3.4.2 Широкомасштабне польове застосування біочару та виклики

Дослідження адсорбції біочару в лабораторії та маломасштабних польових випробуваннях показали великий потенціал [45, 46]. Але залишаються проблеми з точки зору практичності, ефективності, вартості та стійкості при широкомасштабному польовому застосуванні на комерційному рівні. Однією з ключових проблем, пов'язаних із широкомасштабними випробуваннями, є досягнення порівнянних або кращих результатів ремедіації порівняно з невеликими експериментами з урахуванням переважаючих параметрів

Інв.№подел.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			42

навколишнього середовища в реальному світі. У малому масштабі експериментальні параметри та параметри навколишнього середовища контролюються, отже, результат не обов'язково імітує реальні польові умови. Іншим фактором є витрати, пов'язані з масштабуванням проекту. Витрати, пов'язані з виробництвом (необроблені біовідходи та піроліз), транспортуванням (необроблені біовідходи та біочар), закупівлею обладнання та застосуванням біочару, є основною перешкодою для впровадження широкомасштабних польових застосувань.

Більшість розуміють покращення економіки біочару в перспективі пропозиції нових видів дешевшої сировини замість спеціально вирощеної біомаси. Деякі підтримують ідею використання нових методів піролізу (наприклад, мокрого піролізу) для виробництва спеціально виготовленого біочару за низькою вартістю порівняно з традиційним методом піролізу з високим споживанням енергії. Варіантом може бути поєднання різних стратегій для вирішення економічної доцільності та практичності, наприклад:

- Використовувати безкоштовну або дешеву, легкодоступну місцеву біомасу відходів з високою ефективністю рекультивації.

- Вибрана біомаса повинна вимагати незначного штучного внесення добрив і обробки гербіцидами/пестицидами або взагалі не потребувати їх, щоб рости у великих кількостях.

- Відібрана біомаса повинна приносити прибуток шляхом продажу певних їстівних частин рослини, тоді як неїстівні частини можна використовувати для виробництва біочару.

- Використовувати недорогий метод карбонізації.
- Біочар слід виробляти поблизу вихідної сировини у зоні виробництва або в межах місця його застосування, щоб зменшити логістичні витрати.

- Біочар, отриманий з обраної сировини біомаси, повинен мати хороші цикли регенерації та повторного використання.

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подел.	

– Комбінація біочару з іншим адсорбентом або матеріалом/організмами, що розкладають, щоб зменшити вартість і підвищити ефективність рекультивації [27].

На основі проведених досліджень вбачаємо за перспективне використовувати тверду фракцію дигестату для одержання біочару. Такий біочар буде володіти необхідними властивостями для викоистання його під час біоремедації ґрунтів, забруднених та порушених внаслідок воєнних дій.

3.4.3 Особливості застосування компосту

Компостування є ще однією поширеною технологією управління відходами, якої дотримуються промисловість і домогосподарства. Компост може виступати в якості відповідного добрива для ферми, збагачуючи ґрунт поживними речовинами, яких він міг втратити протягом попередніх сільськогосподарських сезонів. Додавання життєво важливого гумусу та гумінових кислот є важливою частиною компостування. Розпад вологої органіки відбувається в компостних ямах протягом кількох місяців, але процес можна прискорити додаванням дощових черв'яків або бактерій.

Додавання біочару до процесу компостування має багато позитивних ефектів. Дослідження показали, що додавання біочару допомагає зменшити викиди парникових газів і покращити розкладання органічної речовини. Також було доведено, що він покращує утримання азоту в ґрунті за рахунок зменшення викидів аміаку та загальних втрат азоту. Була покращена стабілізація важких металів завдяки компостуванню з додаванням біочару. Найвища пористість із надзвичайною стабільністю біочару призвела до суттєвого підвищення швидкості деградації матеріалів для компостування, водночас призводячи до флуктуації мікробної спільноти [36].

Таким чином, на основі проведеного дослідження не встановлено унікального продукту, який ефективніше застосовувати для біоремедації ґрунтів, забруднених та порушених внаслідок воєнних дій. Натомість, рекомендовано

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подел.	

