УДК 613.6
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.8

ФІТОРЕВІТАЛІЗАЦІЯ У СИСТЕМІ ЕКОЛОГОЦЕНТРИЧНИХ ЗАХОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ПОРУШЕНИХ ТЕРИТОРІЙ

Литвин Б.Б. (orcid.org/0009-0007-8405-7555),
Смірнов О.Є. (orcid.org/0000-0002-2293-5961),
Таран Н.Ю. (orcid.org/0000-0002-8669-5899)
Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
пр. Академіка Глушкова, 2, 02000, Київ
lytvynbogdan164@gmail.com, oleksandr.smirnov@knu.ua, nataliya.taran@knu.ua

Актуальність та мета дослідження. Відновлення територій, понівечених внаслідок воєнних дій чи антропогенного забруднення – це довгий і дороговартісний процес, який вимагає тривалого економічного і екологічного дослідження, яке має встановити метод очищення, подальше облаштування ділянки і цільове призначення для майбутньої експлуатації. Щоб зробити цей процес ефективним і стандартизованим, необхідно дослідити взаємозв'язок між екологічною цілісністю території, економічною привабливістю та відповідністю заходам, спрямованням на адаптацію до кліматичних змін. Світова наукова думка зосередженна на розв'язанні широкого кола екологічних і кліматичних проблем за допомогою концепції природоорієнтованих рішень (nature-based solutions), базованих, зокрема на процесах "фіторевіталізації" – комплексі заходів з відновлення територій завдяки впливу на стан екоценозу з використанням рослин як головного інструменту відновлення і важливого ресурсу в подальшій бізнес складовій. Мета – релевантний аналіз комплексу фіторевіталізаційних заходів та їх екологічна актуальність в проектах з відновлення постраждалих регіонів та створенні нових бізнес проектів. Матеріали та методи. Методи пошуку інформації в друкованих та електронних виданнях, пошукових наукових базах даних, а також методи аналізу, порівняння та узагальнення. Результати. Наведено приклади використання фіторемедіації у світі та описано потенційні перспективи застосування цього підходу на українських територіях після військового протистояння для пост-відновлення. Розглянуто методи ревіталізаційних заходів у системі грунт-рослина та їхній кліматоформуючій функції для проектування екологічно збалансованих просторів та економічну перспективність відновлених територій. Обгрунтована потреба в подальших дослідженнях і розробці національних програм з використання фіторевіталізаційних технологій у повоенному відновленні країни. Висновки. Фіторевіталізація є мультиваріантним процесом поєднання різних галузей екології та економіки, яка націлена на розвиток територій, поневічених війною та промисловим впливом, використовуючи рослини як основний інструмент відновлення і головна кліматорегулююча складова сталого розвитку. Даний підхід ставить на меті створення нових робочих місць, доданої вартості та нових ресурсних джерел для розвитку громад і країни в екологічно сталому напрямку, який буде вигідним для бізнесу і корисним для природи. *Ключові слова:* ревіталізація, ремедіація, гумус, ландшафтне проектування, урбанізація, екологічне виробництво, фітоекстракція.

Phytorevitalisation as part of an ecocentric approach to the restoration of contaminated areas. Lytvyn B., Smirnov O., Taran N.
Relevance and Purpose of the Study. The restoration of areas devastated by military action or human-induced pollution is a long and costly process that requires extensive economic and environmental research to determine the cleanup method, subsequent site development, and intended use for future operation. To make this process effective and standardized, it is necessary to investigate the relationship between the ecological integrity of an area and its economic attractiveness. To bridge these distinct fields of expertise, we propose introducing the term "phytorevitalization"–a strategy for restoring territories by influencing the state of the ecocenosis and facilitating their subsequent use, with plants serving as the primary remediation tool and a vital resource for future business development. The goal is to explain the meaning of the term "phytorevitalization" and the feasibility of its use in projects aimed at the "recolonization" of affected regions. To highlight the need for a new approach to soil restoration as a key element in economic development and to demonstrate how remediation influences the creation of new business ventures. Materials and Methods. Methods of information retrieval from print and electronic publications and scientific databases, as well as methods of analysis, comparison, and generalization. Results. Examples of phytoremediation use worldwide are provided, and the potential prospects for applying this approach in Ukrainian territories following military conflict for post-conflict restoration are described. The issue of revitalization measures worldwide is also explored, demonstrating the impact of land remediation on a region's economic prospects. Thus, it is posited that there is a need for further research and the development of programs at the national level to define a framework for phytorevitalization projects. Conclusions. Phytoremediation is a combination of various fields of ecology and economics aimed at developing territories devastated by war and industrial impact, using plants as the primary tool for remediation and the main source of income. This approach aims to create new jobs, added value, and new resource sources for the development of communities and the country in an environmentally sustainable direction that will be profitable for business and beneficial for nature. *Key words:* miscanthus, remediation, humus, landscape design, urbanization, ecological production, phytoextraction.

© Литвин Б.Б., Смірнов О.Є., Таран Н.Ю., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Війна руйнує навколишнє середовище, залишаючи у спадок забруднення, яке загрожує здоров'ю людей і підриває функціональність екосистеми. Забруднення довкілля важкими металами, нафтовими вуглеводнями, вибуховими речовинами та іншими небезпечними речовинами [1] є поширеним наслідком військової діяльності. Прямі втрати від забруднення, а також непрямі від втрати робочих місць, зміни територіальної демографії та міграції бізнесу, вимагають нових рішень, які інкорпорують ремедіацію грунтового шару з подальшою "реставрацією" відновлених територій для залучення інвестицій, збільшення економічної привабливості та довгострокової доцільності використання оновлених територій.

