

БІОРЕМЕДІАЦІЙНЕ ВІДНОВЛЕННЯ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Бондар Т.О.¹, Шестопалов О.В.², Босюк А.С.², Сакун А.О.², Нечипоренко Д.І.², Бондар Т.В.³

¹Комунальний заклад «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»
вул. Велозаводська, 35, 61176, м. Харків

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

³Харківський національний медичний університет
пр. Науки, 4, 61022, м. Харків

arahisovasova@gmail.com, Oleksii.Shestopalov@khpi.edu.ua, Alona.Bosiuk@mit.khpi.edu.ua,
Antonina.Sakun@khpi.edu.ua, Dmytro.Nechyporenko@khpi.edu.ua, tetanabondar@gmail.com

Дослідження присвячене розробці та впровадженню біоре mediaційних технологій для відновлення нафтозабруднених ґрунтів України, які зазнали значного екологічного тиску внаслідок воєнних дій. Проблема нафтозабруднення ґрунтів, спричинена руйнуванням нафтової інфраструктури, призводить до деградації родючості, зниження біорізноманіття та порушення водно-повітряного режиму. У роботі використано комбінований підхід, що включає фіторе mediaцію з використанням рослин-сидератів (сорго, просо) та мікробну біоре mediaцію з застосуванням бактерій роду *Pseudomonas* (препарат «Біонорма»). Додатково досліджено вплив компосту та органічних добрив на прискорення самоочищення ґрунтів, що сприяє підвищенню активності мікроорганізмів і відновленню родючості. Експерименти проводилися в лабораторних умовах із 42 зразками ґрунту, що імітували сильне нафтозабруднення (46000 мг/кг). Результати показали, що сорго в комбінації з бактеріями *Pseudomonas* забезпечує найвищу ефективність у зниженні рівня забруднення, сприяючи формуванню органо-мінеральних агрегатів і нейтралізації фітотоксичності. Застосування методу «комп'ютерного зору» на базі нейромереж DeepLabv3 та YOLOv8 із використанням Raspberry Pi5 дозволило з точністю >95% оцінити динаміку росту рослин (зелену масу, висоту, кількість стебел). Агрохімічні аналізи підтвердили зміну рН ґрунту до нейтрального, зниження вмісту важких металів і часткове самоочищення ґрунту. Дослідження має наукову новизну завдяки комплексному підходу, адаптованому до специфічних ґрунтово-кліматичних умов регіону, та практичну цінність для рекультивації забруднених територій у поствоєнний період. Результати можуть бути використані для розробки рекомендацій з відновлення аграрних угідь, автоматизації моніторингу та включення до стратегій сталого розвитку. *Ключові слова:* біоре mediaція, нафтозабруднення, фіторе mediaція, екологічне відновлення, родючість ґрунту, агроекологія, сталий розвиток, компост, органічні добрива, самоочищення ґрунту.

Bioremediation of oil-contaminated soils: experimental study. Bondar T., Shestopalov O., Bosiuk A., Sakun A., Nechiporenko D., Bondar T.

The study focuses on the development and implementation of bioremediation technologies for the restoration of oil-contaminated soils in Ukraine, which have been significantly impacted by environmental stress due to military activities. Oil pollution, caused by the destruction of oil infrastructure, leads to soil fertility degradation, biodiversity loss, and disruption of water-air regimes. The research employs a combined approach, integrating phytoremediation using cover crops (sorghum, millet) and microbial bioremediation with *Pseudomonas* bacteria («Bionorma» preparation). Additionally, the use of compost and organic fertilizers was investigated to enhance soil self-purification, boosting microbial activity and fertility restoration. Experiments were conducted under laboratory conditions with 42 soil samples simulating severe oil contamination (46,000 mg/kg). The results demonstrated that sorghum, combined with *Pseudomonas* bacteria, exhibits the highest efficiency in reducing contamination levels, promoting the formation of organo-mineral aggregates, and neutralizing phytotoxicity. The application of the «computer vision» method based on DeepLabv3 and YOLOv8 neural networks, using Raspberry Pi5, enabled the dynamic assessment of plant growth parameters (green mass, height, stem count) with over 95% accuracy. Agrochemical analyses confirmed a shift in soil pH to neutral, a reduction in heavy metal content, and partial self-purification of chernozems. The study is scientifically novel due to its comprehensive approach tailored to the region's specific soil-climatic conditions and holds practical value for the reclamation of contaminated areas in the post-war period. The findings can be used to develop recommendations for restoring agricultural lands, automating monitoring processes, and integrating into sustainable development strategies. *Key words:* bioremediation, oil contamination, phytoremediation, ecological restoration, soil fertility, agroecology, sustainable development, compost, organic fertilizers, self-cleaning of the soil.

