

РЕКУЛЬТИВАЦІЯ ТА ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ У СИСТЕМІ ЛАНДШАФТНО-ЕКОЛОГІЧНОЇ РЕАБІЛІТАЦІЇ ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Зеленчук І.Д., Сонько С.П.

Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань
zelenchuk.id@gmail.com

У статті представлено інтегрований підхід до рекультивації та фітореємедіації техногенно трансформованих територій, спрямований на відновлення структурно-функціональної організації антропогенно змінених ландшафтів. Проаналізовано комплексні наслідки будівельної та гірничодобувної діяльності, що проявляються у трансформації ґрунтового покриву та морфоскульптури рельєфу, зміні водного режиму і дестабілізації біогеохімічних циклів. Встановлено, що техногенно змінені території характеризуються критичним ослабленням механізмів природної саморегуляції, та суттєвим уповільненням процесів автогенного сингенезу, що зумовлює формування екологічно нестійких, деградованих техногенних систем.

У роботі рекультивацію розглянуто як складний багатостадійний процес, що включає підготовчий, технічний і біологічний етапи, які є функціонально та ієрархічно пов'язані між собою. Доведено, що саме біологічний етап є визначальним для досягнення довготривалої екологічної стабільності, оскільки забезпечує ініціацію первинного педогенезу, формування стійкого фітоценотичного покриву, активізацію біогеохімічного кругообігу речовин і поступове відновлення функціональних зв'язків між компонентами ландшафту. Обґрунтовано, що фітореємедіація є не лише локальною технологією очищення ґрунтів, а складовою системного відновлення трансформованих ландшафтів. Її інтеграція у біологічний етап рекультивації сприяє зниженню міграційної активності токсичних елементів, обмеженню їх біодоступності, стабілізації поверхні техноземів і відновленню екологічних функцій едафотопу.

Узагальнено науково-практичні результати, які можуть бути використані під час розроблення проектів комплексної рекультивації, у системах екологічного моніторингу та у практиці просторового планування. Запропоновано алгоритм обґрунтування напрямів подальшого використання рекультивованих територій з урахуванням їх ландшафтного положення, морфології поверхні та фізико-хімічних властивостей техногенних субстратів. Окрему увагу приділено ефективності відновлення функціональних зв'язків у геосистемах у посттехногенний період їх розвитку. *Ключові слова:* техногенні ландшафти, техноземи, ландшафтно-екологічна реабілітація, родючий шар ґрунту (РШГ).

Reclamation and phytoremediation in landscape-ecological rehabilitation of anthropogenically transformed landscapes. Zelenchuk I., Sonko S.

This study presents an integrated approach to the reclamation and phytoremediation of technogenically transformed territories aimed at restoring the structural and functional organization of anthropogenically altered landscapes. The complex impacts of construction and mining activities are analyzed, including transformation of the soil cover and relief morphology, changes in the hydrological regime, and destabilization of biogeochemical cycles. It is shown that technogenically altered areas are characterized by a critical weakening of natural self-regulation mechanisms and a significant slowdown of autogenic succession, which leads to the formation of ecologically unstable and degraded technogenic systems.

Reclamation is considered as a complex multi-stage process that includes preparatory, technical, and biological stages, which are functionally and hierarchically interconnected. The biological stage is shown to be a key stage for achieving long-term ecological stability, as it ensures the initiation of primary soil formation, the development of stable vegetation cover, the activation of biogeochemical cycling, and the restoration of functional relationships between landscape components. Phytoremediation is considered not only as a local soil treatment technology but also as a component of the systemic restoration of transformed landscapes. Its integration into the biological stage of reclamation contributes to reducing the mobility of toxic elements, limiting their bioavailability, stabilizing the surface of technosols, and restoring the ecological functions of the edaphotope.

The results can be used in the development of comprehensive reclamation projects, environmental monitoring systems, and spatial planning practices. An algorithm for substantiating the directions of further use of reclaimed territories is proposed, taking into account their landscape position, surface morphology, and physicochemical properties of technogenic substrates. The effectiveness of restoring functional relationships within geosystems during the post-technogenic stage of their development is demonstrated. *Key words:* technogenic landscapes, technosols, landscape-ecological rehabilitation, topsoil.

Постановка проблеми. Просторові перетворення ландшафтів унаслідок індустріального освоєння територій, розвитку гірничодобувної галузі та масштабного техногенного впливу будівельно-монтажних робіт (БМР) супроводжуються фрагментацією природних комплексів, зміною напрямів міграції речовини та енергії й порушенням функціональних зв'язків між компонентами геосистем.



Такі трансформації супроводжуються формуванням антропогенних морфоскульптур і специфічних субстратів, у межах яких природні механізми саморегуляції істотно послаблюються або втрачаються. У результаті виникають ландшафтні системи з порушеними сукцесійними процесами та нестійкими екологічними режимами, що визначає необхідність цілеспрямованого відновлення їх структурно-функціональних зв'язків. Сукцесія (від лат. *successio* – спадкоємність) розглядається як послідовний і незворотний процес зміни біоценозів, що відбувається на певній території внаслідок дії природних або антропогенних чинників [1, 2].

