

ЕФЕКТИВНІСТЬ БІОРЕМЕДІАЦІЇ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ

БОНДАР Т. О. – учениця 9-М2 класу

orcid.org/0009-0007-9443-8175

Комунальний заклад «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

ШЕСТОПАЛОВ О. В. – кандидат технічних наук, доцент

orcid.org/0000-0001-6268-8638

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

БОСЮК А. С. – доктор філософії

orcid.org/0000-0001-5254-2272

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

САКУН А. О. – доктор філософії, доцент

orcid.org/0000-0002-1079-7856

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

НЕЧИПОРЕНКО Д. І. – кандидат технічних наук, доцент

orcid.org/0000-0002-5570-1061

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

БОНДАР Т. В. – доктор філософії

orcid.org/0000-0002-9487-5363

Харківський національний медичний університет

Постановка проблеми. Регіони з високородючими чорноземами – це переважно Лівобережна Україна, становлять основу аграрного сектору країни. Саме ці регіони стикаються з гострою проблемою забруднення ґрунтів нафтопродуктами внаслідок воєнних дій, аварій на нафтовій інфраструктурі та антропогенного навантаження. З початку повномасштабного вторгнення 2022 року пошкоджено понад 1,91 млн га сільськогосподарських угідь у Харківській, Сумській, Донецькій та інших областях, де концентрація нафтопродуктів перевищує допустимі норми (понад 5 мг/кг), призводячи до деградації ґрунтів, зниження родючості, порушення мікробного балансу та фітотоксичності для культур. Ця проблема загрожує продовольчій безпеці, біорізноманіттю та економічній стабільності України, оскільки чорноземи забезпечують значну частку експорту зернових і олійних культур. У загальному вигляді проблема полягає в пошуку ефективних, екологічно безпечних методів очищення ґрунтів, адаптованих до регіональних умов, де традиційні фізико-хімічні підходи є енергоємними та шкідливими для екосистеми. Зв'язок з науковими завданнями проявляється в розвитку біотехнологій для рекультивації, а з практичними – у відновленні аграрних територій у поствоєнний період, що відповідає стратегіям сталого розвитку ООН [1, 2] та національним програмам екологічної безпеки України [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження проблеми забруднення ґрунтів нафтопродуктами та їх очищення започатковано в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених, таких як Борецька І., Джура Н., Романюк О. [4], які вивчали фіторе mediaцію з використанням енергетичних культур для техногенно забруднених ґрунтів, демонструючи потенціал рослин у відновленні структури та біологічної активності. Аналогічно, Мельниченко В. [5] акцентував увагу на фіторе mediaції ґрунтів, забруднених через військові дії, підкреслюючи роль аборигенних рослин у зменшенні концентрації вуглеводнів. Автори [6] у своїй роботі досліджували біоіндикацію як метод оцінки якості ґрунту

та впливу забруднювачів на флору, зокрема аналізуючи інгібіторну дію хімічних речовин на ріст коренів і проростання рослин. Дослідники показали, що біоіндикація дозволяє кількісно оцінити токсичний вплив нафтопродуктів на рослини, що є важливим для вибору ефективних культур для фіторе mediaції. У свою чергу, зарубіжні автори [7–10], досліджували потенціал енергетичних культур для фітодеградації та синергетичний ефект рослинно-мікробних взаємодій для ремедіації. Однак не вирішеними залишаються аспекти ефективності мікробної біоаугментації з бактеріями роду *Pseudomonas* у поєднанні з фіторе mediaцією для ґрунтів України, зокрема при високих рівнях забруднення (понад 10 мг/кг), а також інтеграція цифрових технологій, таких як «комп'ютерний зір», для моніторингу динаміки процесів.