Постановка проблеми. Україна, відома своїми високородючими ґрунтами, зокрема чорноземами, які складають значну частину сільськогосподарських угідь країни, зазнає значного екологічного тиску через забруднення ґрунтів нафтопродуктами

[1]. Це зумовлено антропогенними факторами, зокрема руйнуванням нафтової інфраструктури (нафтобаз, нафтопроводів, транспортних вузлів) унаслідок воєнних дій, що тривають з 2014 року, та повномасштабним вторгненням з 2022 року. За

даними математичного моделювання, пошкоджено близько 1,91 млн га аграрних земель у регіонах, таких як Харківська, Донецька, Луганська, Сумська та Запорізька області (Лівобережна Україна) [1, 2]. Нафтопродукти, потрапляючи в ґрунт, змінюють його фізико-хімічні властивості, знижують аерацію, пригнічують мікрофлору, спричиняють фітотоксичність і призводять до тривалої деградації родючості. Відповідно до Наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки «Методики визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства» (від 20.10.1997 р., № 171) [3], концентрація нафтопродуктів понад 5 мг/кг класифікується як «середній» або «сильний» рівень забруднення, що вимагає негайних заходів рекультивації. Проблема полягає у відсутності достатньої кількості економічно доступних, екологічно безпечних і ефективних методів очищення ґрунтів, адаптованих до умов Лівобережної України, де чорноземи мають унікальні гумусові характеристики. Біоремедіація, що включає фіторемедіацію та мікробне біодоповнення, розглядається як перспективний підхід, але потребує детального вивчення ефективності конкретних рослин (сорго, просо) та бактерій (*Pseudomonas*) у лабораторних і польових умовах, а також інтеграції сучасних цифрових технологій для моніторингу процесів відновлення, таких як «комп'ютерний зір» [4]. Також, дослідження [7] показують, що внесення компосту та органічних добрив може значно прискорити самоочищення ґрунтів за рахунок стимуляції мікробної активності, що є важливим для відновлення родючості.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю збереження родючості ґрунтів України, які є ключовим ресурсом для сільського господарства та економіки країни, забезпечуючи її провідні позиції на світовому ринку зернових, соняшнику та кукурудзи. Нафтозабруднення, спричинене воєнними діями, становить серйозну загрозу для продовольчої безпеки, екологічної стабільності та сталого розвитку [5, 6]. За оцінками, пошкодження ґрунтів призводить до втрати біорізноманіття, порушення водно-повітряного режиму та тривалого токсичного впливу на екосистеми [7]. Традиційні методи очищення (фізико-хімічні, термічні) є дорогими, енергоємними та можуть завдавати додаткової шкоди довкіллю. Біоремедіація, як екологічно безпечна та економічно доцільна технологія, має значний потенціал, але її ефективність для специфічних умов, зокрема для чорноземів із високим вмістом гумусу Лівобережної України, недостатньо досліджена. Використання рослин-сидератів (сорго, просо) та бактерій роду *Pseudomonas*, а також інноваційних методів моніторингу, таких як «комп'ютерний зір», відкриває нові можливості для точної оцінки динаміки відновлення ґрунтів. Застосування