Техногенно трансформовані території (постгірничі ландшафти, промислові майданчики, відвали, хвостосховища, зони будівельного переформування рельєфу) характеризуються не лише зміною морфології, а й утворенням специфічних ґрунтових тіл – техноземів. З позицій сучасної ландшафтної екології техногенні ландшафти розглядаються як системи зі зміненими механізмами функціонування, у яких порушується баланс між живими та інертними компонентами. Ці ландшафти часто набувають рис «нових екосистем», що формуються під поєднаним впливом природних і антропогенних чинників та розвиваються за незворотними альтернативними траєкторіями [3].

Дослідження результатів біологічного етапу рекультивації показали, що довготривала стабільність відновлених територій досягається лише за умов відновлення ґрунтових процесів, біогеохімічних циклів і біотичних взаємодій, які визначають самопідтримуваний розвиток екосистем. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях дедалі більше пріоритетуються природоорієнтовані підходи до відновлення, зокрема фітореємедіація, що базується на використанні рослин для стабілізації, трансформації або вилучення забруднювачів із ґрунтового середовища [4]. Застосування рослин-акумуляторів сприяє зниженню міграційної активності токсичних елементів, активізації ґрунтових мікробіологічних процесів і поступовому відновленню екологічних функцій техногенних територій. Водночас ефективність таких заходів значною мірою залежить від ландшафтного положення ділянок, морфології поверхні та просторової організації геосистем.

Попри значну кількість досліджень рекультивації та фітореємедіації, їх здебільшого розглядають як окремі технологічні напрями, натомість питання їх інтеграції в межах єдиної системи ландшафтно-екологічної реєабілітації залишаються недостатньо розробленими [5]. За цих умов метою відновлення стає не відтворення первісного стану природного середовища, а досягнення екологічної стабільності, відновлення екосистемних функцій та мінімізація екологічних ризиків.

Для України додаткової актуальності набуває потреба у методиках, які поєднують ландшафтно-е-

кологічний аналіз із застосуванням технологій фітореємедіації та довготривалим моніторингом змін бєлігеративних ландшафтєв, що характеризуються підвищеним рівнем екологічних ризиків.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена зростанням площ техногенно трансформованих територій, що формуються внаслідок інтенсивного будівництва в умовах релокації промислових, виробничих і складських потужностей у відносно безпечні регіони України. Особливої актуальності цій тематиці додає динамічна розбудова інженерних мереж, необхідних для забезпечення функціонування релокованих виробничих об'єктів. Інтенсифікація будівельної діяльності призводить до вилучення під забудову значних земельних площ, формування техногенних поверхонь та концентрації антропогенного навантаження в межах раніше відносно стабільних природних ландшафтєв, що супроводжується зміною їх структурно-функціональної організації [6]. За цих умов рекультивація, інтегрована з фітореємедіаційними заходами, розглядається як інструмент екологічної реєабілітації, спрямований на відновлення ґрунтових функцій, зниження міграційної активності забруднювачів та відновлення взаємодії інертних і живих компонентів геосистем [4, 7, 8].

Відновлення техногенно трансформованих земель у сучасній науковій парадигмі пов'язується з інтеграцією екологічних, біологічних і географічних аспектів, оскільки ґрунти техногенного генезису часто характеризуються накопиченням сполук фтору, цинку, кобальту, арсену, інших важких металів і радіонуклідів, що становить ризик для здоров'я населення та функціонування біоценозів [6, 7]. У ландшафтно-екологічному вимірі відновлення техногенних територій повинно забезпечувати реконструкцію структурно-функціональної організації геосистем, зокрема нормалізацію ґрунтових процесів, стабілізацію біогеохімічних циклів і відновлення порушених зв'язків між компонентами ландшафту [2, 4].

У міжнародних програмах сталого розвитку та екологічної безпеки проблема реєабілітації техногенних екосистем розглядається як складова глобальних ініціатив зі зменшення антропогенного впливу на довкілля та відновлення порушених територій [9]. Саме тому, актуальність дослідження полягає у науковому обґрунтуванні інтеграції рекультиваційних і фітореємедіаційних заходів з метою формування цілісної моделі реєабілітації техногенно трансформованих територій, яка поєднує відновлення біопродуктивності, зниження екологічних ризиків та гармонізацію техногенних ландшафтєв у структурі екологічно стабільного простору.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із сучасними науковими завданнями ландшафтної екології та гео-

екології, зокрема з концепцією нейтрального рівня деградації земель Land Degradation Neutrality (LDN), у межах цілі SDG 15.3. Ця концепція спрямована на запобігання втраті біопродуктивності ґрунтового покриву, забезпечення збалансованого управління земельними ресурсами задля забезпечення продовольчої безпеки та пом'якшення наслідків зміни клімату [9].

