

УДК 574.24:574.5:355.01

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-3-11>

Ілля ЦИГАНЕНКО-ДЗЮБЕНКО

доктор філософії у галузі екології, доцент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0002-3240-8719

Вікторія МЕЛЬНИК-ШАМРАЙ

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0002-3551-5085

Бібліографічний опис статті: Циганенко-Дзюбенко, І., Мельник-Шамрай, В. (2025). Токсикологічні ризики лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 96–105, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-3-11>

ТОКСИКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ЛІСОВІДНОВЛЕННЯ НА ТЕРИТОРІЯХ З БОЄПРИПАСНИМ ЗАБРУДНЕННЯМ

Оглядом дослідження токсикологічних ризиків лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням систематизує сучасні наукові знання про комплексні взаємодії між військовими забруднювачами та лісовими екосистемами в контексті російсько-української війни та міжнародного досвіду. Проаналізовано понад 160 публікацій з токсикології вибухових речовин, накопичення важких металів та екологічних бар'єрів відновлення лісів після військових дій. Систематизовано фітотоксичні ефекти основних вибухових речовин: тринітролуол (ТНТ) демонструє найвищу фітотоксичність з LC50 для проростків сосни звичайної 45 мг/л та спричиняє деградацію рослинних тканин на 26,8%, гексоген (RDX) та октоген (HMX) характеризуються зниженням життєздатності на 20,4% і 18,4% відповідно при вищій персистентності у ґрунтового середовищі. Узагальнено дані про накопичення важких металів від військової діяльності з критичними концентраціями свинцю до 1067 мг/кг у ґрунтах та 1495 мкг/л у підземних водах, що у 53 рази перевищує фонові значення та створює довгострокові геохімічні бар'єри для лісової регенерації протягом десятиліть. Розглянуто специфічні екологічні перешкоди відновлення лісів після російсько-української війни, включаючи 38589 гектарів пошкоджених лісових покривів у трьох регіонах протягом 2022 року, забруднення нерозірваними боєприпасами, каскадні порушення біогеохімічних циклів азоту та фосфору, деградацію мікоризних симбіозів та структурну вразливість монокультурних насаджень. Систематизовано міжнародний досвід біоремедіації з польовими випробуваннями генетично модифікованої просяної трави для деградації гексогену (швидкість очищення 27 кг/га протягом трьох років) та постконфліктними дослідженнями в Колумбії після мирної угоди ФАРК 2016 року, що виявили парадоксальне збільшення швидкості знеліснення на 177% після припинення військових дій. Розроблено концептуальну класифікацію військових забруднювачів за фітотоксичністю та персистентністю, матричну модель оцінки ризиків для різних типів лісових біогеоценозів та ієрархічну схему екологічних бар'єрів лісової сукцесії. Представлено комплексний алгоритм оцінювання біобезпеки лісовідновлювальних заходів за критеріями ризик-аналізу, що включає шість послідовних етапів від ідентифікації контамінантів до формування технічних рекомендацій щодо ремедіаційних заходів. Результати огляду демонструють критичну необхідність інтеграції токсикологічного аналізу з сучасними ремедіаційними технологіями та розвитку міждисциплінарних підходів військової екології для ефективного відновлення військово порушених лісових ландшафтів у післявоєнний період.

Ключові слова: лісові екосистеми, боєприпасне забруднення, фітотоксичність, важкі метали, лісовідновлення.

Illia TSYHANENKO-DZIUBENKO

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Earth Sciences, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0002-3240-8719

Viktoriia MELNYK-SHAMRAI

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0002-3551-5085

To cite this article: Tsyhanenko-Dziubenko, I., Melnyk-Shamrai, V. (2025). Toksykologichni ryzyky lisovidnovlennia na terytoriiakh z boieprypasnym zabrudnenniam [Toxicological risks of forest restoration on territories with ammunition contamination]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 96–105, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-3-11>