Актуальність дослідження. Актуальність теми відновлення грунтів внаслідок воєнних дій та індустріального забруднення напряму пов'язана з необхідністю пошуку найбільш оптимальних методів з відновлення понівечених територій задля їх подальшого використання в економіці. Це має особливу актуальність для прифронтових територій України, так як більша частина військових дій проходила на сільськогосподарських угіддях.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах науково-дослідницької тематики кафедри біології рослин ННЦ «Інститут біології та медицини» КНУ ім. Тараса Шевченка та спрямовано на реалізацію у таких міжнародних проєктах як RECOVER [2] та відповідно до Регламенту ЄС 2023/915 [3] задля уніфікації стандартів сільськогосподарського сектору між країнами ЄС та Україною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фіторемедіація вже давно не нова концепція – це дуже перспективна зелена технологія для пом'якшення впливу війни на навколишнє середовище [4]. Ранні дослідження показали, що багато видів рослин здатні очищати ґрунти, забруднені вуглеводнями, важкими металами та вибуховими речовинами [5]. Особливий потенціал у фіторемедіації демонструють гіперакумулятори – рослини, які мають надзвичайну здатність поглинати та накопичувати значні кількості важких металів у своїх тканинах [4].

В умовах України дана технологія є найбільш доцільною. Кожного дня країна потерпає від ворожих обстрілів цивільної інфраструктури та артилерійським бомбардуванням прифронтових зон, що залишає після себе забруднення, яке буде розкладатися протягом 70 років [1] і робити грунт токсичним. Тому пряме втручання в процес відновлення є необхідним.

Рослини в цьому питанні будуть грати найважливішу роль, бо заберуть на себе питання очищення грунту і разом з тим стануть ядром для підприємств, які можуть використовувати екологічний матеріал у різних цілях для ведення діяльності. В цьому питанні, "Фіто-ревіталізація" – це стратегія створення нових виробничих галузей на основі рослинного матеріалу, який в першому етапі є фундаментом для відновлення поневічених земель та утворення нового екотопу, а в наступних етапах – центральний елемент утворення доданої вартості: через озеленення забудови, переробку на біопаливо, використання в сільськогосподарських цілях. Цей підхід дозволяє стабілізувати екоценози, паралельно розвиваючи нові галузі економіки, що почне новий етап економічно доцільної та екологічно сталої економіки.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність значної кількості публікацій щодо використання рослин в відновленні грунтів та статей з ревіталізації територій індустріального призначення, недостатньо дослідженим залишається вплив флори на макрохімічний склад грунту і те, як це в подальшому може вплинути на агротехнічні перспективи ділянки. Зокрема бракує досліджень, які вказують на вплив такої фіторемедіації на екологічну складову середовища і на подальше використання рослин ремеліораторів після виконання їх цільового призначення.

Новизна. Пропонується встановити значення терміну "фіторевіталізація" та продемонструвати участь рослин у відновленні грунтів після контамінації внаслідок воєнних дій та індустріального впливу шляхом дослідження макроелементного стану грунту до і після ремедіативних заходів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Отримані результати формують методологічне підгрунтя для переходу від експериментального до стандартизованого підходу в проектах з відновлення пошкоджених територій. Об'єкт дослідження – окремі зразки багаторічних рослин та симбіотичних угруповань з водоростями виду Chlamydomonas rp. та територія ННЦІБМ при КНУ ім. Тараса Шевченка як головна ділянка досліду. Територія кампусу є еталонним місцем для аналізу впливу рослин на грунт, який зазнав будівельного забруднення після процесу розбудови житлових масивів біля метро Виставковий центр та воєнного після обстрілу факультету комп'ютерних наук у 2024 році.

Викладення основного матеріалу. Для обґрунтування ідеї "фіторевіталізації", треба розділити цей термін по двом його складовим і дослідити їх і як окремі галузі науки і як співставні терміни, які поєднуються для реалізації більшої мети. Якщо розбирати "фіто-" частину цієї нової парадигми, то треба висвітлити роль рослин у відновленні забруднених територій. Фіторевіталізація (від гр. phyton – рослина, лат. re … – відновлення та vita – життя, дослівно: повернення життя) – термін, який вказує на процеси повернення життя завдяки рослинним організмам.

Принципом фіторевіталізації є не просто медіація та стабілізація понівечених війною територій, а реабілітація контамінованих зон для створення нових функціональних середовищ. У повоєнний час важливе значення для збереження

довкілля матиме питання розмінування територій та очищення від боєприпасів. У світі вже існують ініціативи, що працюють із наслідками забруднення протипіхотними мінами та іншими вибухонебезпечними пережитками війни, і мають програми очищення для регіонів.

Так, наприклад, Favas et al., [6] пропонують комплекс фіторевіталізаційних заходів на основі біоремедіації в системі грунт-рослина (Рис. 1) з використанням природних бактерій з ґрунтів для розщеплення нафти.