комплексний підхід до вирішення проблеми, зокрема за рахунок поєднання деяких біопродуктів на окремих стадіях технологічного процесу їх виробництва на основі підсилення чи покращення корисних властивостей. Так, встановлено позитивний ефект від стабілізації дигестату методом компостування для його властивостей та вплив на ґрунт і ґрунтову мікробіоту. Біочар, одержаний з твердої фракції дигестату, за рахунок пористої структури та вмісту поживних речовин має високий потенціал для застосування під час ремедіації ґрунтів, забруднених зокрема важкими металами. Крім того, додавання біочару до процесу компостування сприяє покращенню стабілізації важких металів у ґрунті. На рисунку 3.7 наведена розроблена схема комплексного застосування біопродуктів для біоремедіації ґрунтів.

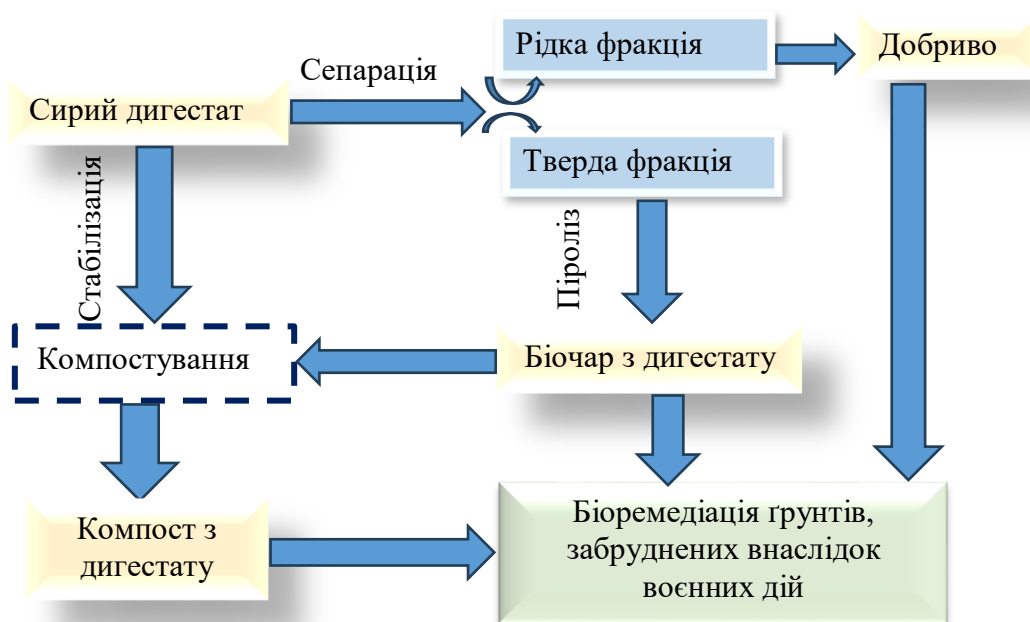


Рисунок 3.7 – Схема комплексного застосування біопродуктів для ремедіації ґрунтів

Інв.№поодл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Безпека в надзвичайних ситуаціях при виробництві дигестату

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності [37].

Біогазові установки мають постійну річну продуктивність, що вимагає накопичення дигестату в період між осіннім і весняним внесеннями на поля. Тривале зберігання в негерметичних резервуарах (лагунах) призводить до накопичення твердих частинок та їх осідання. При тривалому зберіганні дигестату збільшився об'єм «неперетравлених» органічних речовин, що призвело до збільшення викидів в атмосферу парникових газів, метану (до 5-10% його потенціалу в сировині).

Біогаз (суміш газів) – це безбарвний горючий газ, щільність 1,2 г/л при 0°C та тиску 760 мм рт. ст., може нести велику небезпеку при ремонтних роботах у підвальних приміщеннях, шахтах та колодязях.

Токсичність і вибухонебезпечність біогазу є двома факторами, які необхідно брати до уваги при експлуатації біогазової установки. Ризик вибуху метану, коли метан змішується з повітрям у пропорції від 5 до 15% за об'єму.

Газово-повітряні суміші можуть бути вибухонебезпечні в певних межах, вибухають при появі зовнішнього джерела енергії (вогнь, електрична іскра) з певною потужністю, вище температури самозаймання газ окислюється, і цей процес створює вибухову небезпеку (таблиця 4.1).