компосту, як показано в дослідженні [17], сприяє збагаченню ґрунту органічними речовинами, що стимулює мікробну активність і прискорює розкладання нафтопродуктів. Дослідження є актуальним та спрямоване на розробку практичних рішень для рекультивації забруднених територій, що має значення для відновлення аграрного сектору та екологічної рівноваги.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок сприяє розвитку біоремедіаційних технологій для очищення нафтозабруднених ґрунтів шляхом інтеграції фіторемедіації, мікробної біоремедіації (*Pseudomonas*) та «комп'ютерного зору» (DeepLabv3/YOLOv8) для точного моніторингу рослин [8-10]. Наукова новизна полягає в комплексному дослідженні, що підтверджує потенціал сорго для зниження забруднення та формування органо-мінеральних агрегатів. Дослідження також включає оцінку впливу компосту та органічних добрив [7], сприяють прискоренню самоочищення ґрунтів шляхом підвищення біологічної активності. Практично результати сприяють рекультивації ґрунтів у поствоєнний період, покращенню їх структури та зниженню фітотоксичності [6, 8, 9]. Дослідження має значення для агроекології, екологічного менеджменту та сталого розвитку. Його освітній потенціал підтримує популяризацію екотехнологій та стратегії управління ґрунтовими ресурсами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технології біологічної ремедіації розглядаються сучасними дослідниками як екологічно безпечний і науково обґрунтований підхід до очищення забруднених ґрунтів, що базується на здатності мікроорганізмів, грибів і рослин трансформувати або мінералізувати токсичні сполуки до нетоксичних продуктів, забезпечуючи природне відновлення екосистеми без вторинного забруднення [11]. Подальші дослідження свідчать, що ефективність біоремедіаційних процесів значною мірою залежить від збалансованого поєднання біотичних та абіотичних чинників, зокрема складу мікробних консорціумів, виду фіторемедіантів, рівня аерації, вологості та наявності поживних елементів. Встановлено, що синергетичне поєднання фіторемедіації з біоаугментацією за участю адаптованих штамів мікроорганізмів суттєво прискорює розклад нафтових вуглеводнів, сприяє відновленню мікробного балансу ґрунту та стабілізації екосистеми [12]. Важливу роль у цих процесах відіграє ризосферна зона, де рослини через кореневі виділення стимулюють активність мікроорганізмів, які продукують ферменти, здатні до біохімічного окиснення нафтових вуглеводнів. Комбіноване застосування фіторемедіації та інокуляції специфічними бактеріальними штамами дозволяє скоротити період детоксикації ґрунтів і підвищити рівень їх біологічного відновлення [13], що робить цей підхід перспективним для очищення нафтозабруднених

територій, особливо в умовах високого антропогенного навантаження та воєнних екологічних викликів.

Згідно з дослідженням [14], біотехнологічні методи, зокрема фітореMediaція, можуть стати ключовим інструментом для відновлення ґрунтів, забруднених унаслідок бойових дій, вибухів та витоків паливно-мастильних матеріалів. Автор підкреслює ефективність використання аборигенних рослин, адаптованих до місцевих умов, які здатні не лише зменшувати концентрацію вуглеводневих сполук, але й сприяти відновленню структури ґрунту та його біологічної активності.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність численних досліджень, присвячених рекультиватії нафтозабруднених ґрунтів, залишається недостатньо вивченою ефективність біореMediaційних технологій у специфічних ґрунтово-кліматичних умовах, зокрема Лівобережної України. Попередні роботи розглядали окремі аспекти застосування фітореMediaції чи мікробних консорціумів, однак відсутні комплексні підходи, що поєднують їх дію. Недостатньо досліджено поведінку рослин-сидератів і бактерій роду *Pseudomonas* за високих рівнів нафтозабруднення та зміни агрохімічних властивостей чорноземів у процесі реMediaції. Також потребує розвитку оцінка впливу органічних добрив і компосту на біореMediaційні процеси, що, за даними [17], може значно прискорити розкладання забруднювачів завдяки збагаченню поживними речовинами. Також потребує розвитку цифровий моніторинг стану біореMediaційних систем із використанням методів «комп'ютерного зору» для об'єктивної оцінки параметрів росту рослин. Саме ці аспекти зумовлюють необхідність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення підходів до екологічно безпечного відновлення нафтозабруднених ґрунтів регіону в умовах воєнних екологічних викликів.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає в комплексному підході до біореMediaції нафтозабруднених ґрунтів України з поєднанням фітореMediaції (сорго, просо) та бактерій *Pseudomonas* (препарат «Біонорма»), враховуючи регіональні ґрунтово-кліматичні умови. Уперше застосовано «комп'ютерний зір» (DeepLabv3, YOLOv8, Raspberry Pi5) для високоточного моніторингу рослин. Новизною є також оцінка впливу компосту та органічних добрив на прискорення самоочищення ґрунтів, що сприяє підвищенню мікробної активності та родючості. Кількісно оцінено самоочищення чорноземів та формування органо-мінеральних агрегатів, розширюючи знання про взаємодію рослин, мікроорганізмів і ґрунту в умовах воєнних викликів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження вперше пропонує комплексний підхід до оцінки біореMediaції нафтозабруднених чорноземів Лівобережної України, поєднуючи лабораторні

