УДК 630*28:504.06:355.01
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.5

АНАЛІЗ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЯКОСТІ НЕДЕРЕВНОЇ ПРОДУКЦІЇ ЛІСУ ПІД ВПЛИВОМ СУЧАСНИХ БЕЗПЕКОВИХ ВИКЛИКІВ

Врадій О.І. (orcid.org/0000-0001-7383-3829)
Вінницький національний аграрний університет
вул. Сонячна, 3, 21008, м. Вінниця
oksanavradii@gmail.com

Військові дії та безпекові виклики завдають непоправної шкоди лісовим екосистемам України, провокуючи пірогенну деструкцію ґрунтового покриву та локальне воєнно-техногенне забруднення. Дослідження міграції екотоксикантів у системі «ґрунт – рослина/гриб» є критично важливим для гарантування екологічної безпеки та збереження якості недеревної продукції лісу, що використовується населенням та фармацевтичною галуззю. Емпіричні дослідження проводили протягом 2024–2026 рр. на базі лісових масивів Вінницької області (зокрема, Гніванського та Калинівського лісництв). Вміст важких металів (Pb, Cd) у зразках ґрунту та біомаси визначали методом атомно-абсорбційної спектрометрії, питома активність ^{90}Sr вимірювалася радіометричним методом. Оцінку вегетаційного стану лісостанів здійснювали на основі супутникових знімків Sentinel-2 за індексом NDVI.

Установлено, що пірогенно-мілітарний вплив призводить до підкислення ґрунтів (pH знижується до 5,1 ± 0,3), підвищуючи рухливість токсикантів: вміст мобільного Pb у ґрунті зріс у 7 разів, Cd – у 8,4 раза, а активність ^{90}Sr – у 5,6 раза порівняно з контролем. Виявлено вибірковий характер акумуляції забруднювачів: максимальний вміст кадмію зафіксовано у *Boletus edulis* (1,85 мг/кг), а радіостронцію – у *Cantharellus cibarius* (112 Бк/кг, Кн = 1,65) та кальцієфілі *Urtica dioica L.* (Кн = 1,46). Виявлено стійкий зворотний кореляційний зв'язок між індексом NDVI та концентрацією екотоксикантів у ґрунті (r = -0,65 для ^{90}Sr та r = -0,72 для Pb).

Оцінено трансформацію якості недеревних лісових ресурсів у зонах мілітарного навантаження Лісостепу Правобережгного. Запропоновано предиктивну модель виявлення зон екологічного ризику на основі супутникового моніторингу NDVI. Обґрунтовано необхідність обов'язкового токсикологічного і радіометричного скринінгу недеревної продукції в радіусі до 5 км від місць техногенних інцидентів. *Ключові слова:* недеревна продукція лісу, важкі метали, безпекові виклики, радіоекологія.

Transformation of non-wood forest product quality under the influence of security challenges in conditions of technogenic and military impacts. Vradii O.

Military actions and security challenges cause irreparable damage to forest ecosystems of Ukraine, provoking pyrogenic destruction of soil cover and local military-technological pollution. Research on the migration of ecotoxicants in the «soil – plant / fungus» system is critically important for ensuring environmental safety and preserving the quality of non-timber forest products used by the population and the pharmaceutical industry. Empirical studies were conducted during 2024–2026 on the basis of forest areas of Vinnytsia region (in particular, Hnivan and Kalyniv forestry). The content of heavy metals (Pb, Cd) in soil and biomass samples was determined by atomic absorption spectrometry, the specific activity of ^{90}Sr was measured by radiometric method. The assessment of the vegetation state of forest stands was carried out based on Sentinel-2 satellite images using the NDVI index.

It was found that pyrogenic-military impact leads to acidification of soils (pH decreases to 5.1 ± 0.3), increasing the mobility of toxicants: the content of mobile Pb in the soil increased by 7 times, Cd – by 8.4 times, and the activity of ^{90}Sr – by 5.6 times compared to the control. The selective nature of the accumulation of pollutants was revealed: the maximum content of cadmium was recorded in *Boletus edulis* (1.85 mg/kg), and radiostrontium – in *Cantharellus cibarius* (112 Bq/kg, Ka = 1.65) and calciphiles *Urtica dioica L.* (Kn = 1.46). A stable inverse correlation was found between the NDVI index and the concentration of ecotoxicants in the soil (r = -0.65 for ^{90}Sr and r = -0.72 for Pb).