Одним із ключових пріоритетів є стратегічне завдання до 2030 року зупинити втрату продуктивних земель і відновити деградовані території, що передбачає нормалізацію ґрунтових процесів, зниження міграційної активності токсикантів, відновлення біогеохімічних циклів для досягнення їх довготривалої функціональної стійкості. Представлена робота спрямована на поглиблення уявлень про механізми взаємодії між компонентами техногенно трансформованих ландшафтів і формування науково обґрунтованих підходів до їх відновлення.

Узагальнюючи викладене, результати дослідження співвідносяться з науковими та прикладними завданнями рекультивувати деградовані землі і забезпечення екологічної стійкості територій, поєднуючи підходи ландшафтно-екології, геоелекології та просторового планування. Отримані результати формують теоретико-методичне підґрунтя для оцінювання змін структурно-функціональної організації територіальних комплексів і розроблення природоорієнтованих заходів щодо відновлення техногенно трансформованих ландшафтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Рекультивувати та фітореємедіація порушених земель і відновлення їх продуктивності розглядаються у сучасній науковій літературі як багаторівнева проблема відновлення функцій геосистем, що виходить за межі суто інженерної стабілізації поверхні. Незважаючи на значний обсяг наукових праць, присвячених цій проблематиці, у науковій літературі досі не сформовано єдиного підходу до трактування сутності рекультивувальних процесів, методів і способів виконання рекультивувальних робіт. У практиці природокористування, зокрема в Україні, рекультивувальні заходи часто розглядаються переважно з позицій технічного відновлення територій, що передбачає інженерну підготовку, вирівнювання поверхні порушених земель та подальше формування нових техногенних ландшафтів. У дослідженні [4] автор детально аналізує сутність технічного та біологічного етапів рекультивувальних процесів, приділяючи особливу увагу методологічним аспектам проведення рекультивувальних робіт на порушених землях, які формуються внаслідок будівництва інженерних трубопровідних мереж.

Одним із фундаторів теоретичних засад у галузі рекультивувальних порушених земель є професор, ґрунтознавець, доктор сільськогосподарських наук Р. М. Панас. У своїй фундаментальній праці [10] учений системно викладає науково-теоретичні основи

рекультивувальних процесів, розкриває сутність та зміст гірничо-технічного і біологічного етапів відновлення порушених земель, а також обґрунтовує принципи виконання рекультивувальних заходів для різних видів техногенно трансформованих територій спрямованих на формування стійких антропогенних ландшафтних систем.

Теоретичну основу цього дослідження становлять праці доктора географічних наук Є. А. Іванова, присвячені прикладним аспектам рекультивувальних земель, порушених гірничодобувною діяльністю. У зазначених публікаціях автором проаналізовано геоелекологічні наслідки видобування і збагачення корисних копалин, а також систематизовано досвід рекультивувальних порушених земель у різних гірничих регіонах [11, 12].

Важливим для нашого дослідження є окремий напрям наукових досліджень, пов'язаний із застосуванням біологічних методів відновлення порушених земель, зокрема фітореємедіації та фітореємедіації. Вагомий внесок у цю галузь зробив український професор М. М. Харитонов. У своїх працях учений аналізує фітореємедіаційні властивості рослин, здатних зростати на техногенних субстратах, та обґрунтовує, що використання природних видів рослин сприяє поліпшенню фізико-хімічних властивостей ґрунтів і формуванню стійких екосистем на рекультивованих територіях [13].

Науковою основою дослідження є праці інших українських дослідників проблем фітореємедіації техногенно забруднених ґрунтів [14], у яких висвітлено особливості антропогенної трансформації ґрунтового покриву під впливом важких металів, пестицидів та нафтопродуктів. Автори проаналізували можливості використання енергетичних культур як ефективного засобу фітореємедіації, що сприяє відновленню деградованих ґрунтів і підвищенню їх агрономічної цінності.

Суттєвий внесок у формування сучасної наукової концепції фітореємедіації зробили американські вчені D. E. Salt, R. D. Smith та I. Raskin, у працях яких було закладено теоретичні та методологічні основи використання рослин для очищення забруднених ґрунтів [15]. У роботі доведено здатність окремих видів рослин акумулювати значні концентрації токсичних елементів, що обґрунтовує доцільність фітореємедіації як перспективного екологічного підходу до відновлення техногенно забруднених ґрунтів і вод на основі фізіолого-біохімічних механізмів поглинання, накопичення та трансформації поллютантів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У цій статті продовжується пошук можливих варіантів розв'язання задачі відновлення зв'язків між інертними та живими компонентами ландшафту, порушених у результаті будівельної діяльності.