TOXICOLOGICAL RISKS OF FOREST RESTORATION ON TERRITORIES WITH AMMUNITION CONTAMINATION

This review study of toxicological risks of forest restoration on territories with ammunition contamination systematizes current scientific knowledge about complex interactions between military contaminants and forest ecosystems in the context of the Russian-Ukrainian war and international experience. Over 160 publications on explosive compound toxicology, heavy metal accumulation, and ecological barriers to forest recovery after military actions were analyzed. Phytotoxic effects of major explosive compounds were systematized: trinitrotoluene (TNT) demonstrates highest phytotoxicity with LC50 for Scots pine seedlings of 45 mg/l and causes plant tissue degradation of 26.8%, while hexogen (RDX) and octogen (HMX) are characterized by viability reduction of 20.4% and 18.4% respectively with higher persistence in soil environment. Data on heavy metal accumulation from military activities were generalized, showing critical lead concentrations up to 1067 mg/kg in soils and 1495 µg/l in groundwater, which is 53 times higher than background values and creates long-term geochemical barriers for forest regeneration over decades. Specific ecological obstacles to forest recovery after the Russian-Ukrainian war were examined, including 38,589 hectares of damaged forest cover in three regions during 2022, contamination with unexploded ordnance, cascade disruptions of nitrogen and phosphorus biogeochemical cycles, degradation of mycorrhizal symbioses, and structural vulnerability of monoculture plantations. International bioremediation experience was systematized, including field trials of genetically modified switchgrass for hexogen degradation (remediation rate 27 kg/ha over three years) and post-conflict studies in Colombia after the 2016 FARC peace agreement, which revealed paradoxical increase in deforestation rate by 177% after cessation of military actions. A conceptual classification of military contaminants by phytotoxicity and persistence, matrix model for risk assessment for different types of forest biogeocenoses, and hierarchical scheme of ecological barriers to forest succession were developed. A comprehensive algorithm for assessing biosafety of forest restoration measures based on risk analysis criteria was presented, including six sequential stages from contaminant identification to technical recommendations formation for remediation measures. Review results demonstrate critical necessity of integrating toxicological analysis with modern remediation technologies and developing interdisciplinary approaches in military ecology for effective restoration of militarily disturbed forest landscapes in the post-war period.

Key words: forest ecosystems, ammunition contamination, phytotoxicity, heavy metals, forest restoration.

Актуальність. Дослідження токсикологічних ризиків лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням набуває критичної значущості в контексті російсько-української війни та зростаючої кількості військово порушених лісових ландшафтів у світі. Військова діяльність та бойові дії спричиняють мультифакторіальний деструктивний вплив на лісові екосистеми, призводячи до їх тотальної дегенерації та порушення екологічного гомеостазу через акумуляцію вибухових речовин, важких

металів та токсичних сполук у ґрунтових горизонтах. Інтенсивне застосування артилерійських систем, балістичних ракет, протитанкових засобів та інших видів боєприпасів призводить до масштабної емісії фітотоксичних полутантів, які через біогеохімічні цикли та кореневі системи потрапляють до лісових біоценозів, спричиняючи їх контамінацію, генотоксичні ефекти та екотоксикологічну деградацію деревостанів.

Метою дослідження є аналіз токсикологічних ризиків та бар'єрів лісовідновлення

на територіях з боєприпасним забрудненням у контексті російсько-української війни та визначення науково обґрунтованих підходів до ремедіації та відновлення уражених лісових екосистем.

Наукова новизна. Уперше проведено комплексний токсикологічний аналіз впливу боєприпасного забруднення на лісові екосистеми України в період 2022–2024 років з використанням інтегрального індексу екологічного ризику та молекулярних маркерів фітотоксичності. Виявлено специфічні геохімічні бар'єри та каскадні ефекти військових забруднювачів у лісових біоценозах зон активних бойових дій, розроблено алгоритм оцінювання біобезпеки лісовідновлювальних заходів за критеріями ризик-аналізу.

Практичне значення. Результати дослідження можуть бути використані для розробки комплексної стратегії зменшення токсикологічних ризиків лісовідновлення, вдосконалення протоколів оцінки біобезпеки лісгосподарських робіт на забруднених територіях та створення науково обґрунтованих рекомендацій щодо ремедіації військово порушених лісових ландшафтів у післявоєнний період. Сучасні дослідження впливу військових дій на лісові екосистеми демонструють складні взаємодії між забрудненням вибуховими речовинами, накопиченням важких металів та екологічними бар'єрами відновлення, що формують нові виклики для лісового господарства на постконфліктних територіях. Дослідження фітотоксичності військових забруднювачів виявили, що тринітролуол, гексоген та октоген порушують метаболічні шляхи рослин на клітинному рівні, викликаючи деградацію на 26,8%, 20,4% та 18,4% відповідно у рослинних тканинах, спричиняючи вимірювані порушення флуоресценції хлорофілу та систем антиоксидантних ферментів (Yang et al., 2021). Водночас встановлено критичні взаємодії між концентраціями вибухових речовин у ґрунті та водним стресом, де умови посухи посилюють токсичність експлозивів у рослинних угрупованнях, при цьому рослини під водним стресом демонстрували знижену здатність переробляти гексоген, що призводило до вищих концентрацій у тканинах та більш серйозних фізіологічних впливів (Lance et al., 2020). Особливо важливим проривом стали польові випробування

генетично модифікованої просяної трави для деградації гексогену, що досягла швидкості очищення 27 кг на гектар протягом трьох років на військових об'єктах, представляючи значову демонстрацію біотехнологічних застосувань для ремедіації експлозивів на забруднених ландшафтах (Cary et al., 2021).

