



Copyright (c) 2026 Stanislav Dushkin

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Станіслав Душкін

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ДЕГРАДОВАНИХ ПРОМИСЛОВИХ ЗОН У СТРУКТУРІ СУЧАСНОГО МІСТА



Stanislav Dushkin

ECOLOGICAL ASPECTS OF REVITALISING DEGRADED INDUSTRIAL AREAS IN THE STRUCTURE OF A MODERN CITY

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Метою дослідження є розробка науково обґрунтованої стратегії екологічної ревіталізації деградованих промислових територій (brownfields) в умовах повоєнного відновлення України, що базується на принципах біосферної сумісності та мінімізації ризиків змішаного військово-техногенного забруднення.

Методологія. Дослідження ґрунтується на системному підході з використанням бібліометричного аналізу світового наукового дискурсу (бази Scopus та Web of Science) за допомогою VOSviewer. Застосовано методи екологічного моніторингу, порівняльного аналізу гібридних технологій біоремедіації, структурно-функціонального моделювання урбоєкосистем та модель «Джерело – Шлях – Рецептор» (SPR) для оцінки каскадних екологічних ризиків. Комплексне поєднання зазначених методів дозволило забезпечити високу об'єктивність оцінки та сформувати інтегральну модель мінімізації техногенного навантаження на довкілля.

Наукова новизна. Уперше ідентифіковано специфічний геохімічний профіль українських браунфілдів, що зазнали військового забруднення (поєднання важких металів Sb, Cu, Ni із залишками вибухових речовин TNT, RDX). Обґрунтовано перехід від локальної технічної санації до стратегічного відновлення екосистемних послуг через впровадження природоорієнтованих рішень (NBS) та біоінженерних технологій у структуру «зеленого каркаса» міста.

Висновки. Установлено, що ключовим фактором деструкції промислових територій є синергетичний ефект від поєднання традиційного техногенного навантаження та специфічного воєнного забруднення важкими металами й енергетичними матеріалами, оцінку ризиків яких оптимізовано за моделлю SPR. Доведено, що успішна ревіталізація в умовах післявоєнної відбудови потребує інтегрованого підходу, який поєднує фіторемедіацію, використання біовугілля (biochar) та створення зеленої інфраструктури. Запропоновано чотирьохфазну модель трансформації територій, яка забезпечує перетворення об'єктів руйнації у безпечні біосферно-сумісні урбосистеми та сприяє соціальній реабілітації міського простору.

Ключові слова: ревіталізація, браунфілд, ремедіація, деградація, екосистема, ландшафт, стійкість, відновлення, алгоритм, інфраструктура

ABSTRACT

Purpose of the work. The study aims to develop a scientifically grounded strategy for the ecological revitalization of degraded industrial areas (brownfields) in the context of Ukraine's post-war recovery, based on the principles of biospheric compatibility and minimization of mixed military-technogenic pollution risks.

Methodology. The research is based on a systematic approach using bibliometric analysis of the global scientific discourse (Scopus and Web of Science databases) via VOSviewer. Methods of environmental monitoring, comparative analysis of hybrid bioremediation technologies, structural-functional modeling of urbo-ecosystems, and the "Source – Pathway – Receptor" (SPR) model were applied to assess cascading environmental risks. The comprehensive combination of these methods has ensured a high degree of objectivity in the assessment and enabled the development of an integrated model for minimising the anthropogenic impact on the environment.

Scientific novelty. For the first time, a specific geochemical profile of Ukrainian brownfields subject to "conflict pollution" (a combination of heavy metals Sb, Cu, Ni with explosive residues TNT, RDX) has been identified. The transition from local technical sanitation to the strategic restoration of ecosystem services through nature-based solutions (NBS) and bioengineering technologies within the city's "green framework" is justified.

Conclusions. It has been established that the key factor in the degradation of industrial areas is the synergistic effect resulting from the combination of traditional industrial pollution and specific military contamination with heavy metals and energy materials, the risks of which have been assessed using the SPR model. It is proven that successful revitalization in post-conflict reconstruction requires an integrated approach combining phytoremediation, biochar application, and green infrastructure development. A four-phase model of territory transformation is proposed, ensuring the conversion of destroyed sites into safe, biosphere-compatible urban systems and facilitating the social rehabilitation of urban spaces.

Key words: revitalisation, brownfield, remediation, degradation, ecosystem, landscape, sustainability, restoration, algorithm, infrastructure

Вступ

Сучасний вектор розвитку урбанізованих систем України визначається необхідністю подолання наслідків тривалої деградації промислових територій, що набула катастрофічних масштабів внаслідок воєнних руйнувань. У міжнародній практиці такі об'єкти класифікуються як brownfields – потенційно небезпечні ділянки, що накопичували «інфраструктурну заборгованість», яка сьогодні стає бар'єром для сталого відновлення міст (Zheng & Masrabaye, 2023). Попри значний потенціал для редевелопменту, ці території залишаються джерелами екологічних ризиків через забруднення ґрунтів та підземних вод, що унеможливує їх безпечне використання без комплексної ревіталізації (Hou et al., 2023).

З позицій системного підходу, відновлення brownfields має базуватися на принципах біосферної сумісності та максимізації екосистемних послуг. Це передбачає трансформацію деградованих зон у стійкі елементи «зеленого каркаса» міста, що дозволяє посилити кліматичну адаптивність територій та покращити стан довкілля (Chen & Hashimoto, 2026). Проте в умовах України реалізація таких підходів ускладнюється відсутністю науково обґрунтованих алгоритмів вибору сценаріїв ревіталізації, які б враховували специфіку воєнних руйнувань та принципи циркулярної економіки (Seo, 2024).