Рослини завдяки своїй біології впливають на забруднення шляхом екстракції та секвестрації, де вони вилучають з грунту хімічні реагенти або важкі метали і завдяки процесу фотосинтезу біосеквеструють вуглекислий газ з повітря у грунт, утворюючи гумус який є основним фундаментом розвитку біоценозу.

Ремедіація важких металів:

Багато досліджень показали, що фіторемедіація є успішним методом відновлення ґрунтів, забруднених важкими металами, такими як свинець, кадмій, миш'як і хром, внаслідок військової діяльності, наприклад, на місцях виробництва боєприпасів і колишніх військових полігонів [7].

Використання рослин для накопичення важких металів у своїй надземній біомасі, відоме як фітоекстракція, вивчалося і успішно застосовувалося у великій кількості контекстів, у тому числі на територіях після видобутку корисних копалин і на військових об'єктах. Наприклад, показано, що ярутка лісова (*Thlaspi caerulescens*) здатна накопичувати до 300 г Cd га-1 у своєму листі лише за два місяці росту на забрудненому полі [8]

В іншому дослідженні порівнювали здатність Буркуна Лікарського (*Melilotus officinalis*) та Щириці загнутою (*Amaranthus retroflexus*) до виведення Cu та Mo із забрудненого ґрунту. Дані показали, що A. retroflexus здатний поглинати Cu і Mo в коренях, а M. officinalis може накопичувати Zn у пагонах [9], [10].

Використовуючи три різні сорти трави Нап'єра (*Pennisetum purpureum*), дослідники нещодавно вивчали поглинання Cd і Zn у польових умовах [11].

Рекультивація вуглеводнів:

Навіть найменша деградація нафтових вуглеводнів також була продемонстрована за допомогою фіторемедіації – поширеного забруднювача військової діяльності, такого як зберігання і транспортування пального.

Деградація або випаровування нафтових вуглеводнів тополями (Populus spp.) і травами була широко досліджена [12], [13].

Було показано, що взаємодія рослин і мікробів посилює деградацію вуглеводнів через ризодеструкцію. Хімічні та графічні дані показали, що кореневища рогізу широколистого (*Typha latifolia*) мають потенціал для фітодеградації тербутилазиду (гербіцид, відноситься до хлортріазинів) [14].

При комбінації Pseudomonas aeruginosa і Bacillus sp., ризобактерії підтримки росту рослин, з мангровим деревом (*Rhizophora mangle*), було спостережено деградацію поліциклічних ароматичних вуглеводнів (PAHs) у забрудненому осаді. [15]

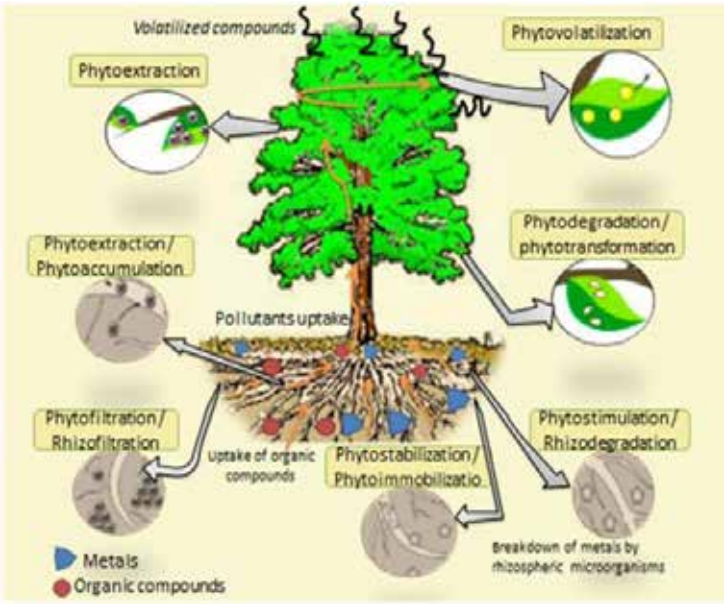


Рис. 1 Основні процеси ремедіації грунту рослиною, які включають: Фітоекстракцію, фітоволатизацію, фітоакумуляцію, фітостабілізацію та фітостимуляцію. [6]

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Знешкодження вибухових речовин:

ТНТ (тринітротолуол) і RDX (гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-триазин) є вибуховими речовинами, які мають свої власні екологічні ризики.

Рослини Бородавочника розчепіреного (*Vetiveria zizanioides*) здатні видаляти з ґрунту до 97% тринітротолуолу (ТНТ) [16]. Тютюн справжній (*Nicotiana tabacum*), після модифікації з додаванням бактеріальної нітроредуктази (nfsI) у пластидах, має здатність до детоксикації тротилу (ТНТ). [17]. Було виявлено, що рослини Populus deltoids мають здатність перетворювати гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-триазин (RDX) в метаболічні елементи. [18]

Наведена інформація обєктивно свідчить про участь рослин в процесах фіторемедіації грунтів, але, з огляду на специфіку сучасних воєних технологій, урізноманітнення хімічної складової боєприпасів, проблема потребує досконалого вивчення з огляду на екологію урбо- та агропросторів та комфортного існування людини в них.

Найголовнішими проблемами забруднення грунту під час воєнних дій є забруднення грунту і втрата вмісту гумусу, який необхідний для розвитку рослинності. Отже, для найбільш широкого ефекту, є потреба в дослідженні рослин та бактерій, які здатні як на біоекстракцію, так і на секвертацію вуглецю для відновлення гумусу.