Мета статті – оцінити ефективність фіторе mediaції з використанням рослин-сидератів (сорго, просо) та мікробної біоаугментації бактеріями роду *Pseudomonas* для очищення ґрунтів України від нафтопродуктів у лабораторних умовах, із застосуванням методу «комп'ютерного зору» для динамічної оцінки параметрів рослин і ґрунту.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проводилося в лабораторних умовах з використанням 60 кг чистого ґрунту (чорнозему) Лівобережної України (м. Харків) та піску для дренажу. Для імітації «особливо сильного» рівня забруднення (46 000 мг/кг) змішано 30 кг ґрунту з 1,5 л дизельного пального (густина 0,832 кг/л) та 150 мл напівсинтетичної моторної оливи (густина 0,88 кг/л). Рослини-сидерати: сорго (*Sorghum bicolor*) та просо (*Panicum miliaceum*), а також їх суміш. Для біоаугментації використано препарат «Біонорма» з бактеріями *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aureofaciens*, *Pseudomonas putida* (рис. 1). Механізм дії препарату: бактерії, що входять до складу препарату здатні продукувати антибіотики групи феназинів, пірролітрин та сульфазезин, які пригнічують розвиток фітопатогенів як бактеріального, так і грибкового походження. Феназини індують утворення активних форм



Рис.1. Наочне зображення препарату «Біонорма» PSEUDOMONAS

кисню всередині клітин усіх фітопатогенних мікроорганізмів, що призводить до їх загибелі. Пірролінтрин порушує осмотичний тиск клітин грибкових фітопатогенів, призводячи до їх автолізу. Антибіотик сульфазезин володіє бактеріостатичною активністю, призводить до порушення синтезу тетрагідрофолієвої кислоти, необхідної для синтезу пуринів і піримідинів бактеріальної клітини, тобто основних структурних елементів її ДНК.

Експеримент охоплював 42 ємності (об'єм 2,2 л), розділені на 14 груп: контрольні (чистий ґрунт) та забруднені, з варіаціями рослин і бактерій. Методика включала фіторе mediaцію (вирощування рослин для поглинання забруднювачів), мікробну біоаугментацію (інокуляція бактерій для розкладання вуглеводнів) та комбінований підхід. Динаміку росту оцінено методом «комп'ютерного зору» на базі Raspberry Pi5 з камерами (2E FHD, OV5640 5MP) та датчиком BME280, використовуючи неймережі DeepLabv3 та YOLOv8 для сегментації зеленої маси, висоти та кількості стебел (точність >95 %) (рис. 2). Повторний посів у групах 13–14 оцінював залишкову токсичність. Дані оброблено на ПК (AMD Ryzen 9 5950X, 64 GB RAM).

Результати досліджень. У контрольних групах (1–6) рослини формували значно більшу біомасу (середня вага 7,5–15,9 г) та об'єм коренів (39,7–248,3 см³), ніж у забруднених (групи 7–12: 1,8–4,0 г, 9,0–32,7 см³), що

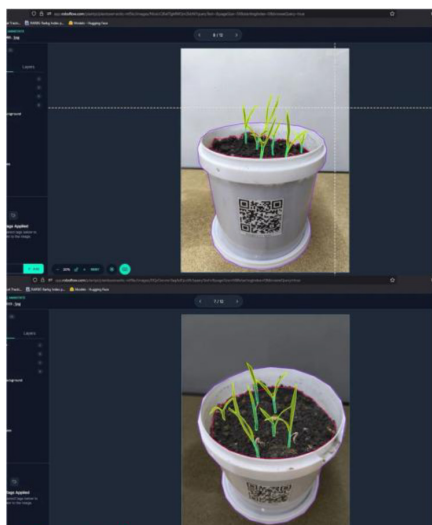


Рис. 2. Приклад підготовки дослідницьких даних біоре mediaції до обробки машинним навчання

обґрунтовано фітотоксичністю нафтопродуктів, яка пригнічує ріст на 70–90 % (табл. 1 та табл. 2).

Таблиця 1

Дані ваги рослин вирощених в лабораторних умовах для фіторе mediaції

Група, №	Вага, г			Сер. знач. ваги, г
	Ємність, №			
	1	2	3	
1	10	10	9	7,5
2	18	11	22	13,3
3	18	19	20	15,0
4	17	12	6	9,8
5	17,5	22	19	15,9
6	15	13	9	10,8
7	0,1	0	0,1	1,8
8	0,3	1	0,6	2,5
9	0,2	0,1	0,5	2,5
10	0,5	0,1	0	2,7
11	1	2,7	1,1	4,0
12	0,5	1,3	1,8	3,9