The transformation of the quality of non-timber forest resources in the zones of military load of the Right Bank Forest-Steppe is assessed. A predictive model for identifying ecological risk zones based on satellite monitoring of NDVI is proposed. The need for mandatory toxicological and radiometric screening of non-timber products within a radius of up to 5 km from the sites of technogenic incidents is substantiated. *Key words:* non-timber forest products, heavy metals, security challenges, radioecology.

Постановка проблеми. Лісові екосистеми України є важливою складовою природно-ресурсного потенціалу держави, виконуючи численні екологічні, економічні та соціальні функції. Вони забезпечують збереження біорізноманіття, підтримання кліматичної рівноваги, регулювання водного режиму територій, формування родючості ґрунтів та виступають джерелом цінних недеревних лісових ресурсів, серед яких особливе місце займають дикорослі ягоди та їстівні гриби. Останні не лише є важливими компонентами харчування населення, а й широко використовуються у фармацевтичній, харчовій та переробній промисловості [4].

Водночас у сучасних умовах лісові екосистеми Правобережного Лісостепу України зазнають значного антропогенного навантаження. Традиційні

© Врадій О.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

джерела забруднення, пов'язані з промисловою діяльністю, транспортом, інтенсивним веденням сільського господарства та застосуванням агрохімікатів, доповнюються новими викликами, спричиненими воєнними діями. Внаслідок використання різних видів озброєння, вибухових речовин, переміщення військової техніки та руйнування інфраструктури до навколишнього середовища потрапляє значна кількість токсичних елементів, серед яких особливу небезпеку становлять важкі метали. Потрапляючи у ґрунт, вони можуть тривалий час зберігатися в екосистемах, включатися у біогеохімічні цикли та накопичуватися в рослинній продукції [6].

Особливу актуальність ця проблема набуває щодо лісових грибів та ягід, які характеризуються високою здатністю до акумуляції важких металів із ґрунту та атмосферних випадінь. Багато видів грибів здатні накопичувати кадмій (Cd), свинець (Pb), мідь (Cu), цинк (Zn), нікель (Ni), хром (Cr) та інші елементи у концентраціях, що суттєво перевищують їх вміст у навколишньому середовищі. Аналогічні властивості притаманні й окремим видам дикорослих ягід. Саме тому гриби та ягоди розглядаються як ефективні біоіндикатори екологічного стану лісових екосистем і можуть слугувати важливими об'єктами моніторингу техногенного забруднення [1].

У межах наукового дослідження, що виконується за підтримки Гранту Президента України для молодих вчених – кандидатів наук (докторів філософії) віком до 35 років, особлива увага приділяється вивченню так званих «невидимих» наслідків війни. Йдеться про процеси накопичення важких металів у компонентах лісових екосистем, які не мають миттєвих проявів, проте можуть становити суттєву загрозу для екологічної безпеки, здоров'я населення та якості харчових ресурсів у довгостроковій перспективі [3].

Недостатність сучасних даних щодо рівнів накопичення важких металів у грибах та ягодах Правобережного Лісостепу, а також відсутність комплексної оцінки впливу воєнних та антропогенних факторів на їхній хімічний склад зумовлюють необхідність проведення відповідних досліджень. Отримані результати мають важливе значення для оцінки екологічного стану лісових екосистем, розроблення системи моніторингу забруднення та формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо безпечного використання недеревних лісових ресурсів населенням України [8].

Актуальність дослідження. Сучасний етап розвитку лісогосподарської галузі України та світу характеризується безпрецедентними викликами, які мають комплексний екологічний, техногенний та мілітарний характер. Військові дії, системні лісові пожежі, транскордонне забруднення та кліматичні флуктуації призводять до глибокої деградації лісових екосистем. Водночас поза увагою дослідників часто залишається проблема трансформації якості недеревної продукції лісу (НДПЛ) – харчових ресурсів (ягід, грибів, горіхів, лікарських рослин, соків), які є надчутливими біоіндикаторами екологічного стану довкілля [9].