Попередні дослідження автора та його наукового керівника дали змогу окреслити головні напрями

впливу будівельної діяльності на ландшафтні системи, серед яких найбільш істотними є механічне переміщення та ущільнення ґрунтів, трансформація морфоскульптури рельєфу, зміна водного режиму, а також фрагментація природних екосистем [16]. Разом із тим, у сучасній літературі ці процеси переважно досліджуються ізольовано, у межах окремих підходів та дисциплін, тоді як питання відновлення взаємодії між компонентами ландшафту залишаються малодослідженими. Аналіз сучасних наукових досліджень з рекультивациі свідчить, що основний акцент у них зроблено на технічних і гірничотехнічних етапах відновлення порушених земель, а саме на плануванні поверхні, переміщенні непридатних субстратів, створенні техноземів, однак на важливості належного виконання біологічного етапу рекультивациі акценти не ставляться [11, 12]. Такий підхід є методично виправданим на початкових стадіях рекультивациі, однак він не забезпечує повного розкриття питання відновлення внутрішніх зв'язків між літогенною основою, ґрунтовим покривом, рослинністю та супутніми біотичними компонентами. Водночас в основоположних працях присвячених рекультивациі наголошено на необхідності поєднання технічного і біологічного етапів, але проблема аналітичної оцінки результатів їхнього спільного впливу на відновлення ландшафтно-цілісності все ще залишається недостатньо дослідженою та проаналізованою.

Не менш показовою є ситуація у сфері фітореємедіації. У фундаментальних і сучасних дослідженнях цей напрям обґрунтовується як ефективний спосіб зниження токсичного навантаження на ґрунти за рахунок використання рослин та асоційованих із ними мікроорганізмів. У науковій літературі достатньо ґрунтовно розкрито механізми фітоекстракції, фітостабілізації, ризофільтрації, фітодеградації та фітовипаровування, а також показано залежність їх ефективності від типу забруднювача, біологічних властивостей рослин і фізико-хімічного стану субстрату. Водночас переважна більшість таких робіт зосереджена на фізіолого-біохімічних або агроекологічних аспектах процесу, тоді як ландшафтно-екологічний ефект фітореємедіації, тобто її роль у відновленні порушених зв'язків між інертними й живими компонентами ландшафту, висвітлено в значно меншому обсязі. Відповідно, фітореємедіація часто розглядається як самодостатня технологія очищення середовища, а не як складова ширшої системи екологічної реабілітації ландшафту [14, 15].

У межах виконання цього дослідження уточнено зміст поняття фітореємедіації. Під *фітореємедіацією* у роботі розуміється науково обґрунтована система біотехнологічних заходів, що базується на використанні рослин для вилучення, акумулювання, трансформації або стабілізації токсичних речовин у ґрунтах.

Підсумовуючи, зауважимо, що наявні дослідження створили важливу теоретичну й прикладну основу для розуміння окремих проявів деградації природних ландшафтів та механізмів їх подолання, проте питання відновлення порушених зв'язків між інертними і живими компонентами ландшафту як єдиної функціональної системи залишається недостатньо розробленим. Саме на розв'язання цієї наукової проблеми й спрямовано означену статтю.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні ефективності поєднання рекультивацийних і фітореємедіаційних заходів для відновлення функціональних зв'язків між інертними та живими компонентами техногенно трансформованих ландшафтів. У роботі показано визначну роль біологічного етапу рекультивациі у стабілізації техноземів та відновленні ґрунтових процесів, які сприяють формуванню рослинного покриву й активізації біогеохімічних циклів у межах техногенно змінених ландшафтів.

Обґрунтовано доцільність застосування фітореємедіаційних технологій як складової ландшафтно-екологічної реабілітації територій, порушених будівельною діяльністю.

Подальшого розвитку набули наукові підходи до трактування фітореємедіації як системного інструменту регенерації техногенно трансформованих ландшафтів, а не лише як локальної технології очищення ґрунтів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає в уточненні наукових уявлень про відновлення територій, змінених будівельним впливом, та про значення взаємодії інертних і живих компонентів ландшафту у цьому процесі. У роботі показано, що результати рекультивациі та фітореємедіації доцільно інтерпретувати не лише як технічне відновлення поверхні або формування техноземів, а як процес відновлення взаємодії літогенної основи, ґрунтового покриву та рослинності.

Загальнонаукове значення роботи полягає у конкретизації уявлень про механізми стабілізації ландшафтів, трансформованих будівельною діяльністю. Це дозволяє розглядати рекультивацийні та фітореємедіаційні заходи як інтегровані процеси, спрямовані на відновлення геосистем у контексті поновлення структурно-функціональної організації зміненого ландшафту.

Виклад основного матеріалу. Будівельна діяльність, навіть за умов дотримання високих екологічних вимог і використання інноваційних технологій, супроводжується трансформацією природних компонентів ландшафту та формуванням техногенно змінених ландшафтних комплексів. Особливо це характерно для промислового та інфраструктурного будівництва, де застосування швидкокомтованих будівель із залізобетонними каркасами та прокладання значної кількості підземних інженерних

комунікацій супроводжується значними обсягами земляних робіт. У процесі таких робіт відбуваються зміни літогенної основи, порушується морфологічна скульптура рельєфу, трансформується ґрунтовий покрив, змінюється водний режим території, а також зазнають впливу повітряне середовище та біотичні компоненти ландшафту.