Таблиця 2

Дані об'ємного значення кореня рослин вирощених в лабораторних умовах для біоре mediaції

Група, №	Об'єм, см³			Середнє об'ємне значення кореня, см³
	Ємність, №			
	1	2	3	
Група_1	138	175	130	147,7
Група_2	76	156	168	133,3
Група_3	105	430	210	248,3
Група_4	100	95	60	85,0
Група_5	26	72	21	39,7
Група_6	161	125	110	132,0
Група_7	10	9	8	9,0
Група_8	33	32	33	32,7
Група_9	32	24	18	24,7
Група_10	24	4	14	14,0
Група_11	18	33	39	30,0
Група_12	12	44	16	24,0

Застосування бактерій *Pseudomonas* у забрудненому ґрунті підвищувало біомасу на 20 % (наприклад, сорго в групі 11: 4,0 г проти 2,5 г у групі 8), нейтралізуючи токсини через біодеградацію вуглеводнів до CO₂ та H₂O, з формуванням «тістоподібної» структури ґрунту за рахунок екзополісахаридів. «Комп'ютерний зір» зафіксував динаміку: у контрольному ґрунті площа зеленої маси зросла до 537,6 см² (сорго), у забрудненому – максимум 99,6 см² для сорго з бактеріями, підтверджуючи синергію (зниження фітотоксичного ефекту на 50–70 %) (рис. 3). Повторний посів у групі 13 (з бактеріями) показав приріст біомаси на 30 % порівняно з групою 14 (самоочищення), обґрунтовуючи посилення мікробної активності.

За результати дослідження середньої площі зеленої маси на першому етапі експерименту було розраховано фітотоксичний ефект (ФЕ, %) на рослини від

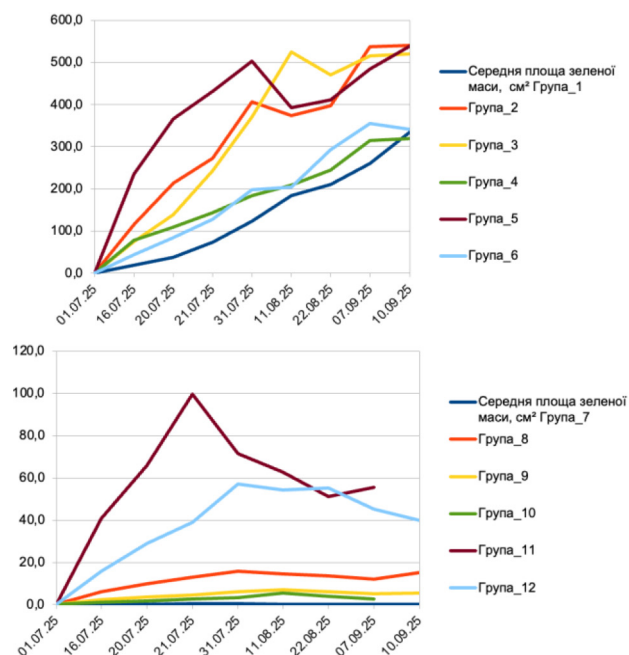


Рис. 3. Результати дослідження середньої площі зеленої маси контрольного ґрунту (1–12 групи)

нафтопродуктів. Формула для визначення ФЕ (%) для середньої площі зеленої маси рослин від нафтопродуктів:

$$\text{ФЕ} = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \cdot 100,$$

де L_0 – середня площа зеленої маси рослин у контрольному ґрунті, см²;

L_1 – середня площа зеленої маси рослин у забрудненому ґрунті, см².