У контексті сучасних безпекових викликів актуальність вивчення якості НДПЛ зумовлена такими чинниками: 1. ризиками радіоактивного та хімічного забруднення. Внаслідок бойових дій та техногенних аварій у лісові біогеоценози потрапляє значна кількість токсикантів – важких металів (Pb, Cd, As, Cu), залишків вибухових речовин та радіонуклідів (^{137}Cs, ^{90}Sr). Лікарська сировина та гриби мають високу акумуляційну здатність, що створює пряму загрозу для здоров'я населення, яке традиційно використовує ці ресурси. 2. Трансформацією біохімічного складу**:** екологічний стрес, спричинений пірогенним впливом (пожежами) та хімічним навантаженням, змінює фізіолого-біохімічні процеси в рослинах-продуцентах НДПЛ. Це призводить до зниження концентрації корисних біоактивних речовин (вітамінів, антиоксидантів, ефірних олій) та накопичення токсичних метаболітів. 3. Необхідністю модернізації моніторингу: традиційні наземні методи оцінки ресурсного потенціалу лісу в умовах безпекових обмежень (мінування територій, обмежений доступ до лісових масивів) є малоефективними або небезпечними. Виникає гостра потреба в інтеграції сучасних геоінформаційних систем (ГІС) та технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для дистанційного аналізу стану лісостанів та прогнозування якості недеревних ресурсів [10].

Таким чином, комплексний аналіз трансформації якості недеревної продукції лісу під впливом безпекових викликів є критично важливим для гарантування екологічної та продовольчої безпеки держави, збереження біорізноманіття та розробки стратегії післявоєнного відновлення лісового сектору на засадах збалансованого розвитку та європейських стандартів [2].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.

Представлений авторський доробок пов'язаний із виконанням державних цільових програм, науково-дослідних тем та міжнародних зобов'язань України у сфері екологічної безпеки, збалансованого лісокористування та адаптації до європейських стандартів.

Зокрема, дослідження виконувались у рамках реалізації Гранта Президента України для підтримки наукових досліджень і розробок молодих вчених на 2026 рік з темою: «Оцінка екологічного стану недеревної продукції лісу, що зазнала наслідків військових дій в умовах Лісостепу Правобережного» (грантоотримувач Врадій О.І.) та державних екологічних стратегій та законів (Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», Державної стратегії управління лісами України до 2035 року, Національного плану відновлення України).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Недеревна продукція лісу (НПЛ), до якої належать дикорослі ягоди, їстівні гриби, лікарські рослини, горіхи та інші біологічні ресурси, відіграє важливу роль у забезпеченні продовольчої, соціальної та економічної безпеки населення. Особливого значення ці ресурси набувають для мешканців лісових регіонів України, де вони традиційно використовуються як джерело харчової сировини, лікарських засобів та додаткових доходів. Водночас якість і безпечність недеревної продукції лісу значною мірою залежать від екологічного стану лісових екосистем та рівня антропогенного навантаження [3].

Упродовж останніх десятиліть значна кількість наукових досліджень була присвячена вивченню особливостей накопичення забруднювальних речовин у компонентах лісових екосистем. Дослідження вітчизняних і зарубіжних учених свідчать, що дикорослі гриби та ягоди характеризуються високою здатністю до акумуляції важких металів, радіонуклідів та інших токсичних елементів. Особливо інтенсивно такі процеси відбуваються у грибах, які завдяки розвиненій грибниці активно поглинають елементи з ґрунтового середовища та лісової підстилки. Саме тому гриби вважаються одними з найчутливіших біоіндикаторів екологічного стану лісових екосистем [5].

Значний внесок у вивчення проблеми забруднення недеревної продукції лісу зробили дослідники радіоекологічних наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. У численних роботах встановлено, що навіть через десятиліття після аварії дикорослі гриби та ягоди в окремих регіонах Полісся залишаються джерелом надходження радіонуклідів до організму людини. Особливо високими коефіцієнтами накопичення характеризуються чорниця (*Vaccinium myrtillus*), журавлина (*Vaccinium oxycoccos*), а також деякі види трубчастих грибів, зокрема білий гриб та польський гриб [10].

Поряд із радіонуклідним забрудненням останніми роками все більшої уваги набуває проблема накопичення важких металів у лісових харчових ресурсах. Наукові дослідження свідчать, що свинець, кадмій, мідь, цинк, нікель та інші токсичні елементи можуть накопичуватися в плодових тілах грибів і ягодах у концентраціях, що перевищують гранично допустимі рівні. Основними джерелами такого забруднення є викиди промислових підприємств, транспортні потоки, аграрне виробництво та атмосферне перенесення полютантів [18].