Дослідження фокусується на розробці науково обґрунтованої стратегії екологічної ревіталізації деградованих промислових територій, що є ключовим завданням для забезпечення життєздатності та сталого розвитку міських систем в умовах повоєнного відновлення України. Впровадження інноваційних екологічних стандартів та інтегрованих методик містобудівного планування дозволить

уникнути системних помилок минулого, трансформуючи об'єкти руйнації у безпечні біосферно-сумісні урбосистеми. Особлива увага приділяється поєднанню природо-орієнтованих рішень із принципами циркулярної економіки, де використання перероблених матеріалів стає ресурсом для формування стійкого та кліматично резистентного міського середовища.

Матеріали та методи дослідження

Проблема ревіталізації територій brownfields займає центральне місце у дослідженнях, присвячених сталому розвитку міст та подоланню наслідків індустріальної деградації. Сучасний науковий дискурс свідчить про зміну парадигми: від простої технічної санації ділянок до їх комплексної інтеграції в екосистемну структуру мегаполіса (Zheng & Masrabaye, 2023). Проведено масштабний бібліометричний аналіз, який демонструє, що успішна ревіталізація наряду залежить від синергії містобудівного планування та екологічного менеджменту, де пріоритетом є ліквідація накопичених екологічних збитків.

У сучасному контексті сталого розвитку браунфілдів, трансформація існуючої забрудненої або ненадійної забудови стала доречним рішенням для обмеження розширення міст та його шкідливого впливу (Franz et al., 2006; Douglas, 2012; Sakieh et al., 2015). Питання формування стійкості міського середовища через інструменти архітектурного дизайну досліджує Seo K. H. (Seo, 2024). Автор пропонує цілісну модель, за якої редевелопмент brownfields базується на адаптивному використанні простору, що дозволяє територіям ефективно протистояти сучасним кліматичним та антропогенним викликам. Важливим методологічним підґрунтям для таких рішень є теорія циркулярної економіки.

Ghisellini P. та ін. обґрунтовують необхідність переходу до замкнених циклів використання ресурсів, де відходи одного процесу стають сировиною для іншого, що є базовою умовою для балансу між екологічною безпекою та економічною ефективністю ревіталізації (Ghisellini et al., 2016).

Процес відновлення неможливий без науково обґрунтованої ремедіації. Hou D. та ін. у своїх розробках переходять від традиційних методів очищення до концепції сталого відновлення (sustainable remediation), де головним критерієм є мінімізація негативного впливу на екосистеми безпосередньо під час очисних робіт (Hou et al., 2023). Це корелює з глобальною стратегією ООН, де ревіталізація деградованих територій розглядається як інструмент сталого розвитку через відновлення природного капіталу та екологічну стабілізацію урбосистем (Rakoid & Bogoliubov, 2021). Крім того, світовий досвід підтверджує ефективність використання «зелених» мереж як стабілізуючих компонентів урбосистем, що забезпечують самовідновлення територій у довгостроковій перспективі (Artmann & Sartison, 2018).

Серед вітчизняних (українських) дослідників можна звернути увагу на працю проф. Феменко О.О. (Fomenko et al., 2025), де авторський колектив розглядає концепцію симбіозу архітектури і навколишнього середовища. Осипенко, Тарабанова, Запотоцька, Гнатюк та ін. розглядають екологічні аспекти ревіталізації занедбаних промислових територій на прикладі м. Києва (Osypenko & Tarabanova, 2021; Zapotozka & Zhyrova, 2025; Hnatiuk & Melnyk, 2019). Пламенецька з соавторами розглядає методичні підходи до ревіталізації та реновації і зазначає, що навіть мінімальне втручання в історичну субстанцію споруди може створити сучасний простір нової якості, який має нове призначення та життя (Plamenytska et al., 2019).

Таким чином, проведений аналіз наукових напрацювань свідчить про багатогранність проблеми ревіталізації деградованих територій, де екологічний аспект виступає базовим фундаментом для будь-яких архітектурно-планувальних трансформацій. Світовий досвід акцентує

увагу на переході від локальної санації до стратегічного відновлення природного капіталу через впровадження принципів циркулярної економіки та сталого редевелопменту.

Водночас, незважаючи на ґрунтовні дослідження методів ремедіації та реновації історичної забудови, питання комплексної екологічної стабілізації промислових зон саме у структурі сучасного українського мегаполіса потребує подальшої деталізації. Це стосується розробки алгоритмів, що дозволили б гармонізувати екосистемні послуги «зелених» мереж із антропогенним навантаженням ревіталізованих об'єктів. Саме необхідність інтеграції екологічної безпеки у процеси архітектурно-дизайнерського оновлення деградованих промзон визначає актуальність та вектор даного дослідження.

Методи дослідження

Для досягнення мети було використано комплекс наукових методів:

- систематизація та аналіз даних екологічних моніторингових звітів для оцінки характеру військових руйнувань і вторинних забруднень (важкі метали, продукти детонації);
- порівняльний аналіз гібридних технологій біореємедіації та nature-based solutions для вибору оптимальних сценаріїв очищення ґрунтів;
- структурно-функціональне моделювання для оцінки здатності урбоекосистем до саморегенерації та визначення ефективності «зелених коридорів»;
- синтез та побудова логіко-структурних моделей для формування фінального алгоритму ревіталізації в умовах постконфліктної регенерації.

Глобальні тренди та інтелектуальна структура досліджень ревіталізації браунфілдів

Для формування науково обґрунтованого підходу до екологічної ревіталізації промислових територій у контексті повоєнного відновлення України було проведено системний бібліометричний аналіз світового наукового дискурсу. Використання міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science дозволило встановити, що тематика сталого перепланування та регенерації браунфілдів

є відносно новою та специфічною. Характерним є те, що за останні десять років (2015–2026 рр.) кількість цільових публікацій виявилася недостатньою для глибокого статистичного аналізу, що змусило розширити хронологічні межі вибірки до періоду 2010–2026 рр. Проте навіть за такого розширення загальна кількість релевантних праць склала лише 170 результатів. Така обмеженість вибірки при досить широкому часовому діапазоні свідчить про високу наукову новизну та

слабку вивченість інтегрованих підходів до ревіталізації, особливо в умовах подолання наслідків військово-техногенної деградації.