Інв.№подрл.		Підп. і дата		Взаєм.інв.№		Інв.№дубл.		Підп. і дата		ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата						46	

Таблиця 4.1 – Характеристика вибухо- та пожежонебезпечних газів

№	Назва газу	Характеристика вибухо-та пожежонебезпеки
1	Водень	Найбільшу вибухонебезпечність водень має при об'ємному відношенні водню і кисню 2:1, або водню та повітря приблизно 2:5, оскільки в повітрі міститься приблизно 21% кисню. Також водень пожежонебезпечний. Рідкий водень при потраплянні на шкіру може викликати сильне обмороження.
2	Метан	З повітрям метан утворює вибухові суміші. При вмісті в повітрі до 5-6% метан горить біля джерела тепла (температура запалення 650-750 °С), при вмісті 5-15,2 (16)% – вибухає, понад 16% – може горіти при припливі кисню, зниження при цьому концентрації метану вибухонебезпечне.
3	Сірководень	Горючий газ, межі спалахування 4,3%-45,5%, температура самозаймання – 290°С. Пари в замкнених об'ємах утворюють вибухонебезпечні концентрації.

При виконанні робіт, які спрямовані на охорону праці персоналу біогазових комплексів необхідно дотримуватися норм безпеки роботи на підприємствах відповідно до НПАОП 01.0-1.02-18 «Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві», а також – передбачені правилами техніки безпеки експлуатації біогазових установок.

Розміщення ферментаторів та інших споруд на плані підприємства повинні відповідати вимогам ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій», ДБН В.2.5-20-2018 «Газопостачання» та ВНТП-АПК-09.06 «Система видалення, обробки, підготовки та використання гною».

Для того, щоб гарантувати безпеку персоналу необхідно встановлювати обладнання, що сповіщає про небезпеку вибуху газів. На видних місцях встановлюють первинні засоби пожежогасіння, що призначені для певних категорій приміщень за вибухопожежною та пожежною безпекою згідно ДБН В.1.1-7:2016 та ДСТУ Б В. 1.1-4, а саме: ферментатор – В; резервуари з/б – Д; технічні приміщення – Д.

Вибухонебезпечні зони: територія в радіусі 1,0 метра навколо газової системи, горловини вивідного трубопроводу і на відстані 5,0 метрів від

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№поодл.	

ОС 20510040

Арк

Вип Арк № докум. Підп. Дата

47

накопичувача газу (газгольдера) і резервуара для бродіння (ферментатора), вважаються вибухонебезпечними. В межах цих зон все електрообладнання та техніка виконуються в вибухозахищеному варіанті.

У разі виникнення аварійних ситуацій, необхідно передбачити протипожежні заходи згідно вимог ДБН В.2.5-74:2013 [38].

4.2 Наслідки під час застосування біочару на робочому місці

Відбулося пряме спостереження цитотоксичності частинок біочару. У дослідженні біочар виявилося менш токсичним, ніж повідомили цитотоксичність інших дисперсних матеріалів на основі вуглецю, таких як сажа, частинки вихлопних газів транспортних засобів, вуглецеві нанотрубки та нановуглецева сажа. Це можна частково пояснити:

– Нижчим потенціалом вивільнення поліциклічних ароматичних вуглеводнів з біочару, використаного в цьому дослідженні (як підтверджено експеримент із пасткою забруднюючих речовин), порівняно з частинками сажі та вихлопних газів транспортних засобів.

– Більший розмір (та інша форма) частинок біочару порівняно з вуглецевими нанотрубками та нановуглецевою сажею, що зменшує потенціал інтерналізації клітин та окисного стресу, викликаного частинками біочару.

Незважаючи на це, рекомендується дотримуватися заходів безпеки як під час виробництва, так і під час застосування біочару через токсичність, пов'язану з розміром частинок біочару (понад 95% < 10 мкм, більше 50% < 2,5 мкм). Щоб мінімізувати ризик впливу, працівники повинні носити засоби захисту органів дихання під час виробництва біочару. Під час польового внесення біочару слід вносити в суспензії та завжди змішувати з ґрунтом, щоб уникнути вторинного утворення пилу [39].

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подел.	

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			48

4.3 Охорона праці при виробництві компосту

При роботі на майданчиках, в механізованих сховищах і цехах для виробництва компосту важливо дотримуватись правил техніки безпеки та охорони праці. При роботі з гноєм і добривами, ці компоненти входять до складу компостної суміші, важливо дотримуватися суворих правил щодо дотримання санітарних і ветеринарних вимог.

Слід дозволити компостувати гній на станціях особам, які спеціалізуються на цьому процесі, вік не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд. Також працівники повинні знати принцип роботи, умови технічної експлуатації засобів транспортування, переміщування, вихідні компоненти та готовий компост, їх дозування, а також правила пожежної безпеки.