методи з цифровими технологіями, інтегруючи фітореMediaцію (сорго, просо) та мікробну біореMediaцію (бактерії *Pseudomonas*), визначаючи їх спільну ефективність у відновленні ґрунтів. Включення компосту та органічних добрив, як показано в роботі [17], сприяє прискоренню самоочищення шляхом стимуляції мікробної активності. Метод «комп'ютерного зору» на базі нейромереж DeepLabv3 і YOLOv8 забезпечує точний моніторинг росту рослин (рис. 1), сприяючи автоматизації екологічного спостереження. Міждисциплінарна методологія, що об'єднує екологію, агрономію, мікробіологію та ІТ, створює основу для подальших досліджень і сталого управління ґрунтами.

Викладення основного матеріалу. На першому етапі дослідження для біореMediaції обрано рослини-сидерати – сорго (*Sorghum bicolor*) і просо (*Panicum miliaceum*), які накопичують органічну масу та покращують структуру і родючість ґрунту, що вказує на їхній потенціал для очищення від нафтового забруднення [15; 16]. Використано 60 кг чистого чорнозему та пісок для дренажу, закуплені в спеціалізованій установі. Для імітації сильного забруднення (46000 мг/кг, згідно з Наказом № 171 МОЗ України [3]) змішано 30 кг ґрунту з 1,5 л дизельного пального та 150 мл напівсинтетичної моторної оливи. Цей рівень близький до реальних показників після витоків нафтопродуктів у Харківській області внаслідок воєнних дій. Експеримент проводили з 42 лабораторними ємностями (табл. 1).

На основі даних табл. 1 створено діаграму, що відображає середню вагу рослин (г) під час біореMediaційного відновлення ґрунту (Рис. 2).

Згідно рис. 2, середня вага рослин у контрольному ґрунті (групи 1–6) була значно вищою, ніж у забрудненому (групи 7–12). Найбільшу біомасу в контрольному ґрунті показали рослини 3-ї (15,0 г) та 5-ї (15,9 г) груп, що свідчить про високу родючість культур у сприятливих умовах. Використання ґрунтових бактерій підвищувало біомасу рослин у контрольному ґрунті на 4%, а в забрудненому – на 20%, причому найкращий результат показало сорго в 11-й групі.

Додатково для мікробної біореMediaції використувався препарат «Біонорма» з ґрунтовими бактеріями *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aureofaciens*, *Pseudomonas putida*, які мають підвищену бактерицидну та фунгіцидну активність. Лабораторні матеріали включали колориметричні тест-смужки, ваги, колби, піпетки, мікроскоп, рН-метр, дистильовану воду та фільтрувальний папір. Для цифрового моніторингу використано мікрокомп'ютер Raspberry Pi5 з датчиком BME280 (тиск, температура, вологість), камери 2E FHD та Raspberry Pi5 OV5640 5MP, а також ПК для обробки даних (AMD Ryzen 9 5950X, 64 GB RAM, GTX1080 8GB).

На першому етапі дослідження застосовано як базовий метод фітореMediaції (використання рослин для поглинання забруднювачів), так і метод мікроб-