За допомогою програмного забезпечення VOSviewer (v. 1.6.20) було побудовано та проаналізовано карту спільної появи ключових слів (Keyword Co-occurrence Network), що дозволило ідентифікувати інтелектуальну структуру галузі, розподілену за чотирма стратегічними кластерами (рис. 1)

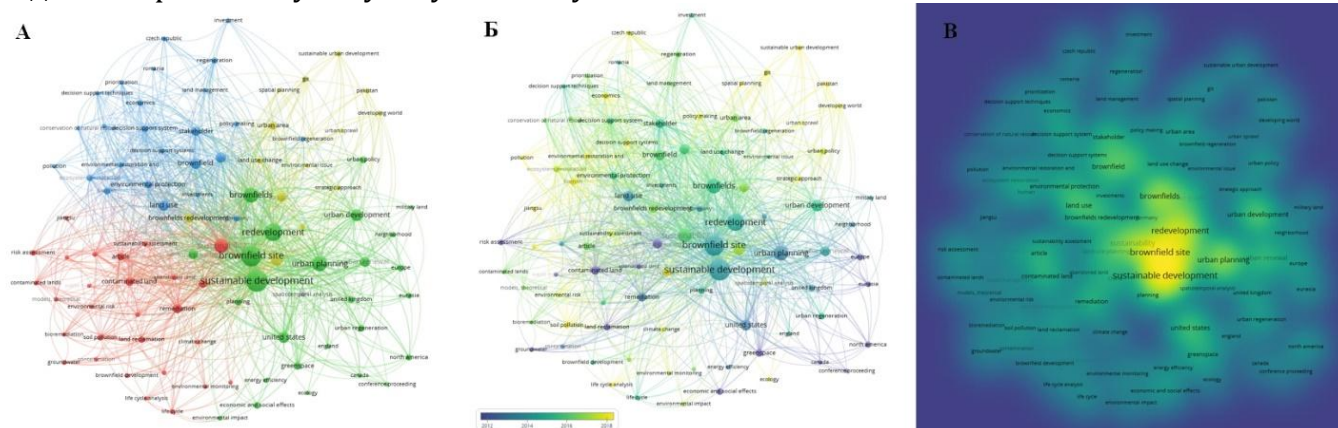


Рис. 1. Бібліометричний аналіз світового наукового дискурсу з питань ревіталізації браунфілдів за період 2010–2026 рр.:

А) мережа спільної появи ключових слів (Keyword Co-occurrence Network);

Б) візуалізація часової еволюції дослідницьких пріоритетів (Overlay Visualization);

В) щільність розподілу наукової уваги за тематичними напрямками (Density Visualization)

Примітка: сформовано автором за допомогою VOSviewer.

Результати дослідження та обговорення

На рисунку 1А центральне ієрархічне положення в мережі займають вузли «sustainable development» та «brownfield site», які виступають головними смисловими інтеграторами для всіх тематичних напрямів. Зелений кластер (містобудівний) відображає концептуальну єдність міського планування (urban planning) та сталої регенерації (urban regeneration). Це вказує на пріоритетність включення браунфілдів у загальну стратегію розвитку міських екосистем, де занедбані території розглядаються не як депресивні зони, а як ресурс для просторового оновлення.

Червоний кластер (екологічний) концентрує дослідження у сфері технічної ремедіації (remediation), відновлення земель

(land reclamation) та оцінки екологічних ризиків (risk assessment). Цей вектор безпосередньо корелює з визначенням у роботі завданням щодо ідентифікації та подолання наслідків військово-техногенної деградації територій, спричиненої детонацією боєприпасів та хімічним забрудненням ґрунтів. Синій кластер (економіко-соціальний) охоплює інструменти управління (land management) та системи підтримки прийняття рішень (decision support system), спираючись на досвід країн Східної Європи, зокрема Чехії (Czech Republic) та Румунії (Romania), що є критично важливим для адаптації в умовах України.

Аналіз часової динаміки досліджень (Overlay Visualization, рис. 1.Б) демонструє чітку еволюцію наукового фокусу. Якщо в

період 2012–2014 рр. домінували питання традиційного промислового редевелопменту та економічної доцільності, то в останні роки (2016–2018 рр. і пізніше) акцент змістився в бік екосистемних послуг, кліматичної адаптації та впровадження природоорієнтованих рішень (nature-based solutions). Жовтим кольором на карті ідентифіковано найбільш сучасні вектори: ecosystem restoration та environmental protection. Це підтверджує наукову новизну нашої роботи у частині використання біоінженерних рішень як інструменту відновлення стійкості порушених урбанізованих ландшафтів.

Завершальна візуалізація щільності наукового поля (Density Visualization, рис. 1.B) ілюструє високу концентрацію дослідницького інтересу навколо вузлів «brownfields» та «redevelopment», які формують «ядро» глобальної наукової думки. Яскраво виражені зони навколо термінів urban development та sustainability підтверджують гіпотезу дослідження: успішна екологічна ревіталізація не є

ізолюваним інженерним процесом, а виступає невід'ємною частиною соціальної реабілітації міського простору та сталого повоєнного відновлення. Таким чином, бібліометричний аналіз заклав необхідний теоретичний фундамент для розробки інтегрованої моделі трансформації територій, адаптованої до стратегічних пріоритетів України.

Особливості екологічної деградації промислових територій внаслідок безпосереднього впливу воєнних дій

Трансформація промислових територій (браунфілдів) в умовах повоєнного відновлення України вимагає перегляду традиційних підходів до оцінки забруднення. На відміну від класичних об'єктів, де деградація відбувалася десятиліттями внаслідок технологічних процесів, сучасні українські браунфілди зазнають змішаного військово-техногенного впливу, що формує унікальний геохімічний профіль територій. Сценарії забруднення територій наведено на рис. 2.