Механізовані складські приміщення та лабораторії, призначені для виробництва компосту. повинні мати вентилявану систему вентиляції, яка побудована відповідно до норм технологічного проектування. Працівників пунктів потрібно забезпечити спецодягом за чинними нормами.

4.3.1 Пожежі компостної купи та запасів

Оператори компосту повинні боротися з вогнем, спричиненим самозайманням. Спонтанне займання – це коли купа матеріалу самонагрівається до точки, де починається «тепловий вибух» або «реакція втечі». Оскільки тепло продовжує вироблятися в купі швидше, ніж воно може розсіюватися, це призводить до прискорення реакції витікання. Реакція, у свою чергу, вивільняє енергію, яка ще більше підвищує температуру в купі, що ще більше прискорює реакцію. У певний момент цього процесу досягається температура самозаймання матеріалу в купі, і відбувається горіння.

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подел.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

ОС 20510040

Арк

49

Пожежі в компостних купах і сховищах рідко гасять лише водою. Ефективне реагування на вогонь включає: відокремлення палаючого матеріалу, ізоляція його розповсюдження, використання води або ґрунту.

На компостних підприємствах samozаймання зазвичай відбувається в погано керованих купах для компостування та затвердіння, а також у сховищах сировини, яка очікує обробки. У всіх цих випадках ризик виникнення пожежі зростає, коли споруджуються великі купи або коли купам дають висохнути. Купи, у яких недостатньо вільного простору для проходження повітря та виведення тепла, також становлять підвищений ризик.

Як і в разі інших пожеж, увага повинна зосередитися на запобіганні, щоб уникнути samozаймання. У цьому випадку запобігання означає керування процесом компостування, щоб запобігти виникненню теплового вибуху. Обмеження висоти куп і управління вологістю в компостних купах і запасах також є найкращими методами запобігання samozайманню.

Samozаймання зазвичай не відбувається в дуже сухих матеріалах, тому існує більший ризик виникнення пожежі в купах кущів і дерев, ніж у земляних піддонах і габаритних пиломатеріалів. Мимовільне займання більш імовірно, коли вологість матеріалів знаходиться в діапазоні від 30 до 40%. Зберігання матеріалів більш сухими або вологими, ніж цей діапазон вологості, а також рівномірно вологими, повинно запобігати умовам для samozаймання.

Оскільки профілактика не завжди ефективна, потрібно бути готовим гасити пожежі, коли вони виникають, потрібно:

- Забезпечити відповідне протипожежне обладнання на місці.
- Обладнати вогнегасниками транспортні засоби та пересувну техніку.
- Переконатися, що є відповідне та доступне водопостачання.
- Мати запас ґрунту для гасіння пожежі.
- Навчання працівників правильному використанню вогнегасників, пожежних насосів і шлангів, а також тому, як реагувати на пожежу в компостній купі чи складі [40].

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

ОС 20510040

Арк

50

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розглянуто проблему пошкодження/забруднення ґрунтів внаслідок воєнних дій. Згідно з офіційним ресурсом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України станом на 01.05.2024 року можна оцінити завдані збитки земельним ресурсам. Площа засмічення земель – 19 224 820 м². Площа забруднення ґрунтів – 805 176 м².

Основні типи порушень ґрунту через військові дії:

– фізичні порушення включає ущільнення, спричинене будівництвом оборонної інфраструктури, риття траншей і тунелів, ущільнення, спричинене переміщенням техніки та військ або утворення кратерів, які спричинені бомбами.

– хімічні порушення спричинене надходження забруднень, таких як нафта, важкі метали, нітроароматичні вибухові речовини, фосфорорганічні нервово-паралітичні речовини, діоксини з гербіцидів або радіоактивні елементи.

– біологічні порушення є наслідком впливу на фізичні та хімічні властивості ґрунту або навмисного введення мікроорганізмів, які є смертельними для вищих тварин і людей.

У другому розділі розглянуто механізм відновлення ґрунтів за допомогою дигестату, біочару та компосту. Дослідження показали позитивний вплив дигестату від виробництва біогазу на якість ґрунту. Дигестат іммобілізує забруднюючі речовини, має низьку вартість та довговічність, безпечний для довкілля, має низьку розчинність та біорозкладність, збільшує різноманіття мікроорганізмів та їх активність.

