

ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНІ ТА СИДЕРАЛЬНІ КУЛЬТУРИ У ВІДНОВЛЕННІ ПОРУШЕНИХ ҐРУНТІВ

Чайка Т. О., к. е. н.

Полтавське відділення Академії наук технологічної кібернетики України

Короткова І. В., к. хім. н., доцент

Полтавський державний аграрний університет,

м. Полтава, Україна

Воєнні дії спричиняють комплексне порушення ґрунтового покриву, що проявляється у механічному ущільненні важкою технікою, руйнуванні структури орного та підорного шарів, зміні водно-фізичних властивостей, а також забрудненні важкими металами, нафтопродуктами та залишками вибухових речовин. Такі зміни знижують продуктивність земель і значно ускладнюють їх подальше сільськогосподарське використання [1]. За літературними даними, повна реабілітація територій, які зазнали впливу бойових дій, традиційними методами може тривати 10–12 років [2], тоді як окремі довгострокові фіторемедіаційно-біоенергетичні системи передбачають період відновлення до 15 років [3]. У зв'язку з цим актуальним є пошук агробіологічних підходів, здатних забезпечити поступове поліпшення стану ґрунту в межах коротших ротаційних циклів. Подібний комплекс пошкоджень агроландшафтів зафіксовано, зокрема, на деокупованих територіях Снігурівської громади Миколаївської області, для яких обґрунтовано необхідність диференційованого підбору культур-фіторемедіантів залежно від характеру порушення земель [4].

Одним із перспективних напрямів може бути інтеграція у систему землеробства культур, які одночасно виконують різні відновлювальні функції. Такий підхід узгоджується з концепцією комплексного післявоєнного відновлення сільськогосподарських земель, що передбачає поєднання ремедіаційних заходів із подальшим продуктивним використанням рослинної біомаси та біоенергетичних технологій [5]. Доцільним є поєднання рослин із розвиненою кореневою системою, здатних проникати в ущільнені шари ґрунту, з фіторемедіаційними та сидеральними культурами. У цьому випадку сівозмінна розглядається не лише як спосіб чергування сільськогосподарських культур, а як послідовність біологічних етапів відновлення ґрунту.

Важливе місце у таких системах можуть посідати *Sorghum bicolor*, *Carthamus tinctorius*, *Melilotus spp.*, *Sinapis alba* та *Phacelia tanacetifolia*. Їх функціональне значення істотно відрізняється, що дає можливість формувати ротації залежно від характеру порушення земель. Глибококореневі культури насамперед можуть сприяти проникненню кореневої системи в ущільнені горизонти. При цьому сам факт кращого росту коренів або підвищення врожайності наступної культури не слід безпосередньо ототожнювати з біологічним розущільненням. Для підтвердження структурних змін необхідно визначати щільність будови ґрунту, опір пенетрації, пористість, водопроникність та інші фізичні показники [6–8].

Особливий інтерес становить сорго (*Sorghum bicolor*), яке поєднує потужний розвиток кореневої системи з толерантністю до окремих типів забруднення. Для цієї культури встановлена здатність до поглинання Ni, Pb і Zn із переважним накопиченням металів у кореневій частині рослин [9]. Польові та модельні дослідження також підтверджують перспективність сорго для вирощування на ґрунтах, забруднених важкими металами. За даними Ofori-Agyemang et al. [10], його дворічне культивування на забрудненому ґрунті супроводжувалося істотним зменшенням вмісту рухомих форм Cd, Pb і Zn. Водночас наведені величини слід розглядати як орієнтир, оскільки ефективність фітореMediaції залежить від ґрунтових умов, рівня забруднення, форми знаходження металу та тривалості вирощування.

Сорго може бути корисним і на ділянках, забруднених нафтовими вуглеводнями. За даними Ma et al. [11], вирощування *Sorghum bicolor* сприяло істотному зниженню їх вмісту у забрудненому ґрунті. Для найбільш ефективного з досліджених сортів після 70 діб культивування залишкова концентрація нафтових вуглеводнів була на 41,4–69,3% нижчою порівняно з варіантами без рослин. Такий ефект пов'язаний не лише з діяльністю самої рослини, а й з активізацією мікроорганізмів у ризосфері, здатних до деградації органічних забруднювачів [12]. Разом із тим за комбінованого нафто-металевого забруднення ефективність очищення може знижуватися, тому для таких земель необхідний диференційований підхід.

У системах відновлення ґрунтів перспективним компонентом є також буркун (*Melilotus spp.*). Завдяки розвиненій кореневій системі він може брати участь у структуроутворенні ґрунту, а симбіотична азотфіксація сприяє поповненню запасів біологічного азоту. Здатність представників роду *Melilotus* функціонувати на малопродуктивних і засолених субстратах підтверджена низкою досліджень [13, 14]. Тому буркун може бути доцільним на проміжному або завершальному етапі відновлювальної сівозміни після культури, яка виконує основну фітореMediaційну функцію.