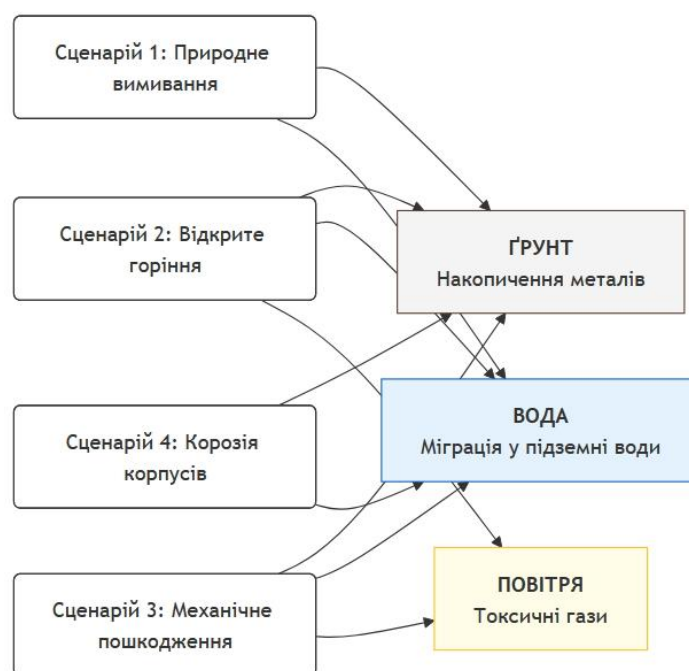


Рис. 2. Сценарії та механізми впливу вибухонебезпечних предметів на компоненти довкілля

Примітка: сформовано автором за допомогою Mermaid Live Editor.

Аналіз наведених сценаріїв (рис. 2) свідчить, що деградація промислових територій у зоні бойових дій не обмежується лише фізичним руйнуванням об'єктів. Вона має каскадний характер: від миттєвого викиду

продуктів детонації до багаторічного вимивання токсикантів у підземні води. Умови півдня та сходу України, що характеризуються інтенсивним використанням артилерії, створюють передумови для формування

стійких осередків військового забруднення, які потребують детального вивчення їхньої внутрішньої структури.

Хімічна структура та специфіка військового забруднення

Основним фактором деградації є масована детонація боєприпасів, що призводить до надходження в ґрунтове середовище специфічних токсикантів. До ключових маркерів військового впливу належать:

- важкі метали (ВМ): Окрім стандартних для промисловості Pb та Zn, спостерігається аномальне накопичення сурми (Sb), міді (Cu) та нікелю (Ni), що входять до складу оболонок боєприпасів та детонаторів.

- продукти детонації та залишки вибухової речовини (ВР): В результаті вибухів у ґрунт потрапляють залишки тринітротолуолу (ТНТ), гексогену (RDX) та тетрилу, які характеризуються високою персистентністю та канцерогенністю.

- азотовмісні сполуки: Оксиди азоту та аміак, що утворюються при горінні ракетного палива та детонації порохів, викликають локальне «хімічне випалювання» рослинного покриву та закислення ґрунту.

Аналіз проб ґрунту, відібраних безпосередньо у зонах впливу бойових дій на півдні України, засвідчує аномальні концентрації таких елементів, як свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), цинк (Zn) та барій (Ba), значення яких у багатьох випадках перевищують ГДК. Окрім металів, у зонах детонації виявлено значні рівні поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що є наслідком неповного згоряння вибухових речовин та вторинних пожеж (Conflict and Environment Observatory & Norwegian People's Aid, 2025).

Специфіка цього типу забруднення полягає у його персистентності: навіть за відсутності негайної гострої токсичності, довгострокова міграція важких металів та енергетичних матеріалів у ґрунтові води створює тривалі ризики для продовольчої безпеки та здоров'я населення через накопичення токсикантів у трофічних ланцюгах (Rashkevich et al., 2025). Це підтверджує необхідність впровадження спеціалізованих стратегій ревіталізації, що враховують кумулятивний ефект від руйнування промислової інфраструктури та безпосередніх наслідків обстрілів.

Аналіз хімічних властивостей маркерних сполук (табл. 1) вказує на складний характер потенційної ремедіації. Зокрема, такі речовини як RDX та Ammonium perchlorate, через свою високу розчинність та стійкість до розкладання, становлять найбільшу загрозу для підземних водних горизонтів. Водночас ТНТ та білий фосфор вимагають негайної локалізації через екстремально низькі значення референтної дози токсичності (0.0005 мг/кг та 0.00002 мг/кг відповідно). Синергія цих сполук із важкими металами (Sb, Cu, Ni) створює стійкі техногенні аномалії, що блокують природні процеси самовідновлення ґрунту.

Механічна деструкція та вторинні забруднення

Військові руйнування промислових цехів призводять до вивільнення «законсервованих» токсикантів. На територіях спостерігається хаотичне змішування будівельного сміття з:

- асбестовмісними матеріалами: Руйнування шиферних дахів та ізоляції створює небезпеку вдихання мікрОВОЛОКОН асбесту;

- поліхлорованими біфенілами (ПХБ): Витікання мастил із пошкоджених трансформаторних підстанцій створює стійкі осередки органічного забруднення підземних вод;

- паливно-мастильними матеріалами (ПММ): Розливи нафтопродуктів через прямі влучання в резервуари створюють непроникні плівки, що блокують процеси саморегенерації ґрунтів.

Механічне пошкодження промислової інфраструктури та наявність нерозірваних або частково детонованих боєприпасів ініціює каскад вторинних екологічних ризиків. Згідно з методологією Женевського міжнародного центру з гуманітарного розмінування (GICHD), процес вторинного забруднення слід розглядати через модель «Джерело – Шлях – Рецептор» (SPR) (Geneva International Centre for Humanitarian Demining, 2021).

