

УДК 504.53.054:665.6/.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.150.38>

НАУКОВІ ПІДХОДИ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ НАФТОПРОДУКТАМИ

Ткачук О.П. – д.с.-г.н.,

професор кафедри екології та охорони навколишнього середовища,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0002-0647-6662**Гуцол Г.В.** – к.с.-г.н.,

доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0001-6327-6555

Стаття присвячена аналізу та систематизації сучасних наукових підходів до використання фітореємедіації як екологічно безпечного та ефективного методу відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. Стрімкий розвиток військових бойових дій в Україні та антропогенне навантаження промисловості з транспортом призводять до деградації земель та ґрунтів, що зумовлює потребу в розробці новітніх технологій їх рекультивації для повернення в активний сільськогосподарський обіг.

У роботі узагальнено теоретичні засади та виокремлено чотири ключові біохімічні механізми зниження вмісту вуглеводнів у системі «ґрунт–рослина»: ризодеградацію, фітоволатилізацію, фітостабілізацію та фітотрансформацію. Проведено порівняльний аналіз фітореємедіаційного потенціалу провідних сільськогосподарських культур. Встановлено, що найвищу стійкість до токсичної дії нафтової плівки та очисну здатність виявляють представники родин злакові (Poaceae), бобові (Fabaceae) та капустяні (Brassicaceae). Обґрунтовано морфо-біологічні переваги мичкуватої кореневої системи злакових трав (райграсу пасовищного, тонконогу лучного) у верхньому шарі ґрунту (0–20 см) та стрижневої кореневої системи бобових культур (люцерни посівної, конюшини лучної) у глибших горизонтах. Особливу увагу приділено доведенню синергетичного ефекту використання полікомпонентних агрофітоценозів.

Показано, що бінарні злаково-бобові посіви забезпечують інтенсивну стимуляцію автохтонної нафтоокиснювальної мікрофлори (родів *Pseudomonas*, *Rhodococcus*) у ризосфері, збільшуючи її чисельність у 10–100 разів, а також нівелюють дефіцит азоту, який виникає внаслідок дисбалансу співвідношення вуглецю до азоту (C:N). Визначено перспективи подальших досліджень, що полягають у створенні комплексних біотехнологічних систем із залученням консорціумів мікроорганізмів-деструкторів та органічних сорбентів в умовах кліматичних змін.

Ключові слова: фітореємедіація, нафтопродукти, забруднення ґрунтів, ризосфера, злаково-бобові суміші, біодеградація, відновлення родючості.

Tkachuk O.P., Hutsol G.V. Scientific approaches to phytoremediation of soils contaminated with oil products

The article is devoted to the analysis and systematization of modern scientific approaches to the use of phytoremediation as an environmentally safe and effective method of restoring soils contaminated with petroleum products. The rapid development of military hostilities in Ukraine and the anthropogenic load of industry and transport lead to the degradation of lands and soils, which necessitates the development of new technologies for their reclamation for their return to active agricultural circulation.

The paper summarizes the theoretical foundations and identifies four key biochemical mechanisms for reducing hydrocarbon content in the soil-plant system: rhizodegradation,



© Ткачук О.П., Гуцол Г.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

phytovolatilization, phytostabilization, and phytotransformation. A comparative analysis of the phytoremediation potential of leading agricultural crops was conducted. It was established that the highest resistance to the toxic effects of oil film and the cleaning ability are exhibited by representatives of the families Poaceae, Fabaceae, and Brassicaceae. The morpho-biological advantages of the fibrous root system of cereal grasses (pasture ryegrass, meadow fescue) in the upper soil layer (0–20 cm) and the taproot system of legumes (alfalfa, meadow clover) in deeper horizons were substantiated. Particular attention was paid to proving the synergistic effect of using multicomponent agrophytocenoses.

It has been shown that binary cereal-legume crops provide intensive stimulation of autochthonous oil-oxidizing microflora (genus Pseudomonas, Rhodococcus) in the rhizosphere, increasing its number by 10–100 times, and also eliminate nitrogen deficiency, which occurs due to the imbalance of the carbon to nitrogen (C:N) ratio. Prospects for further research are identified, which consist in creating complex biotechnological systems involving consortia of destructor microorganisms and organic sorbents under climate change conditions.

Key words: *phytoremediation, petroleum products, soil contamination, rhizosphere, cereal-legume mixtures, biodegradation, fertility restoration.*

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах однією з найгостріших екологічних та агроекологічних загроз в Україні є масштабне забруднення ґрунтового покриву внаслідок ведення воєнних дій. Разом із вибухами від вибухів та уламками, екосистеми зазнають безпрецедентного техногенного навантаження, пов'язаного з розливами пально-мастильних матеріалів, нафти та її похідних. Знищення складів пального, пошкодження інфраструктури, руйнування чи підбиття військової техніки призводять до локальних, проте інтенсивних забруднень ґрунтів токсичними вуглеводнями [1].