Біочар – це багатий вуглецем продукт, одержаний шляхом піролізу залишкових матеріалів біомаси. Біочар іммобілізує забруднюючі речовини, має низьку вартість, безпечний для довкілля, стійкий, підвищує родючість та якість ґрунту, сприяє активності мікроорганізмів, затримує воду.

Компостування – це процес, у якому органічні речовини, отримані з рослин, тварин, розкладаються в аеробних умовах мільйонами мікроорганізмів. Компост

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подел.	

						ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			51

поліпшує родючість ґрунту, збільшується запас поживних елементів, ємність катіонного обміну, поліпшуються воднофізичні властивості ґрунтів, підвищує стійкість ґрунтів до впливу забруднюючих речовин.

Враховуючи переваги дигестату, біочару та компосту доцільним є їх комплексне використання для біоремедіації ґрунтів, пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій. Це сприяє відновленню ґрунтового покриву. Вони також допомагають зменшити забруднення ґрунту важкими металами та сприяють відновленню території, що постраждали від воєнних дій.

Використання біопродуктів також сприяє досягненню цілей сталого розвитку, зокрема цілі 2 викорінення голоду, цілі 12 перехід до раціональних моделей споживання та виробництва та цілі 15 захист та відновлення екосистем суші, боротьба з опустелюванням, припинення деградації земель. Біоремедіація пошкоджених ґрунтів сприяє сталому використанню земельних ресурсів та підтримує збереження екосистем.

Інв.№подел.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата	ОС 20510040	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата		52

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Завдані збитки. Земельні ресурси. ЕкоЗагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://ecozagroza.gov.ua/damage/shove>.

2. Майже третина Українських полів може бути незасіяними або недоступними - Українська природоохоронна група. URL: <https://uncg.org.ua/a-third-ua-crops/>.

3. Certini G., Scalenghe R., Woods W. I. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*. 2013. Т. 127. С. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009>.

4. Red zone. Education | National Geographic Society. URL: <https://education.nationalgeographic.org/resource/red-zone/>.

5. Poesen J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2017. Т. 43, № 1. С. 64–84. URL: <https://doi.org/10.1002/esp.4250>.

6. Human health risks related to the consumption of foodstuffs of plant and animal origin produced on a site polluted by chemical munitions of the First World War / S. Gorecki та ін. *Science of The Total Environment*. 2017. Т. 599-600. С. 314–323. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.213>.

7. Examining the effects of the destroying ammunition, mines, and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit: part 1–pseudo-total concentration / N. Tešan Tomić та ін. *Water, air, & soil pollution*. 2018. Т. 229, № 9. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3957-0>.

8. Examining the effects of the destroying ammunition, mines and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit; part 2: determination of heavy metal fractions / N. Tešan Tomić та ін. *Water, air, & soil pollution*. 2018. Т. 229, № 9. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3950-7>.

Підп. і дага	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дага	
Інв.№подел.	

9. Fayiga A. O. Remediation of inorganic and organic contaminants in military ranges. *Environmental chemistry*. 2019. Т. 16, № 2. С. 81. URL: <https://doi.org/10.1071/en18196>.

10. Забруднення земель внаслідок агресії росії проти України / А. Сплодитель та ін. 2023. С. 14–15.

11. Воєнні дії на сході України – цивілізаційні виклики людству / О. Мелень-Забрамна та ін. МБО «Екологія–Право–Людина». 2015. С. 136.

12. Войціховська А. Дослідження ЕПЛ впливу військових дій на довкілля на сході України. *Екологія. Право. Людина*. 2015. № 23/24 (63/64). С. 57–59.

13. The Impact of World War one on the Forests and Soils of Europe. *The Undergraduate Research Journal at the University of Northern Colorado*. 2018. С. 16. URL: <https://digscholarship.unco.edu/urj/vol7/iss3/3/>.

14. Василюк О., Колодежна В. Якою має бути доля пошкоджених вибухами українських територій? - Українська природоохоронна група. Українська природоохоронна група. URL: <https://uncg.org.ua/iakoju-maie-buty-dolia-poshkodzhenykh-vybukhamy-ukrainskykh-terytorij/>.

15. Pichtel J. Distribution and fate of military explosives and propellants in soil: a review. *Applied and environmental soil science*. 2012. Т. 2012. С. 1–33. URL: <https://doi.org/10.1155/2012/617236>.

16. Krainiukov O., Krivicka I., Cherkashyna Y. Estimation of heavy metal impact on the photosynthetic apparatus of plants. *Young scientist*. 2020. Т. 4, № 80. URL: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-4-80-51>.