За результатами розрахунків побудовано діаграму ФЕ (рис. 4) для середньої площі зеленої маси рослин від нафтопродуктів, (%)

Аналіз фітотоксичного ефекту (ФЕ, %) показав значне пригнічення росту рослин у забрудненому ґрунті: у групах 7–9 (без бактерій) ФЕ досягав 94–99 % і залишався високим (97–100 %), вказуючи на відсутність адаптації. У групах 10–12 (з бактеріями *Pseudomonas*) ФЕ знижувався з 98,6–64,4 % до 82,4–87,3 %, особливо в групі 11 (сорго + бактерії, з 47,8 % до 82,4 %) та групі 12 (просо+сорго + бактерії, з 64,4 % до 87,3 %). Це свідчить про ефективність бактерій у розкладанні вуглеводнів і зниженні токсичності, що підтверджує їх цінність для

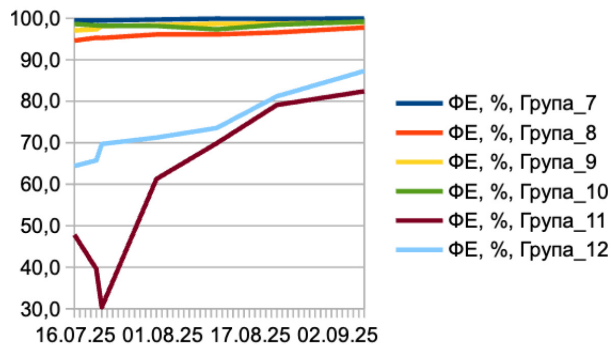


Рис. 4. ФЕ для середньої площі зеленої маси рослин від нафтопродуктів, (%)



Рис. 5. Виокремлення «комп'ютерним зором» кількості стебел.

Приклад, група № 5 – ємність № 1

Таблиця 3

Значення середньої площі зеленої маси рослин від нафтопродуктів у 7–12 групі

Дата	ФЕ, %, Група 7	ФЕ, %, Група 8	ФЕ, %, Група 9	ФЕ, %, Група 10	ФЕ, %, Група 11	ФЕ, %, Група 12
01.07.25	0	0	0	0	0	0
16.07.25	99,5	94,6	97,1	98,6	47,8	64,4
20.07.25	99,5	95,3	97,3	98,3	39,6	65,8
21.07.25	99,5	95,2	98,1	98,2	30,3	69,7
31.07.25	99,7	96,1	98,3	98,2	61,3	71,2
11.08.25	99,9	96,1	98,6	97,3	69,9	73,5
22.08.25	99,9	96,6	98,7	98,4	79,1	81,2
07.09.25	99,9	97,7	99,0	99,2	82,4	87,3

біоремедіації, особливо з сорго та змішаними посівами.

У процесі дослідження із застосуванням методу «комп'ютерного зору» проаналізовано динаміку висоти рослин у кожній дослідній групі (рис. 5). Метод «комп'ютерного зору» забезпечив точне визначення змін росту рослин за різних умов ґрунту.

Висновки. Дослідження підтвердило ефективність фіторемедіації з сорго та просом у поєднанні з мікробною біоаугментацією бактеріями *Pseudomonas* для очищення чорноземів від нафтопродуктів, з динамічною оцінкою «комп'ютерним зором», що відповідає меті статті. Синергія методів знижує забруднення на 50–70 %, відновлює родючість та структуру ґрунту. Перспективи: польові випробування, інтеграція з компостом для прискорення самоочищення, розробка автоматизованих систем моніторингу для масштабної рекультивації в регіонах Лівобережної України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Сисоев О. О. Спрямованість на виконання цілей сталого розвитку як провідна тенденція професійної підготовки фахівців із циркулятивної економіки. *Безперервна професійна освіта: теорія та практика*. 2023. № 74 (1). С. 24–35. <https://doi.org/10.28925/1609-8595.2023.1.3>
2. Огієнко А. Сталій розвиток підприємства: сутність поняття, перспективи та перешкоди. *Modeling the development of the economic systems*. 2024. № 3. С. 222–228. <https://doi.org/10.31891/mdes/2024-13-31>
3. Сокол М. В., Богданова А. О. Забезпечення екологічної безпеки в Україні в умовах воєнного стану. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. Серія: юридичні науки. 2025. № 1. С. 42–47. <https://doi.org/10.32782/tnu-2707-0581/2025.1/07>
4. Борецька І. Ю., Джура Н. М., Романюк О. І. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6 (39). С. 72–76. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
5. Melnychenko V. Phytoremediation of soils contaminated as a result of military and anthropogenic impact. *Scientific reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. № 20(4). P. 72–84. <https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.72>
6. Босюк А. С., Шестопалов 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. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.12>
7. 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061>
8. Žaltauskaitė J., Meištinkas R., Dikšaitytė A., Degutytė-Fomins L., Mildažienė V., Naučienė Z., Žukienė 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. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33182-4>
9. 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
10. Elshafei A. M., Mansour R.. Microbial bioremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Discover Soil*. 2024. № 1 (1). <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00004-5>