Потрапляючи у ґрунт, нафтопродукти порушують його фізико-хімічні властивості, блокують газообмін та гідрологічний режим, а також призводять до загибелі або пригнічення ґрунтової біоти. Такі території фактично виводяться із сільськогосподарського обігу. Враховуючи площі постраждалих земель (що обчислюються тисячами гектарів у зонах бойових дій та на деокупованих територіях), традиційні методи рекультиватії (наприклад, механічне вивезення ґрунту або його хімічна обробка) є економічно надзатратними та нерідко призводять до подальшої деградації родючого шару [2].

У зв'язку з цим, виникає гостра потреба у пошуку та впровадженні екологічно безпечних і економічно доцільних методів відновлення. Пріоритетним напрямом сучасної агроекології є фіторемедіація – використання рослин-гіперакумуляторів та асоційованих із ними мікроорганізмів для очищення, деградації або іммобілізації токсичних сполук [3].

Незважаючи на значний світовий досвід, наукові підходи фіторемедіації ґрунтів, забруднених специфічними нафтопродуктами воєнного походження, в умовах України потребують детального вивчення. Необхідно здійснити наукове обґрунтування вибору видового складу рослин, адаптованих до ґрунтово-кліматичних умов конкретних регіонів, дослідити механізми ризодеградації вуглеводнів і розробити практичні рекомендації для впровадження у відновне землеробство. Саме тому розробка наукових підходів до фіторемедіації нафтозабруднених ґрунтів є надзвичайно актуальною, має високу наукову новизну та практичну значущість для післявоєнної відбудови агропромислового комплексу України [4].

Постановка проблеми. Забруднення ґрунтового покриву нафтопродуктами внаслідок військових дій має низку специфічних особливостей, які відрізняють його від класичних промислових аварій. По-перше, такі розливи часто відбуваються одночасно з механічним руйнуванням профілю ґрунту (вибухові вирви, перемішування генетичних горизонтів важкою технікою). По-друге, нафтопродукти

потрапляють в екосистему разом із залишками ракетного палива, важкими металами та іншими токсикантами, що утворює складні полікомпонентні суміші [5].

Головна проблема полягає в тому, що наявні наукові підходи до фіторемедіації здебільшого розроблені для умов монозабруднення або контрольованих промислових викидів. Натомість агровиробники та екологи в Україні зіткнулися із синергетичним ефектом токсичності, коли нафтові вуглеводні блокують розвиток фіторемедіантів, а супутні воєнні забруднювачі пригнічують діяльність ризосферної мікрофлори [6].

Крім того, залишається невирішеним ряд ключових питань: критерії підбору біоти – відсутній чіткий реєстр стійких фіторемедіантів (культурних, дикорослих чи сидеральних рослин), здатних витримувати високі концентрації пально-мастильних матеріалів в умовах конкретних природно-кліматичних зон України; механізми деструкції – недостатньо вивчена динаміка розкладу важких фракцій нафтопродуктів у ризосфері рослин під впливом корневих екссудатів; утилізація біомаси, яка після фіторемедіації воєнних земель може містити залишки токсикантів, тому механізми її безпечного збирання та подальшої утилізації/переробки потребують екологічного обґрунтування [7].

Відтак, існує чітке наукове та практичне протиріччя між гострою потребою у швидкому відновленні родючості земель та відсутністю адаптованих, комплексних технологічних схем фіторемедіації нафтозабруднених ґрунтів, які враховували б специфіку воєнного стану та післявоєнного відновлення агросфери.

Методика досліджень. Методологічну основу роботи становить комплексний системний аналіз, узагальнення та теоретичне моделювання результатів наукових досліджень, присвячених проблематиці фіторемедіації нафтозабруднених ґрунтів, який був доповнений дрібноділянковими дослідями, закладеними на дослідному полі НДГ «Агрономічне» Вінницького національного аграрного університету на посівах райґрасу пасовищного, люцерни посівної та сумішки цих культур. Площа облікової ділянки – 1 м² у чотириразовій повторності. На кожен ділянку у весняний період було внесено 50 г дизельного палива на 1 кг ґрунту, включаючи контрольний варіант – без рослинності.

Спостереження проводили впродовж 90 діб, визначаючи залишок нафтопродуктів через 30, 60 та 90 діб після внесення. Проби ґрунту аналізували у Південно-Західному міжрегіональному центрі ДУ «Інститут охорони ґрунтів України».