17. Чайка Т. О. Причини та механізми економічного стимулювання підвищення родючості ґрунтів. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2014. № 3. С. 155–158. doi: 10.31210/visnyk2014.03.32.

18. Дослідження органічного ринку України (2019–2020) / С. Галашевський та ін. Київ : ТОВ «Органік Стандарт», 2021. 65 с. URL: https://organicinfo.ua/Market_study_2019-2020_web.pdf.

Підп. і дага	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дага	
Інв.№подл.	

19. Про затвердження Порядку визначення шкоди та збитків, завданих Україні внаслідок збройної агресії Російської Федерації: Постанова Каб. Міністрів України від 20.03.2022 р. № 326: станом на 2 груд. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/326-2022-п#Text>.

20. Guo M., Song W., Tian J. Biochar-Facilitated soil remediation: mechanisms and efficacy variations. *Frontiers in environmental science*. 2020. Т. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.521512>.

21. Біогазові установки (БГУ) – обладнання для виробництва біогазу, біометану. ТОВ ВКФ «Агротех Консалт». URL: <https://agrotex.info/obladnannya/obladnannya-dlya-bgu>.

22. Synergetic effect of digestate dissolved organic matter and phosphogypsum properties on heavy metals immobilization in soils / P. Skvortsova та ін. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Т. 11, № 1. С. Н9–Н20. URL: [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).h2](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).h2).

23. Re-use of digestate and recovery techniques / A. P. Mucha та ін. *Trace elements in anaerobic biotechnologies*. 2019. С. 181–213. URL: https://doi.org/10.2166/9781789060225_0181.

24. Short-term effects on soil of biogas digestate, biochar and their combinations / R. Cardelli та ін. *Soil research*. 2018. Т. 56, № 6. С. 623. URL: <https://doi.org/10.1071/sr18017>.

25. Guo M., Song W., Tian J. Biochar-Facilitated soil remediation: mechanisms and efficacy variations. *Frontiers in environmental science*. 2020. Т. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.521512>.

26. Ткаченко А., Сагдєєва О. Аналіз методів виробництва біочару для використання в якості добавки для компостування. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство». 2024. С. 169–173. URL: <https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2023.291565>.

27. Recent advances in biochar engineering for soil contaminated with complex chemical mixtures: remediation strategies and future perspectives / J. Anaе та

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

ін. Science of the total environment. 2020. C. 144351.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144351>.

28. Properties of biochars from conventional and alternative feedstocks and their suitability for metal immobilization in industrial soil / Z. M. Gusiatin та ін. Environmental Science and Pollution Research. 2016. Т. 23, № 21. С. 21249–21261. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7335-4>.

29. Recycling of organic wastes through composting: process performance and compost application in agriculture / T. Sayara та ін. Agronomy. 2020. Т. 10, № 11. С. 1838. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>.

30. Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity / T. T. K. Ho та ін. Case studies in chemical and environmental engineering. 2022. С. 100211. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100211>.

31. Hanc A., Dreslova M. Effect of composting and vermicomposting on properties of particle size fractions. Bioresource technology. 2016. Т. 217. С. 186–189. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.058>.

32. Compost as a soil amendment to remediate heavy metal-contaminated agricultural soil: mechanisms, efficacy, problems, and strategies / M. Huang та ін. Water, Air, & Soil Pollution. 2016. Т. 227, № 10. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3068-8>.

33. Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity / T. T. K. Ho та ін. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2022. С. 100211. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100211>.

34. Michael-Igolima U., Abbey S. J., Ifelebuegu A. O. A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. Environmental Advances. 2022. С. 100319. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100319>.

35. Bioremediation strategies for soil and water pollution harnessing the power of microorganisms / D. S. S. Joshi та ін. Migration Letters. 2024. Т. 21. С. 1–20. URL: <https://migrationletters.com/index.php/ml/article/view/9226>.

Підп. і дага	
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.	
Підп. і дага	
Інв.№поодл.	

OC 20510040

Арк

56

Вип Арк № докум. Підп. Дата

36. Environmental applications of carbon-based materials: a review / K. P. Gopinath та ін. *Environmental Chemistry Letters*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01084-9>.

37. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII : станом на 1 жовт. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>.

38. Мальцева А., Евтушенко О., Сирик А. Безпека праці при роботі біогазових установок на підприємствах харчової промисловості. *SWorldJournal*. 2018. № 11-01. С. 46–51. URL: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2022-11-01-070>.