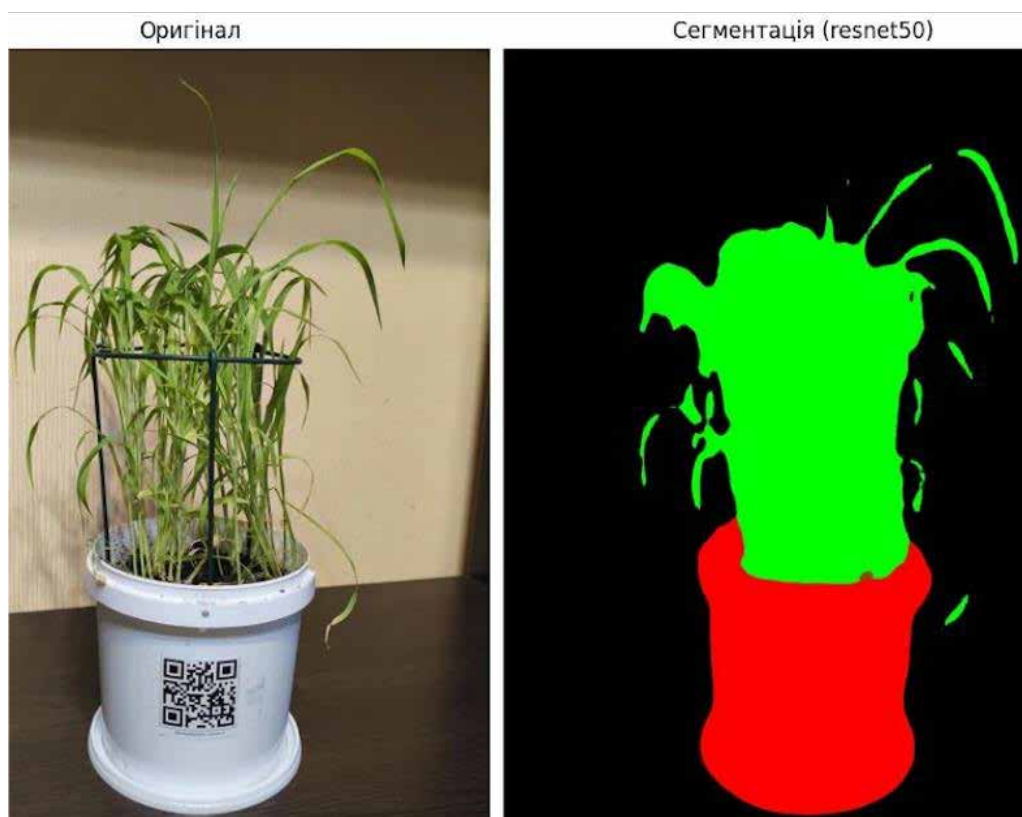


Рис. 1. Виокремлення зеленої маси рослини за допомогою методу «комп'ютерного зору»

Таблиця 1

Групи та результати першого етапу біоремедіаційного відновлення ґрунту

Досліджуваний ґрунт	Рослини/без рослин	Група, №	Кількість ємностей, шт.	Середня вага, г	Об'єм охоплення кореня, см ³
контрольний ґрунт	просо	1 група	3	7,5	147,7
	сорго	2 група	3	13,3	133,3
	суміш (просо+сорго)	3 група	3	15,0	248,3
контрольний ґрунт	просо + ґрунтові бактерії	4 група	3	9,8	85,0
	сорго + ґрунтові бактерії	5 група	3	15,9	39,7
	суміш (просо+сорго) + ґрунтові бактерії	6 група	3	10,8	132,0
забруднений ґрунт	просо	7 група	3	1,8	9,0
	сорго	8 група	3	2,5	32,7
	суміш (просо+сорго)	9 група	3	2,5	24,7
забруднений ґрунт	просо + ґрунтові бактерії	10 група	3	2,7	14,0
	сорго + ґрунтові бактерії	11 група	3	4,0	30,0
	суміш (просо+сорго) + ґрунтові бактерії	12 група	3	3,9	24,0
забруднений ґрунт	без рослин + ґрунтові бактерії	13 група	3	-	-
забруднений ґрунт	без рослин	14 група	3	-	-

ної біоремедіації (введення бактерій для розкладання вуглеводнів), а також комбінований варіант із використанням бактеріальних консорціумів разом із рослинними агентами.