На території ННЦ "Інститут біології та медицини" для реабілітації територій після будівництва ЖК "Standard ONE" були висаджені рослини сорту

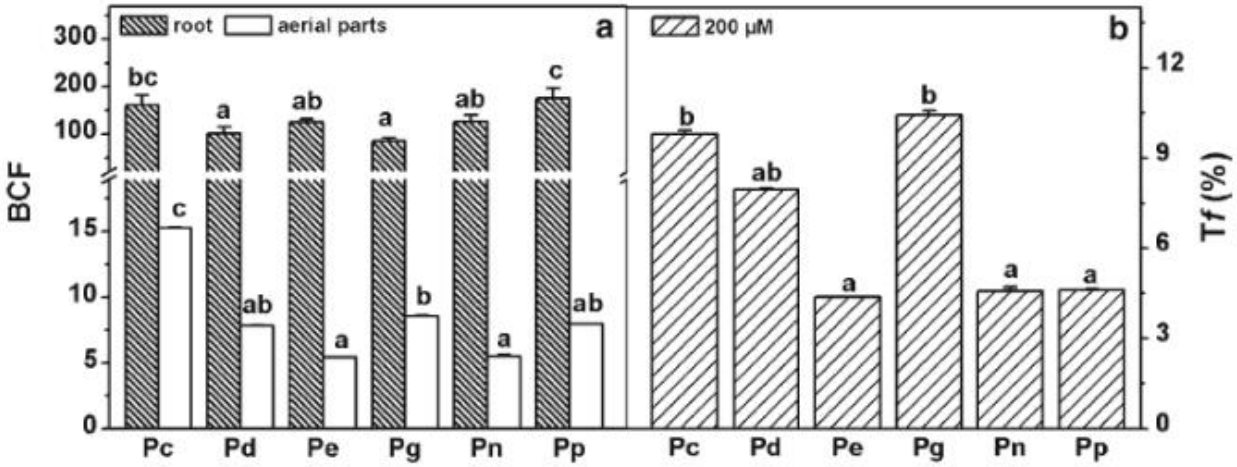


Рис. 2 Фактор біоконцентрації (BCF) та фактор транслокації (Tf) у шести видів тополі, які зазнали впливу 200 мкМ CdSO4 протягом 20 днів. Різні літери на стовпчиках вказують на достовірну різницю між видами. Смуги вказують на середні значення ± SE (n06). Результати статистичного аналізу наведено в таблиці S3.PcP. cathayana,PdP. deltoides,Pe P. ×euramericana,PgP. alba×P. glandulosa,PnP. nigra,PpP.popularis. [12]

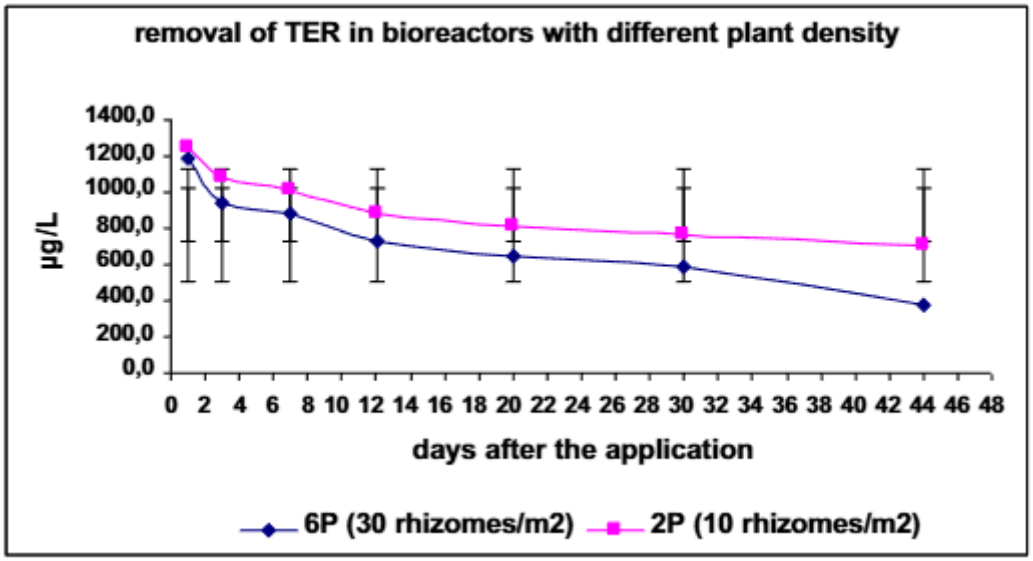


Рис. 3 Розсіювання тербутилазину у різних водно-болотних біореакторах. Щільність рослин 2P (або 10 кореневищ/м2) та 6P (або 30 кореневищ/м2) [14].

Міскантус гігантський (Miscanthus giganteus) для ре-меліорації територій кампусу.