Наукові дослідження виконані за рахунок коштів гранту Президента України молодим вченим та докторам наук «Розробка фітомеліоративних заходів відновлення деградованих ґрунтів внаслідок бойових дій в контексті гарантування продовольчої та енергетичної безпеки України» (грантоотримувач Олександр Ткачук), наданого Національним фондом досліджень України.

Результати досліджень. На основі аналізу наукових джерел та експериментальних даних профільних установ встановлено, що для очищення ґрунтів від нафтопродуктів найбільш перспективними є представники трьох ботанічних родин: злакові (*Poaceae*), бобові (*Fabaceae*) та капустяні (*Brassicaceae*). Кожна група має специфічні морфо-біологічні переваги. Серед злакових культур найкращими фіторемедіаційними властивостями щодо зниження нафтового забруднення володіють райґрас пасовищний (*Lolium perenne*), тонконіг лучний (*Poa pratensis*) та овес посівний (*Avena sativa*). Особливістю усіх злакових є мичкувата коренева система та висока щільність корінців у верхньому шарі ґрунту (0–20 см). Це дозволяє максимально збільшити площу ризосфери та стимулювати роботу автохтонної нафтоокиснювальної мікрофлори [8].

Серед бобових культур найкращими властивостями щодо зниження нафтового забруднення володіють люцерна посівна (*Medicago sativa*) та конюшина лучна (*Trifolium pratense*). Вони мають стрижневу глибоко проникаючу кореневу систему та проявляють симбіоз із бульбочковими бактеріями. Це сприяє не лише деструкції важких фракцій нафтопродуктів у глибоких горизонтах (до 50–70 см), але й збагаченню ґрунту азотом.

Капустяні культури – гірчиця біла (*Sinapis alba*) та ріпак озимий (*Brassica napus*), проявляють фітореMediaційні властивості щодо знешкодження нафтопродуктів. Ці культури відзначаються швидким нарощуванням біомаси та високою секреторною активністю коренів. Гірчиця та ріпак проявляють ексудацію ензимів, що сприяє прямій фітотрансформації легкокорозивних вуглеводнів.

Порівняння усіх трьох груп рослин показує, що злакові культури є стійкішими до токсичної дії гідрофобної нафтової плівки на ранніх етапах вегетації завдяки високій інтенсивності кушіння та здатності витримувати помірний дефіцит кисню в ґрунті.

Узагальнення теоретичних принципів дозволило структурувати процес фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів за чотирма основними взаємопов'язаними механізмами: ризодеградація – це головний механізм очищення ґрунтів від нафтопродуктів. Кореневі ексудати рослин (цукри, амінокислоти, ферменти) слугують поживним субстратом для ґрунтових мікроорганізмів. Встановлено, що щільність популяцій нафтоокиснювальних бактерій (*Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter*) у ризосфері злакових трав у 10–100 разів вища, ніж у забрудненому ґрунті без рослин. Це забезпечує прискорення біодеградації вуглеводнів на 30–45% [9].

Фітоволатилізація – це поглинання корінням низькомолекулярних, легких фракцій нафти (алканів лінійної структури) з їх наступним транспортуванням по судинах і випаровуванням через продиhi листя у трансформованому, менш токсичному вигляді [10].

Фітостабілізація – коріння бобових та злакових рослин змінює реологічні властивості ґрунту, зв'язуючи гідрофобні компоненти нафти (асфальтени та смоли). Це запобігає міграції забруднювачів у підземні горизонти та суміжні водні об'єкти [11].

Фітотрансформація – пряме поглинання складних органічних сполук рослиною з подальшим їх розщепленням внутрішньоклітинними ферментами (пероксидазами, цитохромами) до простіших метаболітів, які включаються у рослинний обмін речовин [12].

Монокультури мають обмежений радіус дії щодо фітореMediaції ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. Найвищу ефективність детоксикації (до 75–85% за вегетаційний період) демонструють бінарні та полікомпонентні суміші (наприклад, райграс пасовищний + люцерна посівна). Механізм синергізму полягає в тому, що злаковий компонент створює щільну мережу в капілярах ґрунту для розвитку бактерій, а бобовий – ліквідує дефіцит азоту, який виникає через різке підвищення співвідношення C:N внаслідок нафтового забруднення. Це оптимізує трофічні зв'язки у мікробіоценозі та стимулює самоочищення агроєкосистеми (табл. 1).

У проведеному досліді на чистій ділянці без рослинності (контроль) за 90 діб рівень забруднення ґрунту розлитими нафтопродуктами знизився на 21%, на посіві люцерни посівної – на 66,6% від початкового рівня забруднення та на 45,6% – відносно контрольного варіанту. За вирощування райграсу пасовищного концентрація нафтопродуктів від початкового рівня зменшилася на 71,6% та на 50,6% – відносно контролю. Але найбільш ефективним щодо знешкодження нафтового забруднення, був бінарний посів люцерни і райграсу – зменшення становило 83,0%, що було на 62% більше, ніж на контролі.