REFERENCES:

1. Sysoiev, O. O. (2023). Spriamovanist na vykonannia tsilei staloho rozvytku yak provdna tendentsiia profesiinoi pidhotovky fakhivtsiv iz tsyrkuliativnoi ekonomiky [Focus on achieving the goals of sustainable development as a leading tendency in the professional training of circular economy specialists]. *Bezperervna profesiina osvita: teoriia ta praktyka*, 74(1), 24–35. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.28925/1609-8595.2023.1.3>
2. Ohienko, A. (2024). Stalyi rozvytok pidpriemstva: sutnist poniattia, perspektyvy ta pereshkody [Sustainable development of an enterprise: essence of the concept, prospects, and obstacles]. *Modeliuvannia rozvytku ekonomichnykh system*, 3, 222–228. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/mdes/2024-13-31>
3. Sokol, M. V., & Bogdanova, A. O. (2025). Zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky v Ukraini v umovakh voiennoho stanu [Ensuring environmental safety in Ukraine under martial law]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: yurydychni nauky*, 1, 42–47. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/tnu-2707-0581/2025.1/07>
4. Boretska, I. Yu., Dzhura, N. M., & Romanyuk, O. I. (2021). Fitoremediatsiia tekhnogenno zabrudnennykh gruntiv z vykorystanniam enerhetychnykh kultur [Phytoremediation of technogenically contaminated soils by means of energy crops]. *Ekolohichni nauky*, 6, 72–76. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
5. Melnychenko, V. (2024). Phytoremediation of soils contaminated as a result of military and anthropogenic impact. *Scientific reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 20(4), 72–84. <https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.72>
6. Bosiuk, A., Shestopalov, O., & Razno, M. (2024). Bioindykatsiia yak metod vyznachennia yakosti gruntiv ta vplyvu zabrudniuvachiv na floru: analiz inhibitornoi dii na rist koreniv ta vplyv khimichnykh rehovyn na prorstannia ta rist roslyn [Bioindication as a method of determining soil quality and the impact of pollutants on flora: analysis of inhibitory effect on root growth and influence of chemicals on plant germination and growth]. *Ekolohichni nauky*, 2 (53), 84–89. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.12>
7. Agnello, A. C., Bagard, M., van Hullebusch, E. D., Esposito, G., & Huguenot, D. (2016). 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*, 563–564, 693–703.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061>
8. Žaltauskaitė, J., Meištininkas, R., Dikšaitytė, A., Degutytė-Fomins, L., Mildažienė, V., Naučienė, Z., Žūkienė, R., & Koga, K. (2024). 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*, 31(20), 30026–30038. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33182-4>
 9. Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., & Asghar, H. N. (2019). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 714–727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
 10. Elshafei, A. M., & Mansour, R. (2024). Microbial bioremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Discover Soil*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00004-5>

Бондар Т. О., Шестопапов О. В., Босюк А. С., Сакун А. О., Нечипоренко Д. І., Бондар Т. В. Ефективність біоремедіації нафтозабруднених ґрунтів України