У контексті військових руйнувань промислових об'єктів «джерелом» виступають не лише продукти вибуху, а й корпуси боєприпасів, що зазнають корозії у ґрунтовому середовищі (рис. 2). Поступове вимивання токсичних компонентів (свинцю, сурми, вольфраму) із залишків боєприпасів створює довгострокові «шляхи» міграції токсикантів до підземних вод та рослинності («рецепторів»).

Таблиця 1

Характеристика основних енергетичних матеріалів як маркерів військового забруднення

Енергетичний матеріал	Тип ВР	Розчинність (21°C), мг/л	Токсичність (RfD*), мг/кг/день	Екологічна поведінка та ризики
2,4,6-trinitrotoluene (TNT)	Вторинна	130	0.0005	Висока токсичність; швидко деградує в ґрунтах з високим вмістом органіки.
Cyclotrimethylenetrinitramine (гексоген; RDX)	Вторинна	38.4	0.003	Повільно деградує; легко мігрує до підземних вод і зберігається там тривалий час.
1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazooctane (октоген; HMX)	Вторинна	5-6.63	0.05	Дуже низька швидкість деградації та розчинності; схильний до тривалої персистентності.
Picric acid (пікринова кислота)	Вторинна	12,800	0.002	Екстремальна мобільність через високу розчинність; високий ризик для гідросфери.
Ammonium perchlorate (Перхлорат амонію)	Паливо та піротехніка	200,000	0.007	Надзвичайно рухливий у ґрунтах; швидко досягає підземних вод.
White phosphorus (білий фосфор)	Піротехніка	-	0.00002	Практично не деградує у природному середовищі; надзвичайно висока токсичність.

Примітка: * RfD (Oral Reference Dose) – це пероральна референтна доза - наукова оцінка щоденного впливу на організм людини, який, імовірно, не спричинить помітного ризику шкідливих наслідків протягом усього життя

Примітка: сформовано автором на основі узагальнення теоретичних засад ревіталізації промислових територій та аналізу сучасних стратегій відновлення міського середовища (Seo, 2024; Zapotozka & Zhyrova, 2025; Sakieh et al., 2015; Conflict and Environment Observatory & Norwegian People's Aid, 2025).

Особливу небезпеку становить механічне змішування будівельного сміття (бетону, цегли, залишків ізоляції) із нафтопродуктами та продуктами неповного

згоряння вибухових речовин. Звіт GICHD (Geneva International Centre for Humanitarian Demining, 2021) акцентує увагу на тому, що за наявності нерозірваних енергетичних

матеріалів (зокрема RDX та TNT; табл. 1), механічне переміщення ґрунтових мас при розчищенні завалів може сприяти їхній розчинності та швидкій міграції, що значно ускладнює подальшу ревіталізацію території та потребує впровадження спеціальних бар'єрних рішень.

Кумулятивні ефекти та синергічна деградація змішаного походження

Особливістю досліджуваних об'єктів є виникнення явища синергічної деградації, коли застаріле промислове навантаження браунфілду накладається на імпульсний вплив воєнних дій. Таке поєднання створює стійкі багатокомпонентні суміші, які за своїми властивостями є небезпечнішими, ніж кожен фактор окремо.

Ідентифіковано три основні сценарії кумулятивного впливу на промислові території (Broomandi et al., 2020; Solokha et al., 2024):

1. Прискорення вертикальної міграції токсикантів: Витікання паливно-мастильних матеріалів (ПММ) зі зруйнованих резервуарів та техніки створює умови для солюбілізації важких металів (Pb, Cu, Zn), що містяться у боєприпасах та промислових шламах. Нафтопродукти виступають у ролі органічних розчинників, що значно прискорює проникнення токсичних елементів крізь ґрунтовий профіль до водоносних горизонтів.

2. Мікробіологічна стерилізація та пригнічення саморегенерації: Комбінований вплив енергетичних матеріалів (залишків вибухових речовин типу TNT) та важких металів призводить до різкого зниження мікробної біомаси (у 2.1 рази) та пригнічення мікробіологічних процесів (на 20-30 %). Це практично блокує природну здатність ґрунту до самоочищення, що вимагає впровадження інтенсивних методів біоре mediaції.

3. Формування «техногенних ореолів» при руйнуванні інфраструктури: Механічна деструкція капітальних споруд призводить до вивільнення «законсервованих» промислових небезпек (азбест, ПХБ із трансформаторів), які змішуються з дрібнодисперсними металевими частками боєприпасів. Це створює гетерогенне середовище забруднення, де фізичне переміщення ґрунтових мас при розчищенні завалів лише сприяє розширенню ареалу токсичного впливу.

Таким чином, інтегрована модель ревіталізації повинна враховувати цей «подвійний слід» – промисловий спадок та воєнну деструкцію, що робить традиційні методи рекультивзації недостатніми та потребує розробки гібридних природоорієнтованих стратегій.

3. Обґрунтування природоорієнтованих та біоінженерних рішень для екологічної ремедіації територій зі змішаним типом забруднення

Відповідно до виявлених трендів у світовому науковому просторі (див. рис. 1Б), сучасна парадигма відновлення браунфілдів зміщується від капіталомістких інженерних методів до використання nature-based solutions (NBS). У контексті повоєнного відновлення України, де площі забруднених промислових територій є значними, саме природоорієнтовані рішення дозволяють досягти синергії між очищенням субстрату та відновленням екосистемних послуг ландшафту.

Перспективним інструментом нейтралізації ідентифікованих токсикантів є впровадження природоорієнтованих рішень (NBS). Зокрема, фіторе mediaція забезпечує екстракцію важких металів та стимулює мікробну деградацію органічних енергетичних сполук (TNT, RDX) безпосередньо в кореневій зоні рослин. Для блокування міграції найбільш розчинних речовин, таких як перхлорат амонію та пікринова кислота, обґрунтованим є застосування біовугілля (biochar) як селективного сорбенту. Такий підхід дозволяє стабілізувати забруднювачі в ґрунтовому матриксі, запобігаючи їх вимиванню в підземні води та відновлюючи екосистемні послуги територій.