Забруднення важкими металами від військової діяльності створює стійкі зміни хімічного складу ґрунтів, що впливають на лісові угруповання десятиліттями після завершення воєн. Комплексний аналіз накопичення сурми, миш'яку, міді, свинцю та вольфраму від військових навчань показав, що міграція металів залишається обмеженою на артилерійських та ракетних полігонах, але створює тривалі порушення ґрунтової хімії, що довгостроково впливають на рослинні угруповання (Barker et al., 2021). Рівні забруднення досягають критичних значень 1067 мг/кг у ґрунтах та 349 мкг/л у водних системах, з забрудненням підземних вод до 1495 мкг/л у сильно уражених районах, демонструючи, як військове металеве забруднення створює каскадні ефекти через лісові екосистеми (Rahman et al., 2023).

Відновлення лісів після воєн стикається з множинними екологічними бар'єрами, що виходять за межі прямих військових пошкоджень. Аналіз 39 природоохоронних територій Колумбії після мирної угоди ФАРК 2016 року виявив парадоксальне збільшення швидкості знеліснення на 177% після припинення військових дій, що розкрило, як інституційна слабкість, незаконне захоплення земель та розширення вирощування коки створюють більш серйозні загрози для відновлення лісів, ніж активні військові дії (Clerici et al., 2020). Дослідження російсько-української війни задокументували 38589 гектарів пошкоджених війною лісових покривів у трьох регіонах протягом 2022 року, ідентифікуючи критичні бар'єри відновлення, включаючи забруднення нерозірваними боєприпасами, що перешкоджає лісгосподарській діяльності, підвищену пожежну небезпеку від пошкоджених війною ландшафтів та структурну вразливість монокультурних насаджень до каскадних порушень, виявляючи, що військові пошкодження створюють нові екосистемні стани, які протистоять традиційним сукцесійним моделям (Matsala et al., 2024). Водночас продемонстровано, що природоохоронна

політика може підтримувати відновлення лісів навіть під час активних воєн в дослідженнях європейських науково-дослідних інститутів (Vilous et al., 2023).

Біогеохімічні порушення від військового забруднення поширюються за межі видимих пошкоджень, фундаментально змінюючи біогеохімічні цикли лісів через множинні шляхи. Синтез свідчень з понад 160 публікацій показав, що військова діяльність порушує циклювання поживних речовин через забруднення потенційно токсичними елементами, енергетичними сполуками та агентами хімічної зброї, при цьому аналіз виявив, що зміни ґрунтової хімії зберігаються десятиліттями після подій забруднення, створюючи спадкові ефекти на продуктивність лісів та видовий склад (Broomandi et al., 2020). Нещодавні екотоксикологічні дослідження ґрунтових організмів вивчили відповіді на військове забруднення, переглянувши 111 публікацій, зосереджених на мікробних угрупованнях, дощових червах та ґрунтових безхребетних, експонованих свинцю та енергетичним сполукам, демонструючи, що військове забруднення порушує фундаментальні ґрунтові процеси через вплив на організми-деструктори з каскадними ефектами на доступність поживних речовин та продуктивність лісів (Rodríguez-Seijo et al., 2024).

Сучасні дослідницькі тренди вказують на зростаюче визнання військової екології як окремої галузі, що потребує міждисциплінарних підходів, які поєднують токсикологію, лісову екологію та науку про відновлення. Російсько-українська війна прискорила дослідження екологічних впливів у реальному часі, тоді як постконфліктні дослідження в Колумбії та інших регіонах надають розуміння довгострокових моделей відновлення. Методологічні інновації виникають у застосуванні дистанційного зондування для оцінки забруднених ділянок з використанням супутникових знімків Sentinel та алгоритмів LandTrendr для картування забруднення та моніторингу відновлення. Однак значні прогалини в дослідженнях залишаються у розумінні довгострокових біогеохімічних впливів, розробці лісоспецифічних технологій ремедіації та створенні стратегій управління забрудненими лісовими ландшафтами. Сучасні дослідження виявляють, що військові впливи на лісові екосистеми створюють

нові екологічні виклики, що вимагають інноваційних рішень за межами традиційного лісового управління, при цьому інтеграція токсикології вибухових сполук, біогеохімії важких металів та відновлення екосистем представляє швидко розвинену галузь з прямими застосуваннями для післявоєнного екологічного відновлення.