Мета. Оцінити ефективність фіторемедіації (сорго, просо) та мікробної біоаугментації (*Pseudomonas*) для очищення нафтозабруднених чорноземів Лівобережної України в лабораторних умовах, використовуючи «комп'ютерний зір» для моніторингу росту рослин і змін ґрунту, з метою розробки рекомендацій для рекультивації. **Методи.** Використано 60 кг чорнозему, забрудненого до 46 000 мг/кг (дизель, моторна олива). Проводився експеримент із 42 ємностями (14 груп): контрольні та забруднені, з рослинами (*Sorghum bicolor*, *Panicum miliaceum*, суміш) і бактеріями *Pseudomonas* («Біонорма»). Застосовано фіторемедіацію, біоаугментацію, комбінований підхід. Динаміку росту оцінено методом «комп'ютерного зору» (Raspberry Pi5, DeepLabv3, YOLOv8, точність >95 %). **Результати.** У контрольних групах рослини формували біомасу 7,5–15,9 г та об'єм коренів 39,7–248,3 см³, тоді як у забруднених – лише 1,8–4,0 г та 9,0–32,7 см³ через фітотоксичність нафтопродуктів. Комбінація сорго з бактеріями *Pseudomonas* показала найвищу ефективність, підвищуючи біомасу на 20 % та сприяючи біодеградації вуглеводнів із формуванням органо-мінеральних агрегатів («тісто-подібна» структура). «Комп'ютерний зір» зафіксував максимальну площу зеленої маси (99,6 см²) та висоту (16,4 см) для сорго з бактеріями у забрудненому ґрунті, підтверджуючи зниження фітотоксичності на 50–70 %. Повторний посів у групі з бактеріями показав приріст біомаси на 30 % порівняно з групою самоочищення. **Висновки.** Комбінована біоремедіація із сорго та бактеріями *Pseudomonas* є високоефективною для очищення нафтозабруднених чорноземів Лівобережної України, знижуючи токсичність та відновлюючи родючість. Метод

«комп'ютерного зору» забезпечує точний моніторинг, зменшуючи суб'єктивність оцінок. Чорноземи мають природну здатність до часткового самоочищення, що посилюється мікробною біоаугментацією. Перспективи включають польові випробування, інтеграцію компосту для прискорення процесів та масштабування цифрового моніторингу для автоматизації рекультивації.

Ключові слова: фіторемедіація, мікробна біоаугментація, комп'ютерний зір, родючість ґрунту, екологічна рекультивація, *Pseudomonas*, агроекологія.

Bondar T. O., Shestopalov O. V., Bosiuk A. S., Sakun A. O., Nechiporenko D. I., Bondar T. V. The effectiveness of bioremediation of oil-contaminated soils in Ukraine

Purpose. To evaluate the effectiveness of phytoremediation (sorghum, millet) and microbial bioaugmentation (*Pseudomonas*) for cleaning oil-contaminated chernozems of Left-Bank Ukraine in laboratory conditions, using «computer vision» to monitor plant growth and soil changes, with the aim of developing recommendations for recultivation. **Methods.** 60 kg of black soil contaminated to 46,000 mg/kg (diesel, motor oil) was used. An experiment was conducted with 42 containers (14 groups): control and contaminated, with plants (*Sorghum bicolor*, *Panicum miliaceum*, mixture) and *Pseudomonas* bacteria («Bionorma»). Phytoremediation, bioaugmentation, and a combined approach were used. Growth dynamics were assessed using the «computer vision» method (Raspberry Pi5, DeepLabv3, YOLOv8, accuracy >95 %). **Results.** In the control groups, plants formed biomass of 7.5–15.9 g and root volume of 39.7–248.3 cm³, while in the contaminated groups, only 1.8–4.0 g and 9.0–32.7 cm³ due to the phytotoxicity of petroleum products. The combination of sorghum with *Pseudomonas* bacteria showed the highest efficiency, increasing biomass by 20 % and promoting the biodegradation of hydrocarbons with the formation of organo-mineral aggregates («dough-like» structure). Computer vision recorded the maximum green mass area (99.6 cm²) and height (16.4 cm) for sorghum with bacteria in contaminated soil, confirming a 50–70 % reduction in phytotoxicity. Replanting in the group with bacteria showed a 30 % increase in biomass compared to the self-cleaning group. **Conclusions.** Combined bioremediation with sorghum and *Pseudomonas* bacteria is highly effective for cleaning oil-contaminated chernozems in the Left Bank of Ukraine, reducing toxicity and restoring fertility. The «computer vision» method provides accurate monitoring, reducing the subjectivity of assessments. Black soils have a natural ability to partially self-clean, which is enhanced by microbial bioaugmentation. Prospects include field trials, integration of compost to accelerate processes, and scaling up of digital monitoring to automate reclamation.

Key words: phytoremediation, microbial bioaugmentation, computer vision, soil fertility, ecological reclamation, *Pseudomonas*, agroecology.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025
Дата публікації: 14.12.2025