Інший напрям відновлення пов'язаний із використанням швидкорослих сидеральних культур. Біла гірчиця (*Sinapis alba*) формує значну кількість рослинної біомаси, після заробляння якої в ґрунт створюються передумови для поліпшення його структурно-фізичного стану. Сидерація загалом може сприяти зниженню щільності будови і кращому збереженню продуктивної вологи. У дослідженні Lishchuk et al. [15] щільність ґрунту на варіантах із сидеральними культурами становила 1,11–1,12 г/см³ порівняно з 1,19 г/см³ на чорному парі. Позитивний вплив надходження сидеральної біомаси на пористість ґрунту відзначено також Kholboev et al. [16].

Додатковою перевагою *Sinapis alba* є її фітосанітарне значення. Рослини родини Brassicaceae можуть використовуватися в системах біофумігації для зниження чисельності окремих ґрунтових патогенів і фітопаразитичних нематод. Високу ефективність такого підходу підтверджують результати Ziouche et al. [17]. Тому включення гірчиці до відновлювальної сівозміни може забезпечувати не лише надходження органічної речовини, а й фітосанітарне оздоровлення

грунту перед поверненням ділянки до традиційного сільськогосподарського використання.

Phacelia tanacetifolia доцільно розглядати передусім як швидкорослу покривну культуру. Вона забезпечує швидке формування рослинного покриву, обмежує розвиток бур'янів переважно завдяки конкуренції за ресурси та захищає поверхню ґрунту в перехідний період між основними культурами [18]. На відміну від сорго, фацелія не належить до культур із вираженою здатністю накопичувати важкі метали або деградувати нафтопродукти, тому її функція в таких системах є переважно ґрунтозахисною і фітомеліоративною.

З урахуванням функціональних властивостей зазначених культур доцільним є формування кількох типів короткоротаційних сівозмін залежно від домінуючого виду порушення. Для ущільнених ґрунтів із забрудненням важкими металами перспективною може бути послідовність *Sorghum bicolor* → *Melilotus officinalis* → *Sinapis alba*, за потреби доповнена *Carthamus tinctorius*. У такій ротації сорго може бути використане на початковому фіторе mediaційному етапі та сприяти освоєнню ущільненого шару, буркун – подальшому структурному відновленню і біологічному збагаченню ґрунту азотом, а гірчиця – виконувати сидеральну та фітосанітарну функції на завершальному етапі. Сафлор може використовуватися як перехідна технічна культура завдяки посухостійкості та толерантності до залишкового забруднення [19].

Для земель із переважним забрудненням нафтопродуктами можливий інший варіант: *Sorghum bicolor* → *Phacelia tanacetifolia* → *Sinapis alba* → *Melilotus* spp. У цьому випадку сорго може бути використане на початковому етапі для стимулювання ризосферної деградації нафтових вуглеводнів, після чого фацелія сприятиме стабілізації поверхні ґрунту та пригніченню бур'янів. Біла гірчиця може виконувати сидеральну і фітосанітарну функції, а буркун – завершувати цикл із забезпеченням біологічного збагачення ґрунту азотом.

Запропоновані ротації не слід розглядати як універсальні схеми, придатні для будь-яких порушених земель. Їх склад має визначатися за результатами попередньої оцінки фізичного стану ґрунту та виду і рівня забруднення. Ефективність відновлення доцільно контролювати за комплексом показників: щільністю будови, опором penetraції, пористістю і водопроникністю, розвитком кореневої системи рослин, а для забруднених ділянок – також за вмістом загальних і біодоступних форм металів або фракцій нафтових вуглеводнів.

Отже, інтеграція фіторе mediaційних і сидеральних культур у короткоротаційні сівозміни може бути перспективним елементом біологічного відновлення порушених ґрунтів. Потенційною перевагою такого підходу є поєднання кількох механізмів дії – фітостабілізації та фітоекстракції забруднювачів, ризодеградації органічних полютантів, біологічного збагачення ґрунту азотом, надходження органічної речовини та фітосанітарного оздоровлення. При цьому найбільш обґрунтованим є диференційований підхід, за якого структура сівозміни формується відповідно до конкретного типу деградації земель. Практична перевірка таких моделей у польових умовах дасть можливість уточнити оптимальну послідовність культур і кількісно оцінити

темпи відновлення фізичних та хіміко-токсикологічних властивостей ґрунту. Запропоновані моделі орієнтовані переважно на ґрунти з фізичною деградацією, забрудненням важкими металами та нафтовими вуглеводнями, тоді як підходи до відновлення ґрунтів, забруднених залишками вибухових речовин, потребують окремого дослідження.