Останніми роками в Україні виник новий комплекс екологічних загроз, пов'язаний із повномасштабною війною. Внаслідок бойових дій значні площі лісових територій зазнали механічного руйнування, пожеж, вибухового впливу та хімічного забруднення. У наукових публікаціях останніх років дедалі частіше наголошується на необхідності оцінки довгострокових екологічних наслідків воєнних дій для лісових екосистем. Особливе занепокоєння викликає надходження до довкілля важких металів із залишків боєприпасів, військової техніки та продуктів горіння. Такі елементи можуть потрапляти у ґрунт, а згодом акумулюватися в рослинній продукції та грибах [16].

Сучасні дослідження свідчать, що серед найбільш небезпечних забруднювачів воєнного походження є свинець, кадмій, мідь, цинк, сурма, хром та нікель. Ці елементи здатні тривалий час зберігатися у верхніх горизонтах ґрунту та включатися в біогеохімічні цикли лісових екосистем. Водночас гриби та ягоди можуть виступати ефективними індикаторами таких змін, оскільки швидко реагують на трансформацію хімічного складу ґрунтового середовища [14].

У працях сучасних екологів також підкреслюється вплив кліматичних змін на якість недеревної продукції лісу. Підвищення середньорічної температури, збільшення частоти посух, зміна режиму опадів та зростання кількості лісових пожеж призводять до трансформації видового складу грибів і ягід, зміни їхньої продуктивності та біохімічних характеристик. Крім того, екстремальні погодні явища можуть посилювати міграцію токсичних елементів у системі «ґрунт – рослина – гриб» [13].

Аналіз наукової літератури свідчить, що питання впливу сучасних безпекових викликів на якість недеревної продукції лісу є відносно новим напрямом досліджень. Незважаючи на наявність значної кількості робіт щодо накопичення радіонуклідів і важких металів у грибах та ягодах, комплексна оцінка впливу воєнних дій, техногенних факторів і кліматичних змін на безпечність недеревних лісових ресурсів залишається недостатньо вивченою. Це обумовлює необхідність проведення подальших досліджень, спрямованих на моніторинг екологічного стану лісових екосистем, оцінку рівня забруднення дикорослої продукції та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо її безпечного використання населенням [11].

Таким чином, сучасні безпекові виклики формують нові ризики для якості недеревної продукції лісу, а дослідження процесів накопичення забруднювальних речовин у грибах та ягодах набуває особливої актуальності в контексті забезпечення екологічної, продовольчої та санітарно-гігієнічної безпеки України [10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених загальним питанням лісової екології, міграції радіонуклідів та накопиченню важких металів у фітомасі рослин, низка аспектів цієї глобальної проблеми залишається недостатньо вивченою.

Конкретні лакуни в наукових знаннях, на усунення яких спрямована ця стаття, охоплюють такі напрями, як відсутність комплексних моделей синергетичного впливу. Більшість чинних дослі-

джень аналізують вплив екотоксикантів ізольовано (наприклад, окремо радіоактивне забруднення або окремо пірогенний стрес). Натомість практично відсутні дані про синергетичний ефект – як одночасний вплив механічного пошкодження лісової підстилки, локального хімічного забруднення (компонентами вибухових речовин і паливно-мастильних матеріалів) та температурного шоку від пожеж змінює рухливість екотоксикантів у системі «ґрунт – НДПЛ».

Біохімічні бар'єри та коефіцієнти накопичення (Кн) екотоксикантів для деревних порід досліджено детально, тоді як для нижніх ярусів лісу (дикорослих ягідників, лікарських трав, мікобіоти) бракує систематизованих даних. Невирішеним залишається питання динаміки накопичення важких металів у дикорослих ресурсах за умов різкої зміни кислотності (pH) та мікробіологічної активності лісових ґрунтів після пожеж.

Технологічний розрив у методах екологічного моніторингу. Наявні методики оцінки якості недеревних ресурсів лісу базуються переважно на точковому польовому відборі зразків, що в умовах сучасних безпекових викликів (висока мінна небезпека лісів, пошкодження інфраструктури) є практично неможливим на значних площах. Алгоритми інтеграції даних ДЗЗ (індексів вегетації типу NDVI, EVI) із прогнозуванням хімічного стресу та якості підліскової сировини на ландшафтному рівні розроблені лише фрагментарно.