Будучи як гіперакумулятором так і біосеквестратором, використання цього злаку є вирішенням проблеми як забруднення грунту, так і втрати його родючості отже вибір даної рослини полягає в її можливості виконувати як естетичну функцію, так і практичну

Доведено, що вміст органічного вуглецю (основний компонент в процесі гуміфікації) в ґрунті після вирощування міскантусу збільшився на 25,5-45,3%, тоді як екстрактні CaCl2-ME (мікроелементи) зменшилися внаслідок складних ризосферних процесів, що зумовлюють поглинання рослинами мінеральних речовин та надходження органічного вуглецю в ризосферу. [19] У забруднених ґрунтах міскантус накопичував Cd, Pb і Zn переважно в коренях (Фактор біо концентрації (ФБК) в коренях: Cd >> Zn > Pb), при цьому сильно знижуючи перенесення цих елементів з ґрунту в усі інші органи як кореневища, стебла і листя (середній Транслокаційний фактор (ТФ): 0,01-0,06, 0,11-1,15 і 0,09-0,79 для Cd, Pb і Zn відповідно). [20]

Дані фактори є найбільш актуальними для очищення міст, особливо зважаючи на нещодавні обстріли та потрапляння уламків на території виставкового кампусу університету.

Апроксимуючи наявну в літературі інформацію щодо можливих фіторемедіаційних механізмів, варто розглядати сімбиотичні зв'язки рослин з ціанобактеріями, які превалюють в органічній складові грунту, задля створення кращих комбінацій рослинного матеріалу і покращення ефектів фітоекстракції важких металів з грунтів та відновлення макроелементного складу грунту. Так було доведено, що використання фосфаторозчинних бактерій (Bacillus) у забрудненому хімікатами грунті збільшує доступність фосфору в оптимальній для рослин формі [21], і на прикладі Гірчиці салатної (Brassica juncea) викликав збільшення сухої маси рослини на 349% через 8 тижнів після внесення бактерії, що в свою чергу дозволило рослині акумулювати більше важких металів (продемонстровано ріст акумуляції кадмію в різосфері рослини на 148%). [22]

Суха маса Вігни променистої (*Vigna radiata* L.) збільшувалася на 28% у ґрунті, що містив 9780 мг

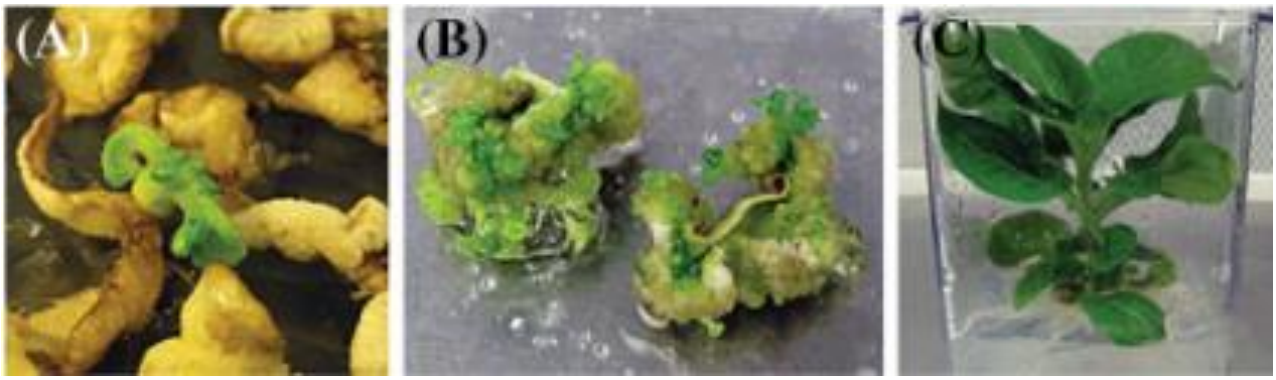


Рис. 4 Етапи трансформації модифікованого тютюну. (A) Зелений 8-тижневий проросток, отриманий з листових дисків під час першого раунду селекції на середовищі з 6-бензиламінопурин та 0,1 мг/л нафталевоцтової кислоти. (B) Проростки, отримані з листових дисків після культивування протягом 3 тижнів під час другого раунду селекції. (C) 3-тижневі регенеровані рослини, що ростуть на метилсульфоніловому середовищі для вкорінення. Всі раунди селекції містили спектиноміцин у концентрації 500 mg/L. [17]



Рис. 5 Вигляд грунту біля фасаду кампусу ННЦ "Інститут біології та медицини" і використання міскантусів

Zn кг-1, і на 24% у ґрунті, що містив 580 мг Ni кг-1, в експериментах з використанням Bradyrhizobium sp. (vigna), стійкої до важких металів N2-фіксуючої бактерії. [23]

Збільшення біомаси рослин супроводжувалося збільшенням загального вмісту азоту в рослинах порівняно з неінокульованим контролем.

Дослідження показали, що фіторемедіація набагато дешевша, ніж більш традиційні методи очищення. Хімічна обробка коштує від $100 до $500 за тонну вивезеного сміття, тоді як вартість обробки за допомогою фіторемедіації становить лише від $20 до $40 за тонну вивезеного сміття. [24]

Було проведено аналогічний аналіз, який показав, що фіторемедіація коштує від $2500 до $15 000 на гектар, тоді як обробка мікроорганізмами коштує від $20 000 до $60 000 на гектар, а обробка мікроорганізмами in situ – від $7500 до $20 000 на гектар для видалення нафтових вуглеводнів. [25]