В Україні земельні ресурси належать до найбільш цінних компонентів природного середовища, однак проблема відновлення порушених земель досі залишається недостатньо вирішеною. У багатьох випадках рекультивацийні заходи здійснюються в обмеженому обсязі або через брак фінансових ресурсів реалізуються лише частково, що призводить до втрати родючого шару ґрунту та виведення значних площ земель із господарського використання. Відповідно до ст. 1 Закону України «Про охорону земель» рекультивациї підлягають усі землі, у межах яких у результаті гірничодобувних, будівельних, гідротехнічних, інженерних та інших видів робіт відбулися зміни структури рельєфу, ґрунтового покриву або водного режиму [17].

Відповідно до Земельного кодексу України, рекультивация порушених земель визначається як комплекс організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель [18]. До складу біотехнологічних заходів належать біологічні та біогеохімічні способи відновлення ґрунтового середовища, а також методи ремедіації, що базуються на використанні живих організмів або продуктів їх життєдіяльності з метою відновлення ґрунтових процесів, зниження токсичності субстрату та формування рослинного покриву.

Тема рекультивациї порушених земель та регенерації ґрунтового покриву посідає важливе місце

в сучасних дослідженнях раціонального використання природних ресурсів. Особливе значення ця проблематика набуває у зв'язку з необхідністю ревіталізації продуктивних властивостей земель, які зазнали змін унаслідок інтенсивного будівельно-індустріального освоєння [19]. У сучасних зарубіжних екологічних дослідженнях зазначені процеси розглядаються в межах концепції екологічного відтворення (ecological restoration), яка передбачає комплексне відновлення екосистемних функцій, структури середовища та здатності біогеоценозів підтримувати природні процеси [20]. Окрім того зарубіжні учені довели існування специфічної групи представників флори –гіперакумуляторів важких металів. До цієї категорії належать рослини, що характеризуються високою толерантністю до екстремальних концентрацій важких металів у субстраті та здатністю до інтенсивної біоаккумуляції цих елементів у вегетативній масі без проявів морфологічних чи фізіологічних ознак фітотоксичності. У цьому контексті відновлення деградованих територій інтерпретується не як повне повернення до первісного стану, а як формування стабільних ландшафтних систем, здатних функціонувати в змінених природно-техногенних умовах.

До об'єктів рекультивациї належать земельні ділянки, що вилучаються у тимчасове користування для облаштування будівельних майданчиків, прокладання інженерних комунікацій або здійснення іншої господарської діяльності, пов'язаної з механічною деструкцією ґрунтового покриву. Типова технологічна схема зняття та тимчасового складування РШГ під час виконання земляних робіт представлена на рис. 1. Одним із основних технологічних прийомів рекультивациї є використання РШГ, що вилучається під час виконання будівельних та інших видів робіт. Такий ґрунт застосовується для нанесення на

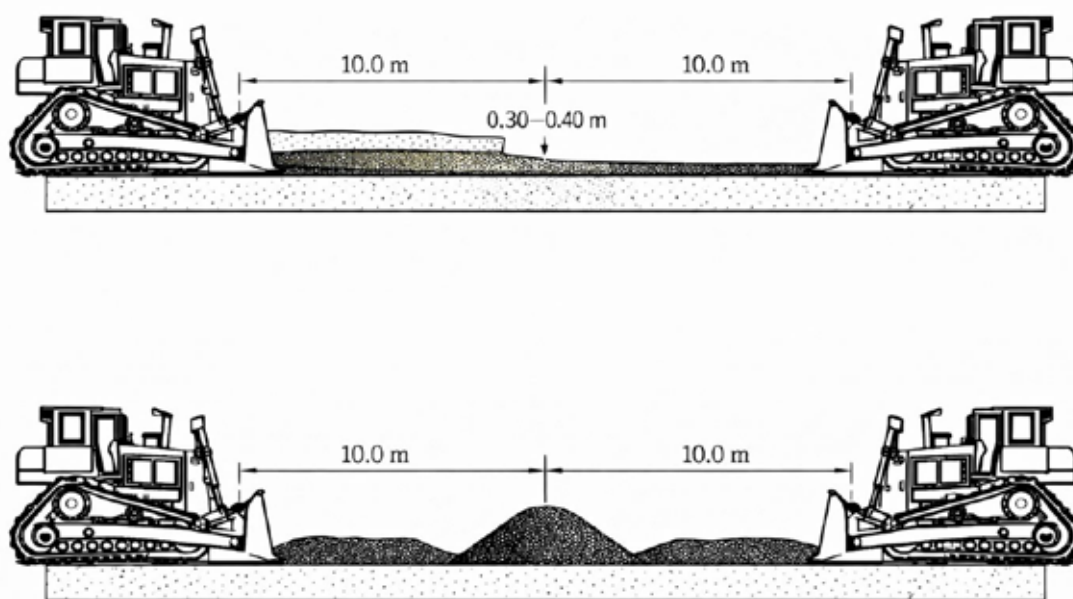


Рис. 1. Технологічна схема зняття та тимчасового складування родючого шару ґрунту (РШГ) [4]

малопродуктивні або позбавлені ґрунтового покриву ділянки, що забезпечує формування сприятливих умов для подальшого відновлення їх екологічних і господарських функцій.