Вищезазначене визначає необхідність розробки нових науково-методологічних підходів до оцінки якості недеревної продукції лісу. Саме вирішенню цих прикладних та теоретичних завдань – від виявлення закономірностей біогеохімічної трансформації недеревних ресурсів до створення ГІС-орієнтованих моделей їх безпечної заготівлі – і присвячено цю статтю.

Новизна. Наукова новизна отриманих результатів полягає у теоретичному обґрунтуванні та експериментальному вирішенні важливого наукового завдання – оцінки закономірностей трансформації якості недеревної продукції лісу (НДПЛ) в умовах сучасних мілітарних, пірогенних та техногенних викликів.

Основні наукові результати, що визначають новизну дослідження, полягають у такому: вперше обґрунтовано концептуальну модель синергетичного впливу комбінованого навантаження (пірогенного деструкції лісової підстилки, механічного пошкодження ґрунтового покриву та локального забруднення сполуками військово-техногенного походження) на рухливість і транслокацію важких металів (Pb, Cd) та штучних радіонуклідів (^{137}Cs, ^{90}Sr) у системі «ґрунт – рослина/мікобіота».

Встановлено математичні залежності між індексами вегетації лісостанів (NDVI, EVI), отриманими за допомогою технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), та фактичним фітотоксичним стресом підліскового ярусу рослинності, що дозволяє дистанційно прогнозувати зони з високим екологічним ризиком для заготівлі недеревної сировини.

Удосконалено: методологічні підходи до оцінки екологічної безпеки НДПЛ шляхом інтеграції класичних методів радіоекологічного моніторингу із методами просторового ГІС-моделювання екологічних ризиків на ландшафтному рівні (зокрема, в умовах обмеженого фізичного доступу до лісових масивів). Значення коефіцієнтів накопичення (Кн) та переходу (Кп) важких металів і радіонуклідів для домінантних видів лікарських рослин, дикорослих ягід та грибів у лісових біогеоценозах Правобережного Лісостепу України (зокрема, на базі досліджень у Гніванському та Калинівському лісництвах) з урахуванням сучасних змін фізико-хімічних властивостей ґрунтів.

Дістали подальшого розвитку: наукові положення щодо біоіндикаційної спроможності окремих видів мікобіоти та трав'янистих рослин як експрес-індикаторів локального хімічного та пірогенного забруднення лісових екосистем та підходи до гармонізації вітчизняних нормативно-гігієнічних вимог до безпечності дикорослої продукції лісу з регламентами Європейського Союзу в умовах зростання екологічних ризиків воєнного часу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Обґрунтування вибору саме цих локацій (Калинівського лісництва та лісових масивах поблизу с. Бохоники Вінницького району), які зазнали опосередкованого, але гострого мілітарного та пірогенного впливу, має глибоке методологічне та загальнонаукове значення для екологічної науки.

Дослідження процесів міграції екотоксикантів та трансформації якості недеревної продукції лісу (НДПЛ) на базі лісництв Вінницької області, що постраждали від ракетних ударів, детонацій та падіння уламків засобів повітряного нападу, має важливе методологічне та загальнонаукове значення, яке полягає у розробці моделі оцінки латентного (прихованого) мілітарного впливу. Переважна більшість сучасних екологічних досліджень фокусується на зонах прямих бойових дій (де забруднення є очевидним і суцільним). Натомість методологічна цінність цієї роботи полягає у створенні алгоритму оцінки «точкового» та дифузного забруднення лісів у відносно тилових регіонах. Це дає змогу типізувати подібні екологічні загрози для інших областей України та світу, що зазнають регулярних ракетно-дронових атак.

Інтеграція різномасштабних методів моніторингу. У роботі методологічно об'єднано локальний інструментальний аналіз (хіміко-аналітичні та радіоекологічні вимірювання на конкретних тест-майданчиках у Бохониках та Калинівці) із регіональним просторовим моделюванням (ГІС-картографування, аналіз траєкторій розсіювання аерозолів та продуктів детонації). Це створює методологічний прецедент для оптимізації екологічного моніторингу лісів в умовах обмеженого фізичного доступу.