Ревіталізаційний потенціал відновлення територій будується на оцінці розташування земель та їх подальшого функціонального призначення. Завдяки відновленню грунтів територій, які раніше були забруднені внаслідок воєнної активності або антропогенної діяльності, відкриваються можливості для подальшої експлуатації і розбудови. Ревіталізація відкриває нові логістичні шляхи, дозволяючи створювати економічні зони, які будуть приваблювати підприємства і приносити додаткові робочі місця. Завдяки розмінуванню, економічні артерії Мозамбіка після більш ніж двадцятирічного занепаду стали більш відкритими, відкриваючи нові зв'язки між периферією країни та столицею. [26]



Рис. 6 Наслідки обстрілів біля факультету комп'ютерних наук

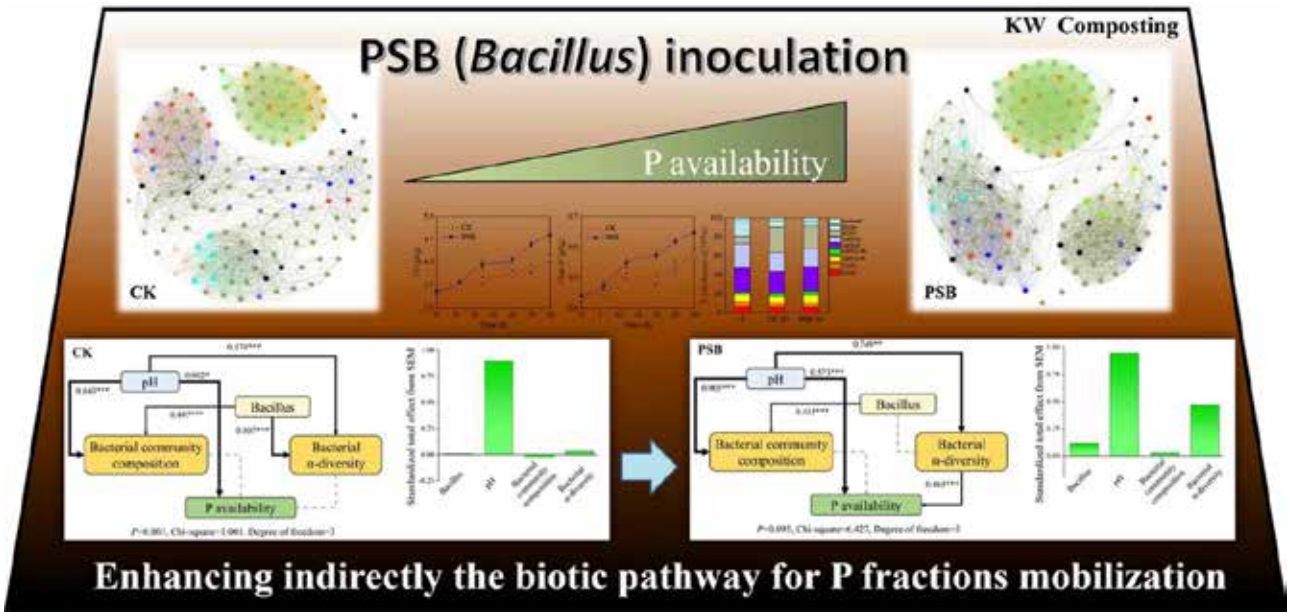


Рис. 7 Графічне відображення впливу інокуляції (вживлення) Bacillus у грунт на доступність фосфору (P) та пов'язану з цим динаміку мікробної спільноти під час процесу компостування. [21]



Рис. 8 Вигляд Форту Бема після ревіталізації. Частина військових будівель стали туристичними зонами і територіями рекреації, зі збудованими спортивними майданчиками та кортами всередині.

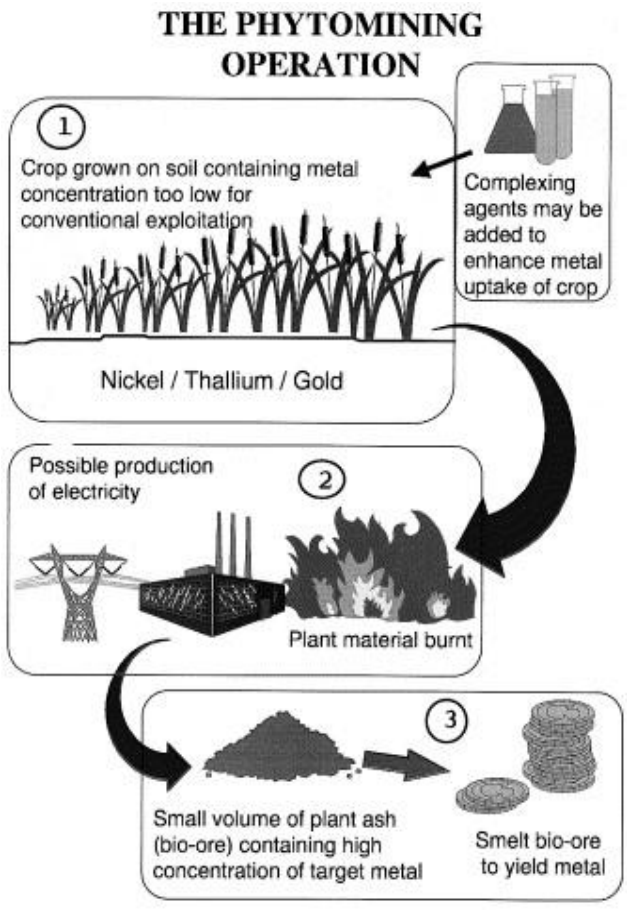


Рис. 9. Схема обробки рослин для фітомайнингу

Це відкрило шлях до залучення нових територій до товарообігу та відкрила кращі шляхи для людей у пошуку роботи та житла, а базові потреби стали більш доступними. Це також підтверджується розрахунками з проекту ревіталізації Форт Бема Парк в Варшаві, що створило екологічний простір на 148 гектарів з житлом та комерцією, що в свою чергу позитивно вплинуло на демографію міста.