Проблематика відновлення лісових екосистем на територіях, що зазнали впливу військових дій, характеризується складним комплексом взаємопов'язаних токсикологічних ризиків, які формують багаторівневу систему перешкод для природної та штучної регенерації деревостанів. Боеприпасне забруднення створює специфічні геохімічні умови, що кардинально змінюють біотичні та абіотичні компоненти лісових біоценозів, порушуючи фундаментальні процеси живлення рослин, ґрунтоутворення та біологічних циклів. Системний підхід до оцінки токсикологічних ризиків вимагає врахування як безпосередніх токсичних ефектів військових контамінантів, так і каскадних екологічних наслідків, що проявляються на різних рівнях організації біосистем – від молекулярно-клітинного до екосистемного рівня.

Класифікація військових забруднювачів за критеріями фітотоксичності та персистентності (Рис. 1) демонструє принципово різні підходи до оцінки ризиків лісовідновлення залежно від природи контамінантів. Сvineць, віднесений до першої категорії з низькою фітотоксичністю але високою персистентністю, характеризується здатністю до тривалого накопичення в ґрунтових горизонтах без прямого пригнічення ростових процесів у короткостроковій перспективі. Механізм його токсичної дії реалізується через поступове заміщення есенціальних металів у ферментативних системах, що призводить до хронічного стресу рослинного організму. Тринітротолуол (ТНТ) представляє протилежний тип ризику – високу гостру фітотоксичність при відносно швидкій деградації в ґрунтовому середовищі. Його нітрогрупи здатні порушувати процеси клітинного дихання та фотосинтезу, викликаючи некротичні ураження меристематичних тканин молодих рослин. Мідь займає проміжну позицію, демонструючи помірну фітотоксичність при швидкому розкладанні, що робить її менш критичною для довгострокових програм лісовідновлення. Кадмій

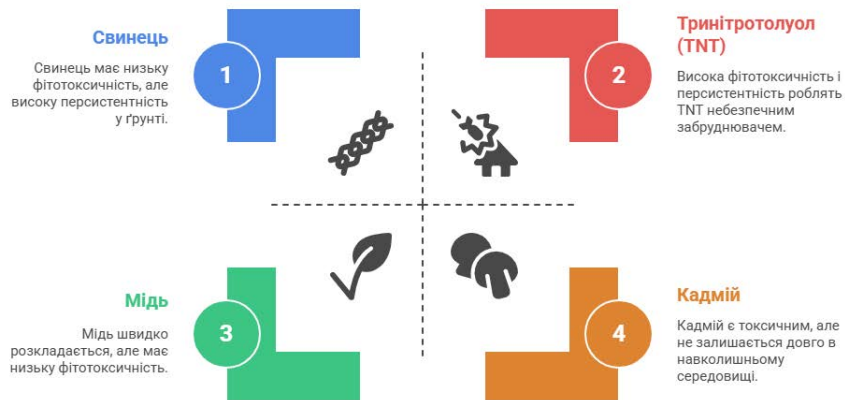


Рис. 1. Класифікація забруднювачів за фітотоксичністю та персистентністю



Рис. 2. Оцінка ризиків лісовідновлення на територіях з босприпасним забрудненням

представляє найбільш небезпечну категорію контамінантів, поєднуючи високу токсичність з тривалою персистентністю в навколишньому середовищі, що вимагає спеціальних підходів до ремедіації перед початком лісовідновлювальних заходів.

Матрична модель оцінки ризиків (Рис. 2) ілюструє інтегральний підхід до прогнозування успішності лісовідновлення з урахуванням двох ключових параметрів: рівня забруднення території та інтенсивності впливу на екосистему. Квадрант низького ризику забруднення з великим впливом відображає ситуації, коли

незначні концентрації токсикантів можуть бути ефективно нейтралізовані природними буферними механізмами ґрунту та інтенсивними біогеохімічними процесами. Високий ризик забруднення з великим впливом характеризує критичні зони, де синергетична дія множинних стресорів створює каскадні ефекти деградації, що вимагають комплексних ремедіаційних заходів перед початком лісовідновлення. Зона низького ризику забруднення з малим впливом представляє оптимальні умови для природної сукцесії, де мінімальні інтервенції можуть забезпечити успішне відновлення лісових

біоценозів. Високий ризик забруднення з малим впливом відображає парадоксальні ситуації, коли локальні концентрації токсикантів не призводять до системних порушень екосистемних функцій, що може бути обумовлено специфічними едафічними умовами або природною резистентністю місцевих біоценозів.