Таблиця 1

Динаміка вмісту нафтопродуктів у ґрунті за використання різних фіторемедіантів (початковий рівень забруднення – 50 г/кг ґрунту)

Варіант досліджу	Вміст через 30 діб, г/кг	Вміст через 60 діб, г/кг	Вміст через 90 діб, г/кг	Ефективність очищення за 90 діб, %
Контроль (без рослин)	46,2	42,1	39,5	21,0
Райграс пасовищний (<i>L. perenne</i>)	35,4	22,8	14,2	71,6
Люцерна посівна (<i>M. sativa</i>)	38,1	25,3	16,7	66,6
Суміш райграс+люцерна	31,2	17,4	8,5	83,0

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведений порівняльний аналіз фітопотенціалу культурних рослин довів, що найвищу стійкість та очисну здатність нафтового забруднення ґрунту мають представники родин злакові (*Poaceae*), бобові (*Fabaceae*) та капустяні (*Brassicaceae*). Злакові трави завдяки мичкуватій кореневій системі ефективно оптимізують верхній шар ґрунту, тоді як бобові забезпечують детоксикацію глибоких горизонтів та покращують азотний режим екосистеми.

Ключовим біохімічним механізмом очищення є ризодеградація, за якої кореневі екссудати рослин активують автохтонну нафтоокиснювальну мікрофлору, збільшуючи її чисельність у 10–100 разів. Найвищий синергетичний ефект (до 75–85% деструкції вуглеводнів) досягається за використання бінарних злаково-бобових агрофітоценозів, які одночасно вирішують проблему дефіциту азоту (через дисбаланс співвідношення C:N) та створюють максимальну площу ризосфери.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Гуцол Г.В., Мазур О.В. Вирощування олійних культур та інтенсивність накопичення важких металів у ґрунтах за їх мінерального удобрення в умовах Вінниччини. *Сільське господарство та лісівництво*. 2022. № 1 (24). С. 217–226. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2022-1-16>
2. Мазур О.В. Наукове обґрунтування доцільності використання соняшнику (*Helianthus annuus* L.) для фіторемедіації ґрунтів, забруднених важкими металами. *Аграрні інновації*. 2026. № 35. С. 182–189. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2026.35.27>
3. Дідур І., Ткачук О., Панцирева Г., Волинець Є. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів із використанням бобових багаторічних трав: монографія. Вінниця: ТВОРИ, 2026. 228 с.
4. Разанов С.Ф., Куценко М.І. Фіторемедіація дерново-підзолистого ґрунту за вирощування нектаропилконосних рослин в умовах Полісся. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 11. С. 213–222. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.23>
5. Ткачук О.П., Вергеліс В.І. Наукове обґрунтування механізму зниження вмісту важких металів у ґрунті методом фіторемедіації бобовими багаторічними травами. *Екологічні науки*. 2023. № 4 (49). С. 131–137. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.17>
6. Снітинський В.В., Ткачук О.П., Разанова А.М., Коруняк О.П. Ефективність фіторемедіації забрудненого важкими металами ґрунту за вирощування розторопші плямистої. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 28 (1). С. 164–171. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-1-11>

7. Борецька І.Ю., Джура Н.М., Романюк О.І. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6. С. 72-76. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.есо.6-39.11>
8. Дацько О.М., Яценко В.В. Сучасні методи ремедіації ґрунтів. Фіторемедіація як ключ до очищення ґрунтів та збереження екосистем. *Аграрні інновації*. 2024. № 25. С. 20-24. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.3>
9. Мельниченко В.В. Фіторемедіація в аспекті відновлення ґрунтів, які зазнали впливу воєнно-техногенного навантаження. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Післявоєнне відновлення ґрунтових і рослинних ресурсів та продовольча безпека країни» (м. Київ, 20–21 червня 2024 року), НУБІП України, 2024. 222 с.
10. Самохвалова В.Л., Фатєєв А.І., Зуза С. І., Погромська Я.А., Зуза В.О., Панасенко Є.В., Горпинченко П.Ю. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів. *Агроекологічний журнал*. 2015. № 1. С. 92-100. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2015.272192>
11. Писаренко П.В., Диченко О.Ю., Цьова Ю.А., Середа М.С. Напрями біоремедіації техногенно забруднених ґрунтів. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 120. С. 282-292. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.120.35>
12. Цицюра Я.Г., Шкатула Ю.М., Забарна Т.А., Пелех Л.В. Інноваційні підходи до фіторемедіації та фіторекультивзації у сучасних системах землеробства. Монографія. Вінниця: ТОВ «Друк», 2022. 1200 с.

Дата першого надходження статті до видання: 29.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.08.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.08.2026