Технології фіторе mediaції та біосорбції у подоланні «військового сліду»

Враховуючи виявлений спектр токсикантів – важких металів (Pb, Cu, Zn) та залишків енергетичних матеріалів (TNT, RDX) – найбільш ефективним сценарієм є використання гібридних технологій:

- фітоекстракція: Використання рослин-гіперакумуляторів для вилучення важких металів, що утворилися внаслідок корозії корпусів боєприпасів та руйнування промислових об'єктів;

- фітодеградація: Застосування специфічної мікрофлори ризосфери для розкладання залишків вибухових речовин

до нетоксичних сполук, що є критично важливим для зон інтенсивних обстрілів;

- використання біовугілля (biochar): Внесення модифікованих сорбентів дозволяє іммобілізувати рухомі форми металів, запобігаючи їх міграції до підземних вод, що відповідає моделі мінімізації ризиків «Джерело – Шлях – Рецептор».

Роль зеленої інфраструктури у відновленні стійкості урболандшафтів

Створення «зелених коридорів» на базі ревіталізованих браунфілдів виконує функцію просторової стабілізації порушених екосистем. На відміну від традиційної забудови, впровадження NBS забезпечує:

1. Регулюючі послуги: Зниження ефекту «теплого острова» та регулювання зливових стоків на промислових майданчиках з високим ступенем герметизації поверхні.

2. Підтримуючі послуги: Відновлення біорізноманіття та здатності урбоекосистем до саморегенерації після механічних руйнувань.

3. Соціальна інтеграція: Ревіталізовані зони стають центрами соціальної реабілітації міського простору, повертаючи громаді доступ до безпечного довкілля.

Таким чином, перехід до біоінженерних рішень є не лише екологічно доцільним, а й економічно виправданим кроком у стратегії повоєнної реконструкції, що дозволяє інтегрувати деградовані території у сталу екологічну мережу міста.

Інтегрована модель екологічної ревіталізації промислових територій у системі повоєнного відновлення

Підсумковим етапом дослідження є розробка інтегрованої моделі трансформації браунфілдів, яка базується на синергії екологічної безпеки, соціальної реабілітації та економічної доцільності. Модель адаптована до специфічних умов України, де фактори традиційного промислового забруднення посилені наслідками воєнних руйнувань.

На основі логіко-структурного аналізу сформовано чотирифазну модель (рис. 3), яка визначає послідовність етапів відновлення деградованих об'єктів.

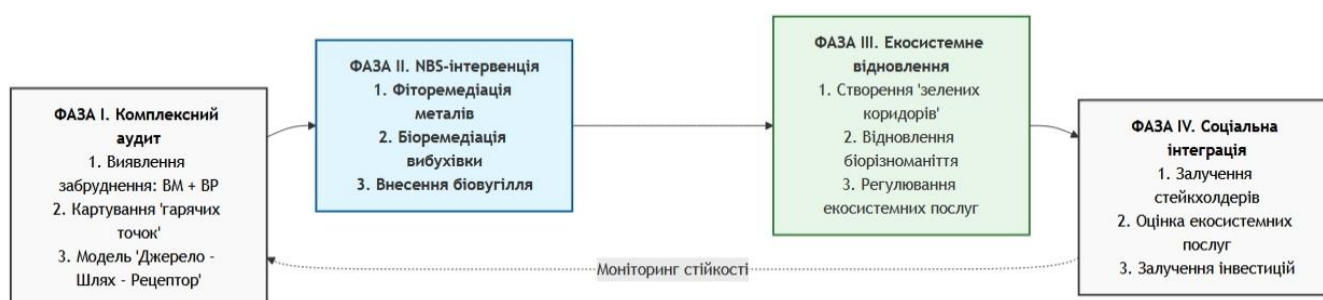


Рис. 3. Алгоритм реалізації моделі ревіталізації

Примітка: сформовано автором за допомогою Mermaid Live Editor.

1. Фаза I. Комплексний аудит та диференціація ризиків:

- проведення моніторингу за моделлю «Джерело – Шлях – Рецептор» для виявлення зон змішаного забруднення (ВМ + енергетичні матеріали);

- картування «гарячих точок» (hot spots) на основі щільності забруднення, що корелює з нашими бібліометричними даними.

2. Фаза II. Вибір стратегії очищення (NBS-інтервенція):

- впровадження гібридних біоінженерних рішень: поєднання

фітореMediaції для іммобілізації металів та мікробної деградації для очищення від залишків вибухових речовин;

- застосування природоорієнтованих бар'єрів для запобігання вторинному забрудненню при розчищенні промислових завалів.

3. Фаза III. Екосистемне відновлення та ландшафтний дизайн:

- трансформація ремедійованого субстрату у функціональні елементи зеленої інфраструктури (парки, рекреаційні зони, «зелені коридори»);

- створення умов для саморегенерації урбоєкосистеми через відновлення біорізноманіття.

4. Фаза IV. Соціально-економічна інтеграція:

- залучення стейкхолдерів до процесу прийняття рішень, що є ключовим трендом згідно з нашим аналізом синього кластера;

- оцінка екосистемних послуг як базису для залучення інвестицій у відновлення громад;

- забезпечення безперервного моніторингу стійкості відновленої урбоєкосистеми для оцінки довгострокової стабільності біосферно-сумісних ландшаф-

тів та верифікації ефективності впроваджених рішень із можливим поверненням до етапу аудиту в разі виявлення нових екологічних ризиків.

Впровадження інтегрованої моделі дозволить не лише мінімізувати екологічні ризики від військового впливу, а й забезпечити довгострокову стійкість міських територій. Використання приватно-публічного партнерства у поєднанні з природоорієнтованими рішеннями робить процес рекультивації та ревіталізації менш енерговитратним та більш адаптивним до кліматичних викликів рис. 4.