Розбудова території старої фортифікації викликало в період з 2006 по 2009 міграційний ажіотаж, де більш ніж 2000 жителів переїхали в район, який до того моменту вважався несприятливим для життя. Таке переселення спричинило відкриття нових підприємств та розбудову нових ліній громадського транспорту для обслуговування нового району. [27]

При фіторевіталізації, сам інструмент оновлення території стає головним джерелом капіталообігу. Таким чином використовується індійська гірчиця як головний інструмент в фітомайнингу – процесу, де рослини висаджують у насичених металами грунтах з метою висушування листків і їх подальшої обробки для екстракції металу. Вона є гіперакумулятором, який краще всього поглинає нікель, який у світі літій-іонних батарей є незамінним металом, ціна на якого росте разом і з величезним попитом світової спільноти. [28]

Головні висновки. Нещодавні дослідження показують, що фіторемедіація у комплексі фіторевіталізаційних процесів стає все більш привабливим як технічно здійсненний і екологічно безпечний

метод дезактивації територій, де ведуться військові дії. Випробування в лабораторії показали, що важкі метали, нафтопродукти і вибухові речовини можна очистити з ґрунту за допомогою цієї технології, яка використовує рослини для поглинання, накопичення і розщеплення забруднюючих речовин.

Було доведено, що різні види рослин здатні ефективно виводити забруднювачі з ґрунту, в тому числі гіперакумулятори та енергетичні культури, такі як міскантус. Рослини та мікроорганізми, такі як ризобактерії, можуть зробити значний внесок у синергію процесів фіторевіталізаці.

Фіторевіталізація має всі переваги, особливо екологічність, дешевизну та відновлення екосистем. В поєднанні з проектами з ревіталізації територій та оцінки майбутніх перспектив, території, які раніше могли вважатися чисто аграрними або індустріальними, можуть отримувати нові призначення, які приносять найбільшу вигоду для підприємств та держави. Завдяки врахуванню логістичного навантаження та доступності людського капіталу, понівечені війною та виробництвом території можуть отримати нове життя і ставати центрами економічного відновлення, при цьому дотримуючись стандартів сталого розвитку урбаністичного середовища.

Перспективи використання результатів дослідження. Практична цінність результатів найбільше проявляється для територіальних громад, чиїм основним видом заробітку була сільськогосподарська діяльність. Разом з тим, існує потреба в розробці оптимальних стратегій фіторемедіації для різних типів забруднення, а також в оцінці довгострокового впливу на економічні показники окремих регіонів, враховуючи кліматоформуючу функцію фітоценозів. В подальших дослідженнях пропонується більш детально розглянути питання ремедіативного ефекту рослин на територіях антропогенного впливу, які в подальшому планується передати на агро сферу або під житлову забудову. Окрім цього, варто дослідити питання створення процедур фітоекстракції забруднюючих реагентів та дослідження впливу біосеквестрації на родючість грунту і подальше створення бізнес-моделі використання рослин гіперакумуляторів та грунтових водоростей як основний інструмент очищення грунту і подальшу переробку для біопалива.

Література

1. UNEP. The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine. 2022. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40746/environmental_impact_Ukraine_conflict.pdf?sequence=3&isAllowed=y (дата звернення: 03.09.2026).
2. RECOVER. 2025. URL: https://recover-ukraine.com. (дата звернення: 03.09.2026).
3. COMMISSION REGULATION (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC). No 1881/2006. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/eng (дата звернення: 03.09.2026).
4. Varkey M., Lal N., Khan Z. H. Phytoremediation: Strategies to Enhance the Potential for Toxic Metal Remediation of Brassica Oilseed Species. 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/289718210_Phytoremediation (дата звернення: 03.09.2026).
5. Baker A. J. M., Reeves R. D., Brooks R. R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*. 2000. Vol. 1. P. 81–126. URL: https://www.researchgate.net/publication/247713966_Terrestrial_Higher_Plants_Which_Hyperaccumulate_Metallic_Elements_A_Review_of_Their_Distribution_E (дата звернення: 03.09.2026).
6. Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora / P. J. Favas et al. *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*. 2014. Vol. 3. P. 485–516. URL: https://www.researchgate.net/publication/261100081_Phytoremediation_of_Soils_Contaminated_with_Metals_and_Metalloids_at_Mining_Areas_Potential_of_Native_Flora (дата звернення: 03.09.2026).
7. Islam Md. M., Saxena N., Sharma D. Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. 2024. URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/su/d3su00440f (дата звернення: 03.09.2026).
8. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants / A. J. M. Baker et al. 1994. URL: https://www.academia.edu/49309364/The_possibility_of_in_situ_heavy_metal_decontamination_of_polluted_soils_using_crops_of_metal_accumulating_plants (дата звернення: 03.09.2026).
9. Steliga T., Kluk D. Assessment of the Suitability of Melilotus officinalis for Phytoremediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbons (TPH and PAH), Zn, Pb and Cd Based on Toxicological Tests. 2021. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8309879/ (дата звернення: 03.09.2026).
10. A meta-analysis on the heavy metal uptake in Amaranthus species / D. Tőzsér et al. 2023. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-28374-3 (дата звернення: 03.09.2026).
11. Potential use of Pennisetum purpureum for phytoremediation and bioenergy production: a mini review / N. A. Osman et al. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/338718761_Potential_use_of_Pennisetum_purpureum_for_phytoremediation_and_bioenergy_production_a_mini_review (дата звернення: 03.09.2026).
12. Cadmium tolerance in six poplar species / J. He et al. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/225272978_Cadmium_tolerance_in_six_poplar_species (дата звернення: 03.09.2026).
13. Pajevič S., Borišev M. Phytoremediation capacity of poplar (Populus spp.) and willow (Salix spp.) clonesin relation to photosynthesis. 2009. URL: https://www.semanticscholar.org/reader/1be37f959b12e1e647de08675e768383a4a26c9c (дата звернення: 03.09.2026).