Фіторемедіація полягала у висадженні рослин у забруднені зразки для оцінки їхньої здатності трансформувати токсини. Мікробна біоремедіація передбачала інокуляцію бактерій *Pseudomonas*, які

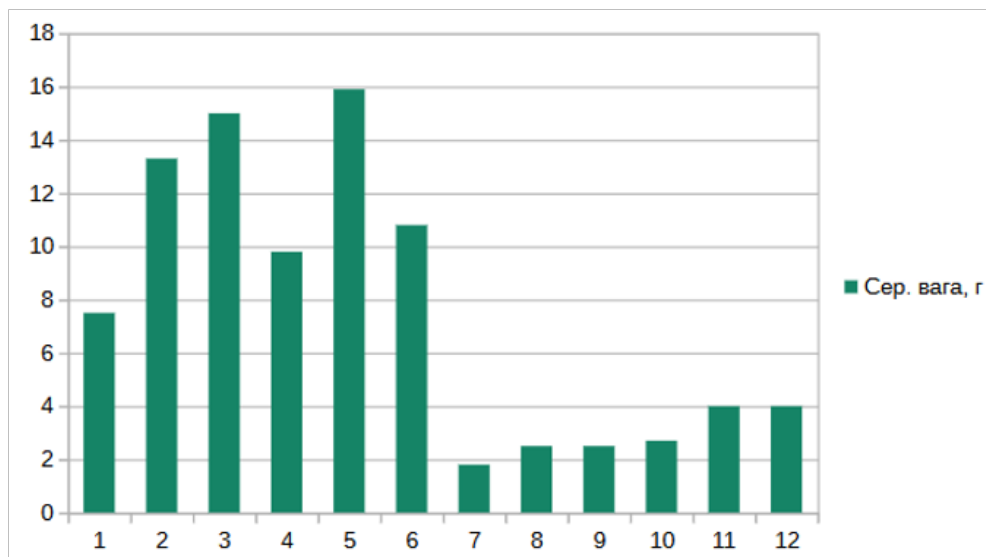


Рис. 2. Середня вага рослин (г) біоремедіаційного відновлення ґрунту

використовують вуглеводні як джерело енергії, мінералізуючи їх до CO_2 , H_2O та біомаси. Комбінований метод поєднував рослини з бактеріями для синергетичного ефекту.

Експеримент проводився в лабораторних умовах з 12 групами зразків (по 3 ємності в кожній): контрольні (чистий ґрунт) та забруднені (нафтопродукти) з варіаціями рослин (просо, сорго, суміш) та бактерій з фіксацією динаміки росту (табл. 2 та 3). Повторний посів (групи 13–14) оцінював залишкову токсичність.

Результати експериментального дослідження біоремедіаційного відновлення ґрунтів у лабораторних умовах показали, що в контрольних групах рослини формували значно більшу біомасу та об'єм коренів, ніж у забруднених (зниження на 70–90% через токсичність). Використання бактерій *Pseudomonas* у чистому ґрунті зменшувало кореневу систему, але стимулювало зелену масу; у забрудненому – нейтралізувало токсини, підвищуючи біомасу на 20%.

Найефективнішими виявилися сорго та суміш (просо + сорго) з бактеріями, що сприяло формуванню «тістоподібної» структури ґрунту через екзополісахариди. Повторний посів підтвердив самоочищення ґрунту (група 14) та посилення мікробами (група 13).

Агрохімічні дослідження виявили зміну pH (рис. 3) з кислої (6,0–6,8) до нейтральної (6,8–7,2) після ремедіації, використання нітратів мікробами та зменшення важких металів (мідь не виявлена). Мікроскопія підтвердила гідрофобність забрудненого ґрунту та її зникнення після очищення.

Отримані результати (рис. 4) свідчать про високу ефективність комбінованої біоремедіації для відновлення чорноземів Лівобережної України.

Головні висновки.

1. Сорго в комбінації з бактеріями *Pseudomonas* демонструє найвищу ефективність у зниженні рівня нафтозабруднення та відновленні родючості ґрунтів. Суміш сорго та проса з бактеріями забезпечує стабільну динаміку росту.

Таблиця 2

Результати дослідження середньої площі зеленої маси та висоти рослин визначених «комп'ютерним зором» (Групи-1-6)

Середня площа зеленої маси, cm^2							Середня висота рослин, см					
Дата	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
01.07.25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16.07.25	18,5	115,0	74,9	78,4	236,1	44,1	7,7	13,1	14,0	8,5	14,3	13,1
20.07.25	38,3	212,9	138,7	109,1	366,7	84,4	13,4	22,9	21,8	12,5	22,5	20,2
21.07.25	73,4	273,0	243,4	143,0	431,4	128,7	18,2	28,3	29,4	16,1	27,6	22,4
31.07.25	123,5	406,7	370,5	184,3	503,2	198,2	23,2	38,8	38,8	20,9	33,8	25,8
11.08.25	184,2	373,2	525,3	208,4	392,7	204,9	34,5	37,5	41,2	22,3	35,7	30,0
22.08.25	210,7	396,7	470,5	244,1	410,7	293,5	34,0	42,5	47,5	33,4	37,4	34,0
07.09.25	259,8	537,6	515,5	315,2	484,2	355,4	37,5	43,9	49,5	40,4	41,5	39,8