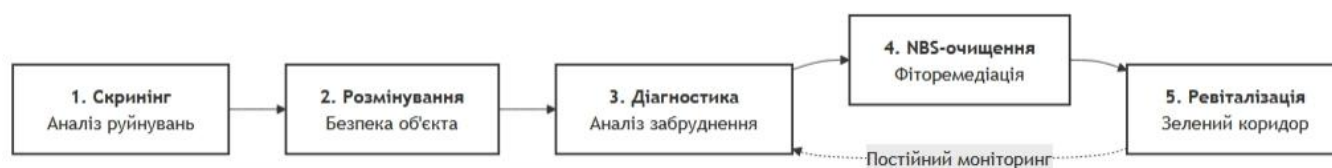


Рис. 4. Алгоритм інтегрованої моделі екологічної ревіталізації промислових територій у повоєнний період

Примітка: сформовано автором за допомогою Mermaid Live Editor.

Реалізація даного алгоритму дозволяє трансформувати деградовані промислові майданчики з «пасивних територій» у активні елементи зеленого каркаса міста. Важливо підкреслити, що кожен етап – від первинного скринінгу до фінального моніторингу – базується на принципах адаптивного менеджменту, що дозволяє коригувати стратегію ревіталізації залежно від динаміки очищення субстрату та стану біотичних компонентів.

Основою запропонованого підходу є адаптація міжнародної моделі оцінки екологічних ризиків «Джерело – Шлях – Рецептор» (Source – Pathway – Receptor, SPR) до умов військового впливу на браунфілди.

Концептуальна модель SPR у контексті дослідження включає:

- джерело (Source): Вибухонебезпечні предмети, нерозірвані боєприпаси та продукти їх детонації (TNT, RDX, важкі метали), що знаходяться у ґрунті або зруйнованих конструкціях;

- шлях (Pathway): Механізми міграції токсикантів через ґрунтові води (солюбілізація), атмосферний перенос (пилове запилення) або прямий контакт із біотою;

- рецептор (Receptor): Кінцеві об'єкти впливу – місцеве населення, підземні водоносні горизонти та міські екосистеми.

На базі цієї моделі було розроблено практичний алгоритм ревіталізації, який дозволяє поетапно розривати зв'язки між джерелом та рецептором (Рис. 4). Зокрема, використання NBS-технологій (фіторемедіації та біосорбції) спрямоване на блокування Шляхів міграції шляхом іммобілізації токсикантів у субстраті, що забезпечує довгострокову безпеку Рецепторів.

Такий підхід забезпечує не лише екологічну безпеку, а й створює передумови для соціально-економічного відродження громад через капіталізацію відновлених екосистемних послуг.

Висновки

За результатами дослідження щодо екологічної ревіталізації промислових територій у контексті повоєнного відновлення України сформульовано такі наукові та практичні положення:

1. Визначено, що особливістю екологічної деградації промислових територій внаслідок воєнних дій є синергія

традиційного техногенного спадку та забруднення в наслідок збройного конфлікту. Встановлено, що ключовими факторами деструкції є механічне пошкодження ґрунтового покриву та надходження специфічних маркерів: важких металів (Sb, Cu, Ni) і персистентних енергетичних матеріалів (TNT, RDX).

2. Ідентифіковано ефективні природоорієнтовані рішення, серед яких найбільш перспективними для ремедіації змішаного забруднення є гібридні біоінженерні технології. Обґрунтовано використання фітоекстракції для вилучення металів та мікробної деградації для розщеплення залишків вибухових речовин, а також застосування біовугілля як сорбенту для іммобілізації мобільних токсикантів у субстраті.

3. Досліджено роль екосистемних послуг та зеленої інфраструктури, які

виступають стабілізуючими факторами через відновлення біорізноманіття та регулювання гідрологічного режиму порушених ландшафтів. Доведено, що створення «зелених коридорів» на базі ревіталізованих браунфілдів підвищує кліматичну стійкість урбоекосистем та забезпечує їхню здатність до саморегенерації.

4. Розроблено інтегровану модель екологічної ревіталізації, яка базується на покроковому алгоритмі: від комплексного аудиту та диференціації ризиків за моделлю SPR до фінальної ландшафтною інтеграції. Модель адаптована до стратегічних пріоритетів України та передбачає залучення приватно-публічного партнерства для соціальної реабілітації міського простору та повернення деградованих територій у безпечний економічний обіг.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Всі дані використані в статті доступні у цитованих літературних джерелах, нові дані не створювалися / All data used in the article are available in the cited literature sources; no new data were created.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів / The author declares no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Під час підготовки цього рукопису автор використовував Google Gemini для формування коду Mermaid syntax для створення блок-схем у Mermaid Live Editor. Після застосування цього інструменту автор ретельно переглянув та відредагував вміст і несе повну відповідальність за остаточну опубліковану версію / While preparing this manuscript, the author used Google Gemini to generate Mermaid syntax code for creating flowcharts in the Mermaid Live Editor. After using this tool, the author carefully reviewed and edited the content and takes full responsibility for the final published version.