14. Papadopoulos N., Zalidis G. The Use of Typha Latifolia L. in Constructed Wetland Microcosms for the Remediation of Herbicide Terbuthylazine. 2019. URL: https://www.academia.edu/108081252/The_Use_of_Typha_Latifolia_L_in_Constructed_Wetland_Microcosms_for_the_Remediation_of_Herbicide_Terbuthylazine (дата звернення: 03.09.2026).
15. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a diesel oil-contaminated mangrove by plant growth-promoting rhizobacteria / C. J. S. Sampaio et al. 2019. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30944802/ (дата звернення: 03.09.2026).
16. High uptake of 2,4,6-trinitrotoluene by vetiver grass – Potential for phytoremediation? / K. C. Makris et al. 2007. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749106004015?via%3Dihub (дата звернення: 03.09.2026).
17. Phytodetoxification of TNT by transplastomic tobacco (Nicotiana tabacum) expressing a bacterial nitroreductase / L. Zhang et al. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/318799509_Phytodetoxification_of_TNT_by_transplastomic_tobacco_Nicotiana_tabacum_expressing_a_bacterial_nitroreductase (дата звернення: 03.09.2026).
18. Just C. L., Schnoor J. L. Phytophotolysis of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in leaves of reed canary grass. 2004. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14740749/ (дата звернення: 03.09.2026).
19. Potentials of Miscanthus x giganteus for phytostabilization of trace element contaminated soils: Ex situ experiment / F. Nsanganwimana et al. 2021. URL: https://hal.science/hal-04288721/document (дата звернення: 03.09.2026).
20. Bastia G., Al Souki K. S., Pourrut B. Evaluation of Miscanthus × giganteus Tolerance to Trace Element Stress: Field Experiment with Soils Possessing Gradient Cd, Pb, and Zn Concentrations. 2023. URL: https://hal.science/hal-04288721/document (дата звернення: 03.09.2026).
21. Zhang X. Inoculation of phosphate-solubilizing bacteria (Bacillus) regulates microbial interaction to improve phosphorus fractions mobilization during kitchen waste composting. 2021. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421010555 (дата звернення: 03.09.2026).
22. Survival of introduced phosphate solubilizing bacteria (PSB) and their impact on microbial community structure during the phytoextraction of Cd-contaminated soil / S. Jeong et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Vol. 263. P. 441–449. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389413007061?via%3Dihub (дата звернення: 03.09.2026).
23. Wani P. A., Khan M. S., Zaidi A. Effect of metal tolerant plant growth promoting Bradyrhizobium sp. (vigna) on growth, symbiosis, seed yield and metal uptake by greengram plants. *Chemosphere*. 2007. Vol. 70. P. 36–45. URL: https://www.academia.edu/53534288/Effect_of_metal_tolerant_plant_growth_promoting_Bradyrhizobium_sp_vigna_on_growth_symbiosis_seed_yield_and_metal_uptake_by_greengram_plants (дата звернення: 03.09.2026).
24. Salt D. E., Smith R. D., Raskin I. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. 1998. URL: https://www.academia.edu/8745483/1998_Salt_Phytoremediation (дата звернення: 03.09.2026).
25. Phytoremediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants / S. D. Cunningham et al. *Advances in Agronomy*. 1996. URL: https://www.academia.edu/17512268/Phytoremediation_of_Soils_Contaminated_with_Organic_Pollutants (дата звернення: 03.09.2026).
26. Chiovelli A., Michalopoulos S., Papaioannou E. What are the economic effects of landmine clearance? *VoxDev / Centre for Economic Policy Research*. 2018. URL: https://voxdev.org/topic/infrastructure/what-are-economic-effects-landmine-clearance (дата звернення: 03.09.2026).
27. Sobieraj J., Metelski D. Innovative Approaches to Urban Revitalization: Lessons from the Fort Bema Park and Residential Complex Project in Warsaw. *Buildings*. 2025. URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/15/4/538 (дата звернення: 03.09.2026).
28. Kikis C., Thalassinos G., Antoniadis V. Soil Phytomining: Recent Developments–A Review. *Soil Systems*. 2024. URL: https://www.mdpi.com/2571-8789/8/1/8 (дата звернення: 03.09.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 04.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026