39. Cytotoxicity of biochar: a workplace safety concern? / G. Sigmund та ін. *Environmental Science & Technology Letters*. 2017. Т. 4, № 9. С. 362–366. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00267>.

40. Gamble S., Williams T. *Compost facility operator study guide* : навч. посіб. / ред. F. Rubright ; керівник проєкту E. Roney. Alberta Environment and Parks, 2018. 229 с.

41. Biochar-Assisted phytoremediation potential of sewage sludge contaminated soil / O. Anne et al. *Sustainability*. 2023. Т. 16, № 1. С. 183. URL: <https://doi.org/10.3390/su16010183>.

42. Compost application boosts soil restoration in highly disturbed hillslope vineyard / M. Lucchetta et al. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1289288>.

43. Patra D. K., Pradhan C., Patra H. K. Toxic metal decontamination by phytoremediation approach: concept, challenges, opportunities and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 18. P. 100672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100672>.

44. *Pseudomonas* sp. (Strain 10-1B): A potential inoculum candidate for green and sustainable remediation / M. Bello-Akinosho et al. *Remediation Journal*. 2017. Vol. 27, no. 3. P. 75–79. URL: <https://doi.org/10.1002/rem.21521>.

45. Alaboudi K. A., Ahmed B., Brodie G. Effect of biochar on Pb, Cd and Cr availability and maize growth in artificial contaminated soil. *Annals of Agricultural*

Підп. і дата
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дата
Інв.№подел.

					ОС 20510040		Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			57

URL: <https://doi.org/10.1016/j.aogas.2019.04.002>.

46. Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study / C. Nie et al. Chemosphere. 2018. Vol. 200. P. 274–282. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.134>.

47. Digestate not only affects nutrient availability but also soil quality indicators / A. M. García-López et al. Agronomy. 2023. Vol. 13, no. 5. P. 1308. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051308>.

48. Effects of digestate DOM on chemical behavior of soil heavy metals in an abandoned copper mining areas / X. Guo et al. Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 393. P. 122436. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122436>.

Інв. № покл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата	ОС 20510040					Арк
										58
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата						

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Забруднюючі речовини, що виникають в результаті воєнно-техногенного навантаження на ґрунт за типами та видами використовуваних систем зброї

Вид зброї, що використовується	Тип зброї, що використовується	Речовини, що виникають в результаті бойової діяльності та забруднюють ґрунт
Стрілецька зброя	Пістолети, снайперські гвинтівки, автомати, кулемети ручні, кулемети ротні.	Cu, Fe, Al, Fe, Mn, Zn, Pb, Sn, Mg, P, Al, хлориди, нітрати.
Гранатомети стрілецька зброя ручні гранати	Автоматичні (підствольні), ручні станкові, протитанкові.	Cu, Fe, Al, Fe, Mn, Zn, Pb; Sn, Mg, P, Al, Hg, Cd, Cr.
Озброєння БМП (БТР): стрілецька зброя ручні гранати	14,5 мм КВТ; 73 мм П; 30 мм П; 14,5 мм ВС.	Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, нафтопродукти.
Озброєння бойових машин піхоти (БМП, БТР), ручні гранати	–	Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, нафтопродукти.
Озброєння бойових машин піхоти (БТР) ПТКР (на електронних тренажерах) ручні гранати	–	Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Hg, Zn, Cd, Cr, нафтопродукти.
Озброєння танків, озброєння САУ стрілецька зброя ручні гранати	23 мм ВЯ, 115 мм ТП, 125 мм ТП .	Cu, Fe, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, P, нафтопродукти.
Озброєння танків зенітний кулемет танка ручні гранати	–	Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Hg, Pb, Zn, Cd, Cr, нафтопродукти.