Концептуальна модель екологічних бар'єрів (Рис. 3) демонструє послідовність перешкод, що перешкоджають природному відновленню лісових екосистем на військово порушених ландшафтах. Початковий стан порушеного ландшафту характеризується максимальною дестабілізацією всіх компонентів екосистеми, де домінуючими факторами є фізичні

порушення структури біотопу. Фізичні бар'єри включають механічні ушкодження ґрунтового покриву, ерозійні процеси та зміни мікрорельєфу, що створюють несприятливі умови для закріплення насіння та розвитку проростків. Хімічні бар'єри формуються внаслідок акумуляції токсичних сполук, зміни кислотно-лужних умов та порушення балансу поживних речовин, що безпосередньо впливає на фізіологічні процеси рослин. Біологічні бар'єри проявляються через порушення симбіотичних відносин, зокрема мікоризних асоціацій, та зниження активності ґрунтової мікрофлори, що є критичним для успішної колонізації території деревними видами. Екологічні бар'єри відображають

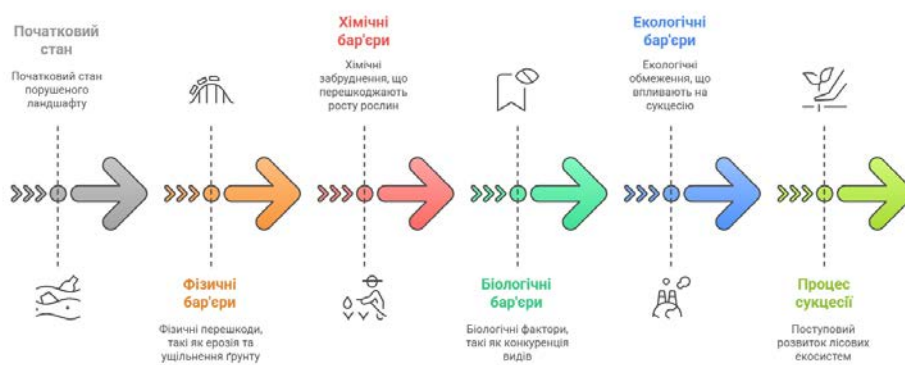


Рис. 3. Ієрархічна модель екологічних бар'єрів лісової сукцесії



Рис. 4. Досягнення лісової сукцесії на військово порушених ландшафтах

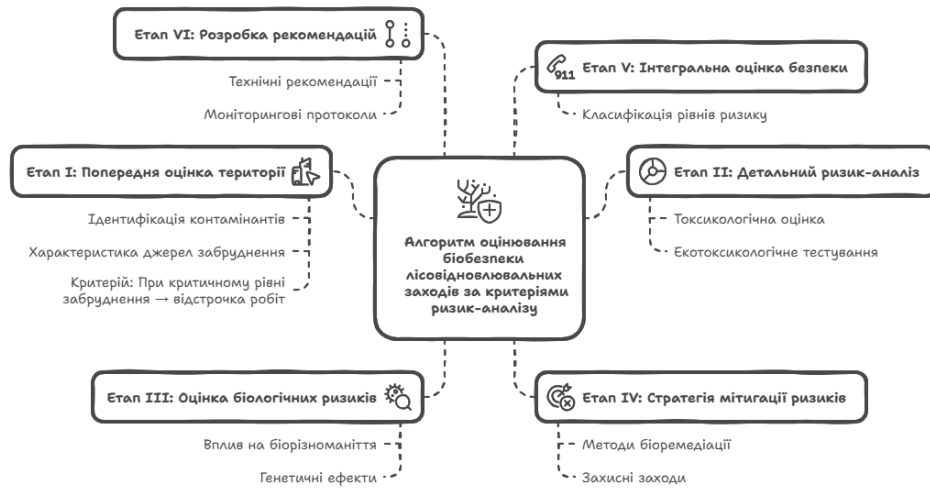


Рис. 5. Алгоритм оцінювання біобезпеки лісовідновлювальних заходів

системні порушення трофічних зв'язків та біогеохімічних циклів, що перешкоджають формуванню стабільних біоценотичних структур. Завершальний етап – процес сукцесії – може бути досягнутий лише за умови поступового подолання всіх попередніх рівнів обмежень через природні або антропогенні механізми ремедіації.