Таблиця 3

**Результати дослідження середньої площі зеленої маси та висоти рослин
визначених «комп'ютерним зором» (Групи-7-12)**

Дата	Середня площа зеленої маси, см ²						Середня висота рослин, см					
	7	8	9	10	11	12	7	8	9	10	11	12
01.07.25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16.07.25	0,1	6,2	2,2	1,1	40,9	15,7	1,2	6,0	4,6	2,2	8,1	6,4
20.07.25	0,2	10,0	3,7	1,9	65,9	28,9	1,6	9,7	7,8	2,4	12,0	10,4
21.07.25	0,4	13,0	4,7	2,6	99,6	39,0	1,9	12,2	9,8	2,6	16,1	13,0
31.07.25	0,4	15,9	6,2	3,4	71,4	57,0	1,8	14,6	10,7	2,9	16,3	15,0
11.08.25	0,2	14,6	7,1	5,6	62,8	54,2	1,3	12,8	10,1	3,2	16,4	14,8
22.08.25	0,3	13,6	6,2	3,8	51,0	55,2	2,1	11,0	9,3	4,0	15,6	13,2
07.09.25	0,2	12,1	5,1	2,6	55,5	45,2	1,5	10,7	9,1	3,7	16,4	11,5



Рис. 3. Приклад дослідження колориметричними тест-смужками



Рис. 4. Наочний стан ґрунтів після біоремедіації

2. Бактерії *Pseudomonas* нейтралізують токсичний вплив нафтопродуктів, підвищуючи біомасу рослин на 20% у забрудненому ґрунті та сприяючи утворенню органо-мінеральних агрегатів через екзополісахариди.

3. Метод «комп'ютерного зору» забезпечує точну й об'єктивну оцінку параметрів рослин, що дозволяє автоматизувати моніторинг біоремедіації та зменшити похибки порівняно з ручними методами.

4. Ґрунти мають природну здатність до часткового самоочищення, яка посилюється за комбінованого використання рослин і бактерій.

5. Біоремедіація сприяє відновленню структури ґрунту, зниженню вмісту важких металів і підвищенню родючості, що є важливим для аграрного сектору.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати можуть бути використані для розробки рекомендацій із рекультивациі нафтозабруднених ґрунтів, зокрема у регіонах Лівобережної України – Харківській, Донецькій, Луганській, Сумській та Запорізькій областях.

Застосування сорго та бактерій *Pseudomonas* є економічно доцільним і екологічно безпечним рішенням для відновлення аграрних угідь у поствоєнний період. Метод «комп'ютерного зору» може бути масштабованим для польових умов, що дозволить автоматизувати моніторинг біоремедіації на великих територіях. Інтеграція з дронами та супутниковими системами може підвищити ефективність оцінки стану ґрунтів. Отримані дані створюють основу для подальшого вивчення комбінованих біоремедіаційних технологій, зокрема тестування інших рослин і мікроорганізмів, а також впливу різних рівнів забруднення на ефективність очищення. Також, результати можуть бути включені до навчальних програм з агроєкології, ґрунтознавства, екологічного менеджменту та біотехнологій, сприяючи підготовці фахівців для вирішення екологічних викликів.

Рекомендації щодо використання біоремедіації можуть бути інтегровані в національні та регіональні стратегії сталого розвитку, зокрема для управління ґрунтовими ресурсами та відновлення екосистем у зонах воєнного впливу.