Розрізняють три етапи рекультивації: підготовчий, технічний та біологічний. Ефективність рекультивації значною мірою визначається послідовністю виконання її етапів та їх функціональною взаємопов'язаністю у процесі відновлення порушених ландшафтів. У цьому контексті доцільно розглядати рекультивацію як багатостадійний процес, що охоплює підготовчий, технічний і біологічний етапи. Систематизовану авторську характеристику зазначених етапів, їх функціональне призначення, основні заходи та критерії оцінювання ефективності рекультивації узагальнено у табл. 1.

Для розроблення проєкту рекультиваційних заходів необхідні такі вихідні дані:

- нормативно-правова база, зокрема чинне земельне та лісове законодавство України;
- галузеві нормативи відведення територій під будівництво об'єктів інфраструктури та інженерних мереж;
- результати комплексних інженерно-екологічних та геодезичних вишукувань;
- схеми монтажу повітряних ліній та підземних інженерних мереж;
- проєкт виконання робіт.

Технічний етап рекультивації. Узагальнений алгоритм технічного етапу відновлення порушених земель передбачає такі основні операції:

- вилучення родючого шару ґрунту (РШГ) з усієї смуги виконання робіт та його транспортування до місць тимчасового зберігання (буртів), рис. 1;
- геометричне планування рекультиваційної смуги, що включає нівелювання мікрорельєфу, засипку будівельних понижень та виїмок, рис. 2;
- прибирання території від залишків будівельних матеріалів та відходів;

– повернення РШГ на підготовлену поверхню, фінішне планування та облаштування систем водовідведення, дренажування.

Біологічний етап рекультивації з фіторемедіаційними заходами. Біологічний етап рекультивації спрямований на відновлення родючості порушених земель і реалізується після завершення технічної рекультивації. Його основним завданням є створення умов для відновлення ґрунтоутворних процесів, стабілізації рослинного покриву та поступового відновлення функціонально-обмінних властивостей ґрунту, що забезпечує формування стійкого біогеоценозу. На цьому етапі здійснюється комплекс агро-технічних, меліоративних і ремедіаційних заходів, спрямованих на зниження вмісту токсичних елементів у ґрунті, відновлення продуктивного потенціалу ґрунтів і забезпечення можливості подальшого господарського використання рекультивованих земель.

Важливим складником біологічної рекультивації є фіторемедіаційні заходи, що передбачають використання рослин-аккумуляторів, здатних вилучати, трансформувати або стабілізувати забруднювальні речовини у ґрунтового середовищі, сприяючи зниженню рівня техногенного забруднення та відновленню екологічних функцій ґрунтів. Основні методи фіторемедіації забруднених ґрунтів та їх характеристики узагальнено у табл. 2.

Як уже було зазначено, методи фіторемедіації є складовою біологічного етапу рекультивації порушених земель, зокрема промислових і будівельних майданчиків, земель відведених під прокладання інженерних комунікацій, а також територій, забруднених унаслідок бойових дій. Для реалізації фіторемедіаційних заходів в Україні, доцільно використовувати рослини, адаптовані до природно-кліматичних умов території та здатні до акумуляції або трансформувати забруднювачів.

Для очищення водного середовища застосовують очерет (*Phragmites australis*), та погіз (*Typha latifolia*).

Таблиця 1.

Етапи рекультивації порушених земель та їх наукова характеристика

Етап рекультивації	Екологічний результат етапу	Критерії оцінювання ефективності
<i>Підготовчий:</i> діагностика ступеня порушення земель, аналіз рельєфу, ґрунтових і гідрологічних умов, оцінка придатності техногенних субстратів до біологічної рекультивації, визначення напрямку та технології рекультивації	Визначення напрямку рекультивації, розроблення проєкту відновлення порушеної території	Відповідність проєктних рішень нормативним вимогам
<i>Технічний:</i> планування поверхні, формування укосів, зняття, складування та повернення родючого шару ґрунту, виконання дренажних, протиерозійних та інших інженерно-захисних робіт	Сформовано стабільний техногенний рельєф і субстратний покрив, придатний для біологічного оновлення.	Стійкість рельєфу, наявність шару ґрунту придатного для укорінення рослин та фіторемедіації
<i>Біологічний:</i> формування рослинного покриву, внесення органічних і мінеральних добрив; посів трав, фіторемедіаційні заходи, оптимізація видового складу рослинності	Відновлення ґрунтових процесів, формування стійкого біогеоценозу	Стабілізація біогеохімічних циклів, відновлення взаємозв'язків між компонентами ландшафту