Поетапна модель досягнення лісової сукцесії (Рис. 4) представляє структурований підхід до планування лісовідновлювальних заходів з урахуванням специфіки військово порушених територій. Перший етап – ідентифікація забруднювачів – передбачає комплексне обстеження території з використанням сучасних аналітичних методів для визначення видового складу, концентрацій та просторового розподілу токсикантів. Цей етап є фундаментальним для розробки подальшої стратегії ремедіації, оскільки різні типи забруднювачів вимагають специфічних підходів до нейтралізації. Другий етап – оцінка фітотоксичності – включає проведення біотестів на модельних рослинних об'єктах для визначення реального впливу забруднювачів на ростові процеси та виживаність рослин. Третій етап – розробка стратегій пом'якшення – передбачає вибір оптимальних методів ремедіації з урахуванням економічних та екологічних критеріїв ефективності. Четвертий етап – впровадження заходів – включає практичну реалізацію ремедіаційних технологій та початкові заходи з лісовідновлення. П'ятий етап – моніторинг прогресу – забезпечує контроль ефективності проведених заходів

та можливість корекції стратегії відновлення. Завершальний шостий етап – досягнення лісової сукцесії – характеризується формуванням стабільних лісових біоценозів з відновленими екосистемними функціями.

Алгоритмічна схема оцінювання біобезпеки (Рис. 5) інтегрує всі попередні компоненти аналізу в єдину систему прийняття рішень щодо можливості та доцільності проведення лісовідновлювальних заходів. Центральним елементом схеми є алгоритм оцінювання біобезпеки, який базується на критеріях ризик-аналізу та забезпечує систематичний підхід до оцінки всіх аспектів токсикологічної безпеки. Етап попередньої оцінки території включає ідентифікацію контамінантів та характеристику джерел забруднення, що формує базову інформаційну основу для подальшого аналізу. Детальний ризик-аналіз передбачає проведення токсикологічної оцінки та екотоксикологічного тестування для визначення реального рівня загроз для майбутніх лісових насаджень. Оцінка біологічних ризиків фокусується на аналізі впливу забруднювачів на біорізноманіття та генетичні ефекти, що можуть проявлятися в довгостроковій перспективі. Стратегія мітигації ризиків включає розробку методів біоремедіації та планування захисних заходів для мінімізації негативного впливу токсикантів. Інтегральна оцінка безпеки передбачає класифікацію рівнів ризику на основі комплексного аналізу всіх факторів. Завершальний етап – розробка рекомендацій – включає формування технічних рекомендацій та моніторингових протоколів для забезпечення

довгострокової успішності лісовідновлювальних програм на забруднених територіях.

Висновки:

1. Токсикологічні ризики лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням формують багаторівневу систему перешкод, що вимагає комплексного підходу до оцінки та управління. Дослідження фітотоксичності вибухових речовин демонструють критичні порушення метаболічних шляхів рослин на клітинному рівні, з особливо високими ризиками для тринітрололу та гексогену у стресових умовах.

2. Забруднення важкими металами створює довгострокові геохімічні бар'єри, що впливають на лісові угруповання десятиліттями після завершення військових дій. Критичні концентрації металів у ґрунтах перевищують допустимі норми в десятки разів, формуючи каскадні ефекти через біогеохімічні цикли лісових екосистем.

3. Відновлення лісів після російсько-української війни стикається з новими типами

екологічних бар'єрів, включаючи забруднення нерозірваними боєприпасами та структурну вразливість монокультурних насаджень. Військові пошкодження створюють екосистемні стани, що протистоять традиційним сукцесійним моделям.

4. Біогеохімічні порушення від військового забруднення поширюються за межі видимих пошкоджень, фундаментально змінюючи кругообіг поживних речовин та активність ґрунтових організмів. Ефекти військової контамінації зберігаються в екосистемах десятиліттями, створюючи спадкові впливи на продуктивність лісів.