References

- Artmann, M., & Sartison, K. (2018). The role of urban agriculture as a nature-based solution: A review for developing a systemic assessment framework. *Sustainability*, 10(6), 1937. <https://doi.org/10.3390/su10061937>
- Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Sustainability*, 12(21), 9002. <https://doi.org/10.3390/su12219002>
- Chen, B., & Hashimoto, S. (2025). Integrate brownfield greening into urban planning. *Urban Forestry & Urban Greening*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128642>
- Conflict and Environment Observatory (CEOBS), & Norwegian People's Aid (NPA). (2025). *Assessing environmental degradation from explosive weapons in southern Ukraine: Snihurivka and Chornobaivka hromadas: Joint report.* https://ceobs.org/wp-content/uploads/2025/01/NPA-CEOBS_2025_Assessing_environmental_degradation_explosive_weapons_southern_Ukraine.pdf
- Douglas, I. (2012). Urban ecology and urban ecosystems: Understanding the links to human health and well-being. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(4), 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.07.005>
- Fomenko, O. O., Danylov, S. M., & Blinova, M. Y. (2025). Symbiosis of architecture and environment: Problems and concepts. *Scientific Bulletin of Construction*, (112), 15–22. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.15> (in Ukrainian)
Фоменко О. О., Данилов С. М., Блінова М. Ю. Симбіоз архітектури і навколишнього середовища: проблеми і концепції. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 112. С. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.15>
- Franz, M., Pahlen, G., Nathanail, P., Okuniek, N., & Koj, A. (2006). Sustainable development and brownfield regeneration: What defines the quality of derelict land recycling? *Environmental Sciences*, 3(2), 135–151. <https://doi.org/10.1080/15693430600800873>
- Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD). (2021). *Explosive ordnance pollution of the environment: Guide.* https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Media/GICHD-resources/rec-documents/EO_Pollution_of_the_Environment_v17_web_01.pdf
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Hnatiuk, L. R., & Melnyk, M. V. (2019). Revitalization of industrial objects on the example of Kyiv. *Design Theory and Practice*, 1(16), 52–67. <https://doi.org/10.18372/2415-8151.16.14330> (in Ukrainian)
Гнатюк Л. Р., Мельник М. В. Ревіталізація промислових об'єктів на прикладі м. Київ. *Теорія і практика дизайну*. 2019. Вип. 1(16). С. 52–67. DOI: <https://doi.org/10.18372/2415-8151.16.14330>
- Hou, D., Al-Tabbaa, A., Chen, H., & Mamic, I. (2023). Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 253–269. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00404-1>

Osypenko, K., & Tarabanova, Y. (2021). Ecological aspects of the revitalization of abandoned industrial areas on the example of the urban space of post-socialist Kyiv. *Urban Planning and Territorial Planning*, (78), 404–413. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.404-413> (in Ukrainian)

Осипенко К., Тарабанова Ю. Екологічні аспекти ревіталізації занедбаних промислових територій на прикладі міського простору постсоціалістичного Києва. *Містобудування та територіальне планування*. 2021. Вип. 78. С. 404–413. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.404-413>

Plamenytska, O. A., Hnatiuk, L. R., & Humeniuk, I. I. (2019). Methodological approaches to revitalization and renovation of historical buildings (analysis of experience). *Design Theory and Practice*, (19), 138–151. <https://doi.org/10.18372/2415-8151.19.14371> (in Ukrainian)

Пламєницька О. А., Гнатюк Л. Р., Гуменюк І. І. Методичні підходи до ревіталізації та реновації історичних будівель (аналіз досвіду). *Теорія і практика дизайну*. 2019. Вип. 19. С. 138–151. DOI: <https://doi.org/10.18372/2415-8151.19.14371>

Rakoid, O. O., & Bogoliubov, V. M. (2021). *Strategy of sustainable development of nature and society* (2nd ed.). NUBIP. (in Ukrainian)

Ракоїд О. О., Боголюбов В. М. Стратегія сталого розвитку природи і суспільства : підручник. 2-ге вид., переробл. Київ : НУБіП України, 2021. 319 с.

Rashkevich, N. V., Krasnov, V. A. & Huz, A. S. Procedures for Geospatial Profiling of Territories with Potential Radiation Contamination as a Result of Rocket and Artillery Strikes. *KhNAHU Bulletin*, 111. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.158> (in Ukrainian)

Рашкевич Н. В., Краснов В. А., Гузь А. С. Процедури геопросторового профілювання території можливого радіаційного забруднення внаслідок ракетно-артилерійських уражень. Вісник ХНАДУ, вип. 111, 2025. С. 158-165. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.158>

Sakieh, Y., Amiri, B. J., Danekar, A., et al. (2015). Scenario-based evaluation of urban development sustainability: An integrative modeling approach to compromise between urbanization suitability index and landscape pattern. *Environmental Development and Sustainability*, 17, 1343–1365. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9609-7>

Seo, K. H. (2024). Urban resilience through design: Sustainable redevelopment of brownfield sites. *JEES*, 7(1). <https://doi.org/10.30564/jees.v7i1.7309>

Solokha, M.; Demyanyuk, O.; Symochko, L.; Mazur, S.; Vynokurova, N.; Sementsova, K.; Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>

Zapotozka, V., & Zhyrova, Y. (2025). Revitalization of industrial territories: The experience of the city of Kyiv in restoring the urban environment. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography*, 3/4, 14–24. <https://doi.org/10.17721/1728-2721.2024.90-91.2>

Zheng, B., & Masrabaye, F. (2023). Sustainable brownfield redevelopment and planning: Bibliometric and visual analysis. *Heliyon*, 9(2), e13504. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13280>

Ви можете цитувати цю статтю так:

Душкін С. Екологічні аспекти ревіталізації деградованих промислових зон у структурі сучасного міста. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 241-254.

DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.17>

Cite this article in APA style as:

Dushkin, S. (2026). Ekolohichni aspekty revitalizatsii dehradovanykh promyslovykh zon u strukturi suchasnoho mista [Ecological aspects of revitalising degraded industrial areas in the structure of a modern city]. *Biota. Human. Technology*, (2), 241-254. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.17> (in Ukrainian)

Information about the author:

Dushkin S. [in Ukrainian: **Душкін С.**], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, email: dushkin@khadi.kharkov.ua
ORCID: 0000-0002-9345-9632 *Scopus-Author ID*: 57209021455 *ResearcherID*: AAK-8407-2020
Department of Ecology, Road-Building Faculty, Kharkiv National Automobile and Highway University
25, Yaroslav Mudryi Street, Kharkiv, 61002, Ukraine