Стандартизація процедур біоіндикації. Обґрунтовано та методично систематизовано використання НДПЛ (грибів, дикорослих ягід, лікарських рослин) як чутливих експрес-індикаторів техногенного стресу лісових екосистем. Розроблені коефіцієнти транслокації та накопичення важких металів військового походження можуть бути інтегровані в державні методики моніторингу лісових ресурсів.

Отримані результати збагачують фундаментальні уявлення про поведінку хімічних елементів у біосфері. Дослідження виявляє, як екстремальні фізико-хімічні чинники (пірогенне руйнування лісової підстилки, локальна зміна кислотності ґрунту внаслідок детонації вибухових речовин) впливають на термодинамічну рухливість металів і радіонуклідів, прискорюючи або сповільнюючи їхнє надходження в живі організми.

Науково доведено, що безпекові виклики воєнного стану мають довготривалий екологічний «післядію». Робота вносить вклад у фундаментальну концепцію екологічної безпеки територій, демонструючи, що навіть відсутність активних наземних боїв не гарантує токсикологічної чистоти харчових та лікарських ресурсів лісу.

Наукові результати щодо транскордонної міграції та трансформації якості недеревних ресурсів створюють теоретичну базу для адаптації лісогосподарських нормативів України до Європейського зеленого курсу та стандартів безпеки харчових продуктів ЄС.

Вивчення лісових масивів навколо Калинівки, Бохоників дозволяє вийти за межі локального опису проблеми й сформувати універсальну науково-методологічну базу для оцінки, прогнозування та мінімізації латентних радіоекологічних і токсикологічних ризиків у лісових екосистемах, що зазнали непрямого воєнного впливу.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження, проведені протягом 2024–2026 рр. у лісових масивах Вінницької області, дозволили встановити чіткі закономірності трансформації екологічного стану лісових біогеоценозів та якості недеревної продукції лісу (НДПЛ) під впливом сучасних воєнно-техногенних та пірогенних викликів.

Первинною ланкою в ланцюгу міграції екотоксикантів є лісовий ґрунт (особливо лісова підстилка та верхній акумулятивний горизонт 0–10 см), який безпосередньо зазнає хімічного, радіаційного та пірогенного навантаження. Аналіз зразків ґрунту з досліджуваних лісництв виявив суттєві відхилення від контролю (табл. 1).

У лісових кварталах Калинівського лісництва зафіксовано найінтенсивніше зниження показника pH до 5,1 (підкислення ґрунту). Цей процес зумовлений пірогенним фактором (локальними пожежами від детонацій) та випадінням кислих аерозольних осадів після вибухів боєприпасів. Зниження pH призвело до деструкції ґрунтового поглинального комплексу та різкого зростання рухливості важких металів та штучних радіонуклідів: концентрація рухомих форм Pb зросла у 7,0 раза, Cd – у 8,4 раза, а питома активність стронцію-90 (^{90}Sr) збільшилася у 5,6 раза порівняно з контролем.

У Гніванському лісництві (поблизу с. Бохоники) зафіксовано підвищений вміст рухомих форм Pb (5,1 мг/кг), а також помітне зростання питомої активності ^{90}Sr до 39 Бк/кг, що методологічно пов'язується із деструкцією лісової підстилки вибуховими хвилями та подальшим вивільненням радіонуклідів із зв'язаних форм у ґрунтовому розчині.

У таблиці 2 відображено фактичний вміст токсикантів (Pb, Cd) та питому активність радіонуклідів (^{137}Cs, ^{90}Sr) у сухій речовині модельних об'єктів.

Результати таблиці 2 демонструють, що гриби є найпотужнішими концентраторами забруднювачів. У білому грибі та лисичці звичайній з Калинівського лісництва зафіксовано критичні рівні накопичення кадмію (1,85 мг/кг та 1,46 мг/кг відповідно), що перевищує фонові значення більш ніж у 20 разів. Одночасно питома активність стронцію-90 у плодових тілах лисички звичайної досягла максимуму у 112 Бк/кг з високим коефіцієнтом накопичення (Кн = 1,65). Це підтверджує інтенсивне винесення радіоізотопу з підкисленого лісового ґрунту міцелієм гриба через його хімічну аналогію до стабільного кальцію.

Кропива дводомна, відібрана у Гніванському лісництві (ділянки Бохоники), підтвердила свій ста-

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники та вміст токсикантів у верхньому шарі ґрунту (0-10 см) досліджуваних лісництв (середні дані за 2024–2026 рр.)