Література

1. Шуміло Л., Дрозд С., Кусяул Н. Використання супутникових даних у дослідженні екологічних та економічних наслідків війни для сільськогосподарського сектору в Україні. UWEC (Ukraine War Environmental Consequences Work Group). URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/satellite-data-aids-the-study-of-the-wars-environmental-and-economic-consequences-for-ukraines-agriculture-sector/> (дата звернення: 13.10.2025).
2. Геопросторова система моніторингу впливу війни на сільське господарство України за супутниковими даними : проєкт 2023.04/0039 Національного фонду досліджень України. URL: <https://mmda.ipt.kpi.ua/geospatial-monitoring-system-for-the-war-impact-on-the-agriculture-of-ukraine-based-on-satellite-data/> (дата звернення: 17.10.2025).
3. Методики визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки № 171 від 20.10.1997 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98#Text> (дата звернення: 17.10.2025).
4. Гангало І.М., Лісовий Д.О., Жебка В.В. Розпізнавання об'єктів за допомогою технологій комп'ютерного зору. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2022. № 4(77). С. 46-52. DOI:10.31673/2412-4338.2022.044652
5. Диняк О.В., Кошлякова І.С. Потенційна небезпека для довкілля та населення від нафтохімічного забруднення геологічного середовища в наслідок бойових дій. *Екологічні науки*. 2023. № 6(51). С. 136-141. DOI: 10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.22
6. Бондар Т. О., Веденіна М. В. Екологічні проблеми під час війни в Україні: вплив нафтопродуктів на сільськогосподарські рослини : матер. XXX Міжнар. наук.-практ. конф. «Modern information technologies in education and sciences». 29-31 липня, 2024 р. Прага, Чехія. С. 7-9.
7. Босюк А. С., Шестопапов О. В., Разно М. Р. Біоіндикація як метод визначення якості ґрунту та впливу забруднювачів на флору: аналіз інгібіторної дії на ріст коренів та вплив хімічних речовин на проростання та ріст рослин. *Екологічні науки*. 2024. № 2(53). С. 84-89. DOI: 10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.12
8. Бондар Т. О., Веденіна М. В., Шестопапов О. В. Фітотоксичний ефект нафтопродуктів на сільськогосподарські рослини : експериментальне дослідження : матер. IX Міжнар. наук.-практ. конф. «Research of young scientists : from idea generation to project implementation». October 28-30, 2024. Lyon, France. С. 11-14.
9. Бондар Т. О., Веденіна М. В. Забруднення ґрунтів нафтопродуктами під час війни в Україні : матер. Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Українська етнічна культура в глобалізованому світі». 2025. Житомир, Україна.
10. Бондар Т.О., Босюк А.С., Нечипоренко Д.І., Ліфер В.С., Мельник І.В. Оцінка впливу нафтопродуктів на розвиток сільськогосподарських рослин. *Український журнал природничих наук*. № 11. С. 250–259. DOI: 10.32782/naturaljournal.11.2025.27
11. Agnello A. C., Bagard M., van Hullebusch E. D., Esposito G., Hugueno D. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *Science of The Total Environment*. 2016, № 563–564. P. 693–703. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.061
12. Žaltauskaitė J., Meištininkas R., Dikšaitytė A., Degutytė-Fomins L., Mildaženė V., Naučienė Z., Žūkienė R., Koga K. Heavy fuel oil-contaminated soil remediation by individual and bioaugmentation-assisted phytoremediation with *Medicago sativa* and with cold plasma-treated *M. sativa*. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. № 31(20). P. 30026–30038. DOI: 10.1007/s11356-024-33182-4
13. Ashraf S., Ali Q., Zahir Z. A., Ashraf S., Asghar H. N. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. 174. P. 714–727. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.02.068

15. Melnychenko V. Phytoremediation of soils contaminated as a result of military and anthropogenic impact. *Naukovi Dopovidi Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraïni*. 2024. № 20(4). P. 72–84. DOI: 10.31548/dopovidi/3.2024.72
16. Нікітенко М. П., Аверчев О. В. Вирощування проса в умовах Півдня України. *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 116. Частина 2. С. 47-55. DOI: 10.32851/2226-0099.2020.116.2.7
17. Правдива Л. А. Агротехнологічні основи вирощування сорго звичайного двокольорового в лісостепу України : дис. ... д-ра с.-г. наук : 06.01.09. Київ, 2023. 490 с.
18. Разно М. Р., Тихомирова Т. С., Босюк А. С., Шестопалов О. В. Дослідження процесу побутового компостування органічних відходів рослинного походження. *Екологічні науки*. 2025. № 1 (58). С. 316-323. DOI: 10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.51

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025