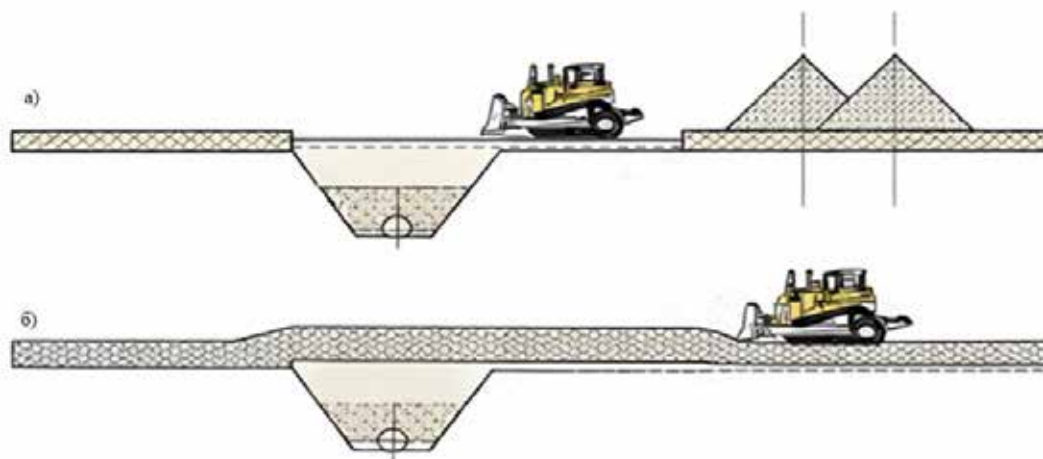


Рис. 2. Послідовність технічної рекультивациі земель після прокладання інженерних комунікацій [4].

а – порушений ґрунтовий профіль після виконання БМР; б – відновлений ґрунтовий профіль після засипання траншеї, повернення РШГ та планування поверхні.

Таблиця 2.

Основні механізми фітореMediaції забруднених ґрунтів та приклади рослин-гіперакумуляторів [21]

Метод фітореMediaції та його характеристика
<p>Фітостабілізація: Полягає в іммобілізації токсичних елементів у ґрунтовому середовищі шляхом їх сорбції кореневою системою рослин та фіксації у ризосфері. У результаті забруднювачі переходять у малорухомі форми, що обмежує їх міграцію у ґрунтово-водній системі та знижує ризик вторинного забруднення. До рослин, здатних до стабілізації та акумуляції металів, належать <i>Miscanthus giganteus</i> (As, Pb, Zn, Co, Ni, V, Mn,) та <i>Chenopodium quinoa</i> Willd. (Cd, Cu)</p>
<p>Фітоекстракція: Передбачає поглинання рослинами розчинних форм важких металів та інших токсичних елементів із ґрунту з подальшим їх перенесенням у надземні частини. Після завершення вегетаційного циклу надземна біомаса вилучається з ділянки, що забезпечує поступове зменшення концентрації забруднювачів у ґрунті. До ефективних рослин-аккумуляторів належать <i>Brassica juncea</i> L. (Cd, Zn, Pb), <i>Fagopyrum esculentum</i> Moench (Pb, Cd, Zn)</p>
<p>Ризофільтрація: Передбачає вилучення забруднювачів із ґрунтового середовища шляхом адсорбції та акумуляції їх кореневою системою рослин. У зоні ризосфери відбувається зв'язування металів та органічних токсикантів, що сприяє зниженню їх біодоступності у ґрунті. Для таких процесів можуть використовуватись рослини з високою здатністю до акумуляції металів, зокрема <i>Pisum sativum</i> L. та <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.</p>

Для вилучення важких металів із ґрунту використовуються соняшник (*Helianthus annuus*), гірчиця (*Brassica juncea*) та ріпак (*Brassica napus*). Для рекультивациі техногенно порушених територій ефективними є швидкорослі енергетичні деревні породи, зокрема верба (*Salix* spp.) і тополя (*Populus* spp.).

Результатом рекультивацийних робіт має бути формування екологічно стабільного та функціонально збалансованого ландшафтного комплексу.

У цьому контексті важливе значення має застосування ландшафтно-екологічного підходу, який передбачає врахування природних умов і структурно-функціональних особливостей території. Такий підхід дає змогу обґрунтовано визначити напрями подальшого використання рекультивованих земель, зокрема для формування сільськогосподарських угідь, створення лісових насаджень або організації рекреаційних територій.

Головні висновки. У дослідженні засвідчено, що техногенна трансформація територій унаслідок будівельної, інженерної та гірничодобувної діяльності зумовлює комплексні зміни морфоскульптури рельєфу, водного режиму та порушення структурно-функціональної організації ландшафтів.

Обґрунтовано, що рекультивациа є багатостадійним, ієрархічно організованим процесом, у якому підготовчий, технічний і біологічний етапи є функціонально взаємопов'язаними.