Показник	Контроль (природний фон)	Калинівське лісництво (зона впливу детонацій)	Гніванське лісництво (ділянки поблизу с. Бохоники (місця падіння уламків БПЛА))
pH H_2O	6,2 ± 0,2	5,1 ± 0,3	5,7 ± 0,2
Рухомі форми Pb, мг/кг	1.2 ± 0.1	8,4 ± 0,9	5,1 ± 0,6
Рухомі форми Cd, мг/кг	0,05 ± 0,01	0,42 ± 0,05	0,28 ± 0,03
Питома активність ^{137}Cs, Бк/кг	45 ± 6	185 ± 22	92 ± 11
Питома активність ^{90}Sr, Бк/кг	12 ± 2	68 ± 8	39 ± 5

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

Таблиця 2

Вміст важких металів та питома активність радіонуклідів у об'єктах НДПЛ досліджуваних лісництв (в перерахунку на суху речовину, середні дані за 2024–2026 рр.)

Об'єкт дослідження / локація відбору	Свинець (Pb), мг/кг	Кадмій (Cd), мг/кг	^{137}Cs, Бк/кг	^{90}Sr, Бк/кг	Коефіцієнт накопичення стронцію (Кн для ^{90}Sr)
Білий гриб (*Boletus edulis*)					
Контроль (фон)	0,22 ± 0,03	0,08 ± 0,01	58 ± 7	14 ± 2	1,17
Калинівське лісництво	1,42 ± 0,18	1,85 ± 0,22	385 ± 44	96 ± 11	1,41
Гніванське лісництво (Бохоники)	0,94 ± 0,11	1,12 ± 0,14	162 ± 19	54 ± 6	1,38
Лисичка звичайна (*Cantharellus cibarius*)					
Контроль (фон)	0,18 ± 0,02	0,06 ± 0,01	84 ± 9	11 ± 1	0,92
Калинівське лісництво	1,15 ± 0,14	1,46 ± 0,16	420 ± 48	112 ± 13	1,65
Гніванське лісництво (Бохоники)	0,62 ± 0,07	0,78 ± 0,09	118 ± 14	32 ± 4	1,23
Кропива дводомна (*Urtica dioica L.*)					
Контроль (фон)	0,12 ± 0,01	0,02 ± 0,003	18 ± 2	8 ± 1	0,67
Гніванське лісництво (Бохоники)	0,78 ± 0,09	0,24 ± 0,03	42 ± 5	57 ± 7	1,46
Суниця лісова (*Fragaria vesca L.*, плоди)					
Контроль (фон)	0,09 ± 0,01	0,01 ± 0,001	12 ±1	5 ± 1	0,42
Гніванське лісництво (Бохоники)	0,85 ± 0,10	0,15 ± 0,02	34 ± 4	18 ± 2	0,69

тус рослини-кальцієфіла. Вона показала аномально високий коефіцієнт накопичення стронцію-90 (Кн = 1,46 при фоновому показникові 0,67), акумулювавши в надземній масі до 57 Бк/кг радіонукліда. В умовах деградації та збіднення ґрунту на доступний обмінний кальцій рослина активно компенсує цей елемент його хімічним аналогом – ^{90}Sr.

У плодах суниці лісової з Гніваанськго лісництва виявлено помірне, але чітке зростання вмісту свинцю до 0,85 мг/кг та ^{90}Sr до 18 Бк/кг сухої маси, що свідчить про наявність латентного (прихованого) забруднення харчової сировини навіть на суттєвій відстані від епіцентрів бойових дій та детонацій.

Для інтеграції локальних даних у загальну систему моніторингу було ведено кореляційний аналіз між спектральними характеристиками лісостанів та токсикологічним навантаженням.

З використанням знімків супутників Sentinel-2 у середовищі QGIS v3.34 розраховано вегетаційний індекс NDVI для тестових кварталів Гніванського та Калинівського лісництв.

$$NDVI = NIR – Red / NIR + Red \qquad (1.1)$$

Встановлено зворотний кореляційний зв'язок між значенням індексу NDVI у середині вегетаційного періоду (липень) та показниками забруднення ґрунту: коефіцієнт кореляції з питомою активністю ^{90}Sr у верхньому шарі становив r = -0,65, а з концентрацією рухомого Pb – r = -0.72.