Література

1. Чайка Т. О., Короткова І. В. Відновлення родючості ґрунту в Україні після воєнних дій. *Захист і відновлення екологічної рівноваги та забезпечення самовідновлення екосистем* : колективна монографія / за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава : Астроя, 2023. С. 232–281.
2. Leewis M.-C., Ksanke C., Uhlik O., Leigh M. B. Long-term legacy of phytoremediation on plant succession and soil microbial communities in petroleum-contaminated sub-Arctic soils. *SOIL*. 2024. Vol. 10. P. 551–566. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-10-551-2024>.
3. Martynova N., Kolombar T. Phytoremediation technologies promising for the restoration of agricultural lands damaged by military actions. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16, No. 3. Art. e25155. DOI: <https://doi.org/10.15421/0225155>.
4. Чайка Т. О., Шевніков М. Я., Ратошнюк В. І., Ляшенко В. В. Відновлення біопродуктивності агроценозів на деокупованих територіях Снігурівської громади Миколаївської області: оцінка пошкоджень і підбір фіторемедіантів. *Збалансоване природокористування*. 2026. № 2. С. 141–154. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2026.363731>.
5. Chaika T., Shevnikov M., Stetsenko A., Liashenko V. Conceptual model for post-war agricultural land restoration with integration of bioenergy technologies. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2026. Vol. 22, No. 2. P. 65–89. DOI: <https://doi.org/10.31548/dopovidi/2.2026.65>.
6. Cresswell H. P., Kirkegaard J. A. Subsoil amelioration by plant roots – the process and the evidence. *Australian Journal of Soil Research*. 1995. Vol. 33, No. 2. P. 221–239. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9950221>.
7. Ning T., Liu Z., Hu H., Li G., Kuzyakov Y. Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 223. Art. 105490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105490>.
8. Vanderhasselt A., Steinwider L., D'Hose T., Cornelis W. Opening up the subsoil: subsoiling and bio-subsoilers to remediate subsoil compaction in three fodder crop rotations on a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*. 2024. Vol. 237. Art. 105956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105956>.
9. Al Chami Z., Amer N., Al Bitar L. et al. Potential use of *Sorghum bicolor* and *Carthamus tinctorius* in phytoremediation of nickel, lead and zinc. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 12. P. 3957–3970. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0823-0>.
10. Ofori-Agyemang F., Burges A., Waterlot C., Lounès-Hadj Sahraoui A., Tisserant B., Mench M., Oustrière N. Phytomanagement of a metal-contaminated

agricultural soil with *Sorghum bicolor*, humic/fulvic acids and arbuscular mycorrhizal fungi near the former Pb/Zn Metaleurop Nord smelter. *Chemosphere*. 2024. Vol. 362. Art. 142624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142624>.

11. Ma D., Xu J., Zhou J., Ren L., Li J., Zhang Z., Xia J., Xie H., Wu T. Using sweet sorghum varieties for the phytoremediation of petroleum-contaminated salinized soil: a preliminary study based on pot experiments. *Toxics*. 2023. Vol. 11, No. 3. Art. 208. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics11030208>.

12. Banks M. K., Kulakow P., Schwab A. P., Chen Z., Rathbone K. Degradation of crude oil in the rhizosphere of *Sorghum bicolor*. *International Journal of Phytoremediation*. 2003. Vol. 5, No. 3. P. 225–234. DOI: <https://doi.org/10.1080/713779222>.

13. Bruning B., van Logtestijn R., Broekman R., de Vos A., Parra González A., Rozema J. Growth and nitrogen fixation of legumes at increased salinity under field conditions: implications for the use of green manures in saline environments. *AoB PLANTS*. 2015. Vol. 7. Art. plv010. DOI: <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv010>.

14. Nogués I., Passatore L., Bustamante M. Á., Pallozzi E., Luz J., Traquete F., Ferreira A. E. N., Sousa Silva M., Cordeiro C. Cultivation of *Melilotus officinalis* as a source of bioactive compounds in association with soil recovery practices. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Art. 1218594. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1218594>.

15. Ліщук А. М., Городиська І. М., Терновий Ю. В., Кравчук Ю. А. Вплив сидерації на агрофізичні властивості ґрунту в умовах органічного землеробства. *Збалансоване природокористування*. 2025. № 4. С. 135–143. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2025.346184>.

16. Kholboev B., Japakov N., Fayziev K., Esanbaeva N., Alibekov M. Effect of siderate crops on soil volume and porosity. *American Journal of Applied Science and Technology*. 2025. Vol. 5, No. 5. P. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume05Issue05-09>.

17. Ziouche S., Kelaleche H., Bourahla A., Djazouli Z. E. The biofumigation potential of wild radish (*Raphanus Raphanistrum*) and field mustard (*Sinapis Arvensis*) in controlling some phytoparasitic nematodes. *Journal of Advanced Zoology*. 2023. Vol. 44, No. 5. P. 116–127. DOI: <https://doi.org/10.17762/jaz.v44i5.2572>.

18. Gerhards R., Schumacher M., Merkle M., Malik W. A., Piepho H.-P. A new approach for modelling weed suppression of cover crops. *Weed Research*. 2024. Vol. 64, No. 3. P. 219–226. DOI: <https://doi.org/10.1111/wre.12627>.

19. Ciaramella B. R., Corinzia S. A., Cosentino S. L., Testa G. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils using safflower. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, No. 10. Art. 2302. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102302>.