Підп. і дата	Інв.№дубл.	Взаєм.інв.№	Підп. і дата	Інв.№поодл.
--------------	------------	-------------	--------------	-------------

ОС 20510040

Арк

Вип Арк № докум. Підп. Дата

59

Продовження таблиці А.1

Ствольна міномети	артилерія,	76 мм П ЗІС-3; 85 мм П Д-44; 100 мм ПТП МТ-12; 122 мм ГД-30,; 152 мм ПГ Д-20; 152 мм СГ 2С5; 152 мм СГ 2С19; 203,2 мм П 2С7 82 мм БМ-38, 2Б9; 120 мм ПМ; 120 мм М 2С9, 2С12; 240 мм М2С4	Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr нафтопродукти.
Ствольна ПТКР, артилерія, стрільба артилерії	артилерія протитанкова бойова наземної	9К111, 9К113, 9К149.	Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Hg, Zn, Cd, Cr, нафтопродукти.
Стрільби на гвинтівковому артилерійському комплекті		—	Cu, Fe, Al, Cd, Pb, Zn, Cr, Mn, Mg, Hg.
Рух самохідноартилерійських і зенітних установок, бойових машин піхоти, колісних, гусеничних бронетранспортерів		—	Pb, нафтопродукти.
Рух інженерних машин і автомобілів		—	Pb, нафтопродукти.
Рух автомобілів, гусеничних тягачів і транспортерів		—	Pb, нафтопродукти.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ОС 20510040	Арк
						60

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Переваги та недоліки (біо)інженерних технологій рекультивації важких металів і поліциклічних ароматичних вуглеводнів у ґрунті

(Біо)інженерна рекультивація	Переваги	Недоліки	Ефективність
Біочар	<ul style="list-style-type: none"> - Імобілізація забруднюючих речовин. - Низька вартість і довговічність. - Безпечний для довкілля. - Стійкий. - Секвестрація вуглецю - Підвищення родючості та якості ґрунтів. - Сприяє активності мікробів. - Затримує воду. 	<ul style="list-style-type: none"> - Зниження ефективності гербіциду та сприяє росту бур'янів. - Може представити важкі метали та поліциклічні ароматичні вуглеводні в ґрунт. - Можливе розкладання біочару через природне вивітрювання. - Може утворювати колоїди, що впливають на діяльність мікроорганізмів. - Може мати гальмівний вплив на старіння ґрунту, тому вимагає проміжного додавання біочару. - Старіння біочару може вплинути на ґрунтові мікроорганізми. 	<p>Біочар знижує біодоступність Cd і Pb у забрудненому ґрунті на 85% і 29% відповідно, і знижує біодоступну концентрацію нафтових вуглеводнів на 24–28%.</p>

Підп. і дата	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. № дубл.
Інв. № подл.	Вип	Арк	№ докум.

ОС 20510040

Арк

61

Продовження таблиці Б.1

<p>Дигестат</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Імобілізація забруднюючих речовин. - Низька вартість та довговічність. - Безпечний для довкілля. - Введення різних мікроорганізмів. - Поліпшення родючості та якості ґрунту. - Низька розчинність і біорозкладаність. - Передбачає переробку. - Видаляє патогени. - Збільшення мікробного різноманіття. - Збільшення активності мікробів. 	<ul style="list-style-type: none"> - Може внести органічні та/або неорганічні забруднювачі. - Може внести біологічні забруднювачі. - Введення неперероблені матеріали, такі як каміння, пластик, скло. - Перевезення на великі відстані можуть коштувати дорого. - Може призвести до вимивання поживних речовин, збільшення солоності ґрунту та викидів NH₃. 	<p>Дигестат покращує родючість ґрунту та активність мікробів (збільшення кількості генів 16S рРНК і дегідрогенази діяльність). Дослідження показало зниження алканів і нафтовими вуглеводнями на 99% і 38-57% відповідно.</p>
<p>Компост</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Поліпшення ґрунтової родючості (збільшується запас поживних елементів, ємність катіонного обміну, поліпшуються воднофізичні властивості ґрунтів). 	<ul style="list-style-type: none"> - Неоднозначність результатів щодо імобілізуючого впливу на рухливість важких металів, внаслідок різного ступеню розкладання органічних добрив. - Вимоги до великого простору. 	<p>Компост містить значну кількість цінних поживних речовин для рослин, а також низку необхідних мікроелементів. Застосування компосту в забруднених сільськогосподарських ґрунтах може зменшити біодоступність важких металів.</p>

Інв.№подел.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

Продовження таблиці Б.1

Компост	- Підвищення стійкості ґрунтів до впливу забруднюючих речовин.	- Кропітка і трудомістка практика.	Однак додавання компосту також може збільшити біодоступність важких металів. Коли рівні концентрації в їстівних частинах рослин перевищують порогові значення, компост потрібно поєднати з деякими іншими методами ремедіації (фіторемердіація) для видалення важких металів.
---------	--	------------------------------------	---

Інв.№подел.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата
-------------	--------------	-------------	------------	--------------

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ОС 20510040

Арк

63