Встановлено, що біологічний етап рекультивациі є визначальним для досягнення довготривалої екологічної стабільності відновлених земель, оскільки саме на цій стадії забезпечується відновлення ґрунто-творних процесів, активізація біогеохімічних циклів і формування стійкого рослинного покриву. Доведено доцільність інтеграції фітореMediaційних заходів у систему біологічної рекультивациі,

що забезпечує зниження вмісту важких металів та інших токсичних елементів у ґрунтовому середовищі. Отримані результати підтверджують ефективність поєднання рекультиваційних і фіторемедіаційних заходів у системі ландшафтно-екологічної реабілітації техногенно трансформованих територій.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати формують наукову основу для підвищення ефективності рекультиваційних і фіторемедіаційних заходів на основі їх поєднання при відновленні техногенно трансформованих територій. Їх практичне застосування можливе під час розроблення проєктів рекультивації, зокрема при обґрунтуванні повноти біологічного етапу, виборі

рослинного компоненту та оцінюванні результативності відновлення ґрунтового середовища.

Результати можуть бути використані в системах екологічного моніторингу для оцінювання динаміки ґрунтових процесів і відновлення функціональних зв'язків у геосистемах, а також у практиці просторового планування для визначення напрямів подальшого використання рекультивованих територій [22].

Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію запропонованих підходів у конкретних природно-географічних умовах, зокрема на різних типах техногенно трансформованих територій, а також на оцінювання ефективності поєднання рекультиваційних і фіторемедіаційних заходів.

Література

1. Turner M. G. Landscape ecology: what is the state of the science? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2005; Vol. 41, p. 319-344. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152614
2. R. T. T. Forman, R. D. Deblinger. The Ecological Road-Effect Zone of a Massachusetts (U.S.A.) Suburban Highway. *Conservation Biology*. 2000; Vol. 14, No. 1, p. 36-46. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99088.x>
3. Гродзинський, М. Д. Еволюція ландшафтів України: ландшафтознавчо-географічний вимір проблеми: монографія. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2023, 432 с.
4. Зеленчук І. Відновлення ґрунтів та екосистем після будівництва: рекультивація як важливий інструмент відновлення взаємодії між інертними та живими компонентами ландшафту. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2024. № 134. С. 17-21. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11639772>
5. Борецька І. А. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6(39). С. 72-76 DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
6. Сосько С. П., Зеленчук І. Д. Вплив будівництва на ландшафти лісостепової зони України. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2024. Вип. 42. С. 24-34. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-02>
7. Романюк О. І., Борецька І. Ю., Шевчик Л. З., Ощеповський І. В. Розробка фіторемедіаційних композицій для очистки ґрунтів, забруднених нафтою та її похідними. *Екологічні науки*. 2022. № 4(43). С. 94-99 DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.15>
8. Ali H., Khan E., Sajad M. A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications. *Chemosphere*. 2013. Vol. 91. p. 869–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
9. United Nations Environment Programme (ed.). *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108627146>
10. Панас Р. М. Рекультивація земель : навч. посіб. Вид. 2-ге, стер. Львів : Новий Світ-2000, 2007. 224 с.
11. Иванов С. А., Андрейчук Ю. М., Книш І. Б. Ландшафтно-екологічні основи рекультивації породного терикону шахти «Візейська». *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування* : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. (8-12 жовтня 2018 р., м. Трускавець). Київ : ДКЗ, 2018. Т. 2. С. 68-74. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2018.eco.2-68-74>
12. Иванов С. А. Проблеми рекультивації і ревіталізації земель, порушених гірничими роботами. *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування* : матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. : у 2 т. (6-10 листоп. 2017 р., м. Трускавець). – Київ : ДКЗ, 2017. – Т. 2. – С. 262-270. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2017.eco.2-262-270>
13. Kharitonov M. M., Babenko M. H., Mytsyk O. O., Gavryushenko O. O., Pashova V. T., Martynova N. V. Physical-chemical and biological testing of phytomeliorated rocks of the Pokrov land reclamation station. *Agrology*. 2018. Vol. 1, No. 3. p. 300-305. DOI: <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.13010>
14. Борецька І. Ю., Джура Н. М., Романюк О. І. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6(39). С. 72-76. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
15. Salt D. E., Smith R. D., Raskin I. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1998. Vol. 49. p. 643-668. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.643>
16. Зеленчук І. Д. Ландшафтно-геохімічна деструкція територій інтенсивного будівництва. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica et Recreatio*. 2025. № 3. С. 28-40. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-5843/2025-3-3>
17. Закон України від 19.06.2003 № 962-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15> (дата звернення: 17.03.2026).
18. Земельний кодекс України : Закон України від 25 жовт. 2001 р. № 2768-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення: 17.03.2026).
19. Лісова Т. В. Рекультивація земель як основний захід їх відновлення. *Право і суспільство*. 2017. № 5, ч. 1. С. 119-125. http://pravoisusilstvo.org.ua/archive/2017/5_2017/part_1/22.pdf (дата звернення: 17.03.2026).
20. Кале О. В. Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів : ЛДУБЖД, 2021. 156 с. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.4-43.15>

21. Melnychenko, V. Phytoremediation of soils contaminated as a result of military and anthropogenic impact. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. 20(4), с. 72-84. DOI: <https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.72> (дата звернення: 17.03.2026)
22. Зеленчук І. Д. Еколого-геоморфологічні трансформації інертних компонентів ландшафту індустриальних зон. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2025. Вип. 44. с. 132-146. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-10>

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026