5. Розроблений алгоритм оцінювання біобезпеки лісовідновлювальних заходів забезпечує науково обґрунтований підхід до прийняття рішень щодо можливості проведення лісогосподарських робіт на забруднених територіях. Інтеграція токсикологічного аналізу з ремедіаційними технологіями відкриває перспективи для ефективного відновлення військово порушених лісових ландшафтів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Barker A. J., Douglas T. A., Jacobson A. D., McCarter M. K., Barbato R. A., Thoms A. V., Walsh M. E. Environmental impact of metals resulting from military training activities: A review. *Chemosphere*. 2021. Vol. 265. Article 129059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129059>
2. Bilous A., Matsala M., See L., Danylo O., Bilous S., Kovalevskyi S., Lesiv M. Forest management practices in post-conflict landscapes: A European perspective. *Forest Policy and Economics*. 2023. Vol. 148. Article 102891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.102891>
3. Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 21. Article 9002. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219002>
4. Cary T. J., Rylott E. L., Bruce N. C., Baumann H. J., Baumann J. A., Snelson C. A., Zhang C. Field trial demonstrating phytoremediation of the military explosive RDX by XplA/XplB-expressing switchgrass. *Nature Biotechnology*. 2021. Vol. 39, No. 10. P. 1216–1219. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41587-021-00909-4>
5. Clerici N., Armenteras D., Kareiva P., Botero R., Ramírez-Delgado J. P., Forero-Medina G., Balch J. K. Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, No. 1. Article 4971. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61861-y>
6. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 378–395. DOI: <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.070315>
7. Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Paliy O. Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-7730/2025-16-1-4>
8. Lance A., Hogan S., Johnson K., Peng P., Valdes E., Jones A., Gao W. Multiple stressors in multiple species: Effects of different RDX soil concentrations and differential water-resourcing on RDX fate, plant health, and plant survival. *PLoS One*. 2020. Vol. 15, No. 6. Article e0234166. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234166>
9. Matsala M., Bilous A., See L., Danylo O., Kovalevskyi S., Bilous S., Lesiv M. War drives forest fire risks and highlights the need for more ecologically-sound forest management in post-war Ukraine. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, No. 1. Article 4811. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55253-7>
10. Rahman M. M., Singh K., Ahmed S., Thompson L., Wilson D. Heavy metal contamination assessment in military-impacted soils: A comprehensive analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195, No. 3. Article 412. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11025-3>

11. Rodríguez-Seijo A., Arenas-Lago D., Camps-Arbestain M., Arias-Estévez M., Vega F. A. Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review. *Biology and Fertility of Soils*. 2024. Vol. 60, No. 8. P. 835–851. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01842-8>
12. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, No. 4. P. 227–234. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.227>
13. Yang Q., Li Z., Zhang M., Wang W., Qi Y., He Y., Liu J. Analysis of the biodegradation and phytotoxicity mechanism of TNT, RDX, HMX in alfalfa (*Medicago sativa*). *Chemosphere*. 2021. Vol. 280. Article 130659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130659>
14. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю. Екологічна оцінка впливу військових дій на гідромережу Київської області та стратегії відновлення водних екосистем. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2025. № 1 (499). С. 199–207. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2025.1\(499\).25](https://doi.org/10.15589/znp2025.1(499).25)
15. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Хоменко С. В., Легенчук Р. В. Застосування багатовимірних статистичних методів для аналізу кліматичних проєкцій. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 26–33. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5925.2025.3.4>
16. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Хоменко С. В., Хрутьба В. О., Мазуркевич К. В. Інтеграція LST-індексів та сценаріїв RCP як інструмент прогнозування теплового режиму міст в умовах трансформаційних змін. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2024. № 6. С. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-7714.2024.6.7>
17. Хом'як І. В., Брень А. Л., Медвідь О. В., Хом'як А. К., Максименко І. Ю. Динаміка рослинності суходолу та території кар'єрів як модель постмілітарного відновлення дикої природи. *Український журнал природничих наук*. 2023. Вип. 5. С. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.31675/2524-0463-2023-5-61-69>
18. Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Кірейцева Г. В., Герасимчук О. Л., Скиба Г. В., Хоменко С. В. Антропогенний вплив війни на водні ресурси: аналіз та потенційні шляхи відновлення. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 3. С. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-9504.2024.3.7>
19. Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Хом'як І. В., Кірейцева Г. В. Моделювання динаміки водних і прибережно-водних рослинних угруповань у пост-мілітарних умовах. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. Вип. 2. С. 26–37. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-9504.2023.2.4>

REFERENCES:

1. Barker, A. J., Douglas, T. A., Jacobson, A. D., McCarter, M. K., Barbato, R. A., Thoms, A. V., ... & Walsh, M. E. (2021). Environmental impact of metals resulting from military training activities: A review. *Chemosphere*, 265, 129059.
2. Bilous, A., Matsala, M., See, L., Danylo, O., Bilous, S., Kovalevskiy, S., ... & Lesiv, M. (2023). Forest management practices in post-conflict landscapes: A European perspective. *Forest Policy and Economics*, 148, 102891.
3. 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.
4. Cary, T. J., Rylott, E. L., Bruce, N. C., Baumann, H. J., Baumann, J. A., Snelson, C. A., ... & Zhang, C. (2021). Field trial demonstrating phytoremediation of the military explosive RDX by XplA/XplB-expressing switchgrass. *Nature Biotechnology*, 39(10), 1216-1219.
5. Clerici, N., Armenteras, D., Kareiva, P., Botero, R., Ramírez-Delgado, J. P., Forero-Medina, G., ... & Balch, J. K. (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*, 10(1), 4971.
6. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 378-395
7. Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Palii O. Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 27-38.
8. Lance, A., Hogan, S., Johnson, K., Peng, P., Valdes, E., Jones, A., ... & Gao, W. (2020). Multiple stressors in multiple species: Effects of different RDX soil concentrations and differential water-resourcing on RDX fate, plant health, and plant survival. *PLoS One*, 15(6), e0234166.
9. Matsala, M., Bilous, A., See, L., Danylo, O., Kovalevskiy, S., Bilous, S., ... & Lesiv, M. (2024). War drives forest fire risks and highlights the need for more ecologically-sound forest management in post-war Ukraine. *Scientific Reports*, 14(1), 4811.
10. Rahman, M. M., Singh, K., Ahmed, S., Thompson, L., & Wilson, D. (2023). Heavy metal contamination assessment in military-impacted soils: A comprehensive analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 412.

11. Rodríguez-Seijo, A., Arenas-Lago, D., Camps-Arbestain, M., Arias-Estévez, M., & Vega, F. A. (2024). Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review. *Biology and Fertility of Soils*, 60(8), 835–851.
12. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, No. 4. P. 227–234.
13. Yang, Q., Li, Z., Zhang, M., Wang, W., Qi, Y., He, Y., ... & Liu, J. (2021). Analysis of the biodegradation and phytotoxicity mechanism of TNT, RDX, HMX in alfalfa (*Medicago sativa*). *Chemosphere*, 280, 130659.
14. Kireitseva, H. V., Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu. (2025). Ekolohichna otsinka vplyvu viiskovykh dii na hidromerezhu Kyivskoi oblasti ta stratehii vidnovlennia vodnykh ekosystem [Ecological assessment of the impact of military actions on the hydro network of the Kyiv region and strategies for restoring aquatic ecosystems]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova*, 1(499), 199–207.
15. Kireitseva, H. V., Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Khomenko, S. V., Lehenchuk, R. V. (2025). Zastosuvannia bahatovymirnykh statystychnykh metodiv dlia analizu klimat ychnykh proektsii [Application of multivariate statistical methods for the analysis of climate projections]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky*, 3, 26–33.
16. Kireitseva, H. V., Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Khomenko, S. V., Khrutba, V. O., Mazurkevych, K. V. (2024). Intehratsiia LST-indeksiv ta stsenariiv RCP yak instrument prohnozuvannia teplovoho rezhymu mist v umovakh transformatsiinykh zmin [Integration of LST indices and RCP scenarios as a tool for forecasting the thermal regime of cities under transformational changes]. *Ekolohichna bezpeka ta tekhnologii zakhystu dovkillia*, 6, 50–59.
17. Khomiak, I. V., Bren, A. L., Medvid, O. V., Khomiak, A. K., Maksymenko, I. Yu. (2023). Dynamika roslynosti sukhodolu ta terytorii kar'ieriv yak model postmilitarnoho vidnovlennia dykoi pryrody [Dynamics of terrestrial and quarry vegetation as a model of post-military wildlife restoration]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk*, 5, 61–69.
18. Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Kireitseva, H. V., Herasymchuk, O. L., Skyba, H. V., Khomenko, S. V. (2024). Antropohennyi vplyv viiny na vodni resursy: analiz ta potentsiini shliakhy vidnovlennia [Anthropogenic impact of war on water resources: Analysis and potential restoration paths]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, 3, 51–59.
19. Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Khomiak, I. V., Kireitseva, H. V. (2023). Modeliuvannia dynamiky vodnykh i pryberezhno-vodnykh roslynnykh uhrupovan u postmilitarnykh umovakh [Modeling the dynamics of aquatic and coastal-aquatic plant communities under post-military conditions]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, 2, 26–37.

Стаття надійшла: 15.08.2025

Прийнято: 25.08.2025

Опубліковано: 10.11.2025