Зниження NDVI до рівня 0,55–0,62 (при нормі здорового деревостану 0,78–0,85) чітко збігається з межами зон розсіювання аерозольних продуктів вибухів та пожеж. Це дозволяє використовувати карти вегетаційних індексів як предиктивну основу для дистанційного виділення територій, непридатних для безпечної заготівлі НДПЛ.

Головні висновки. Проведені комплексні еколого-радіоекологічні дослідження у лісових масивах Вінницької області протягом 2024–2026 рр. дозволили сформулювати такі наукові та практичні висновки. Установлено закономірності деструкції лісових ґрунтів під впливом мілітарно-пірогенного навантаження. Показано, що локальні вибухи, детонація боєприпасів та пожежі призводять до суттєвого підкислення верхнього шару лісового ґрунту (0-10 см), зокрема в Калинівському лісництві показник pH знизився до 5,1±0,3. Це підкислення руйнує ґрунтовий поглинальний комплекс і переводить важкі метали та радіонукліди у високорухливі, біодоступні форми. Унаслідок цього концентрація рухомих форм свинцю Pb у ґрунті зросла до 8,4 мг/кг (у 7 разів), кадмію Cd – до 0,42 мг/кг (у 8,4 раза), а питома активність стронцію-90 (^{90}Sr) досягла 68 Бк/кг (збільшення у 5,6 раза порівняно з контролем).

Виявлено вибірковий характер акумуляції забруднювачів недеревною продукцією лісу. Експериментально доведено, що дикорослa харчова та лікарська сировина демонструє надзвичайно високу здатність до накопичення екотоксикантів. Максимальні концентрації зафіксовано в мікобіоті: у білому грибі (*Boletus edulis*) вміст кадмію зріс до 1,85 мг/кг сухих речовин, а питома активність ^{90}Sr

у лисичці звичайній (*Cantharellus cibarius*) досягла 112 Бк/кг з коефіцієнтом накопичення Кн = 1,65. Кропива дводомна (*Urtica dioica L.*) виявила властивості суперакумулятора радіостронцію (Кн = 1,46), що фізіологічно зумовлено її приналежністю до кальцієфілів та активним заміщенням дефіцитного кальцію його радіоактивним аналогом ^{90}Sr.

Обґрунтовано використання ГІС та супутникових даних для предиктивного екологічного моніторингу. Розроблено методичний підхід, що базується на інтеграції наземних вимірювань та супутникових знімків Sentinel-2. Установлено статистично значущий зворотний кореляційний зв'язок між вегетаційним індексом лісостанів NDVI та радіохімічним навантаженням на екосистему (коефіцієнт кореляції з питомою активністю ^{90}Sr у ґрунті становить r = -0,65, зі свинцем – r = -0,72). Локальне пригнічення рослинності та зниження NDVI до 0,55–0,62 у зонах розсіювання продуктів вибухів дозволяє використовувати ГІС-картографування як предиктивну модель для дистанційного виявлення небезпечних для заготівлі недеревних ресурсів лісу територій.

Розроблено рекомендації для безпечного природокористування в поствоєнний період. З метою гарантування продовольчої безпеки населення та збереження якості лікарської сировини обґрунтовано необхідність впровадження обов'язкового радіоекологічного та токсикологічного скринінгу недеревних ресурсів лісу (насамперед дикорослих грибів, ягід та медичних трав) у радіусі до 5 км від зафіксованих воєнно-техногенних інцидентів. Промислову заготівлю сировини в межах даних зон ризику рекомендовано тимчасово обмежити до повної ревіталізації екосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження відкривають низку пріоритетних напрямів для подальшої науково-практичної розробки еколого-радіоекологічних аспектів безпеки лісових екосистем:

1. Дослідження довгострокової міграції та перерозподілу екотоксикантів у системі «ґрунт – рослина – гриб». Необхідно розширити часовий горизонт спостережень для оцінки динаміки вивільнення зв'язаних форм важких металів та радіонуклідів (насамперед ^{90}Sr) під впливом природних біогеохімічних процесів, кореневих екссудатів та мікоризних грибів. Окрему увагу слід приділити вивченню синергічного впливу сукупного забруднення (важкі метали + радіонукліди) на фізіологічний стан недеревних рослинних ресурсів.

2. Оцінка ефективності фіто- та мікоремедіаційних технологій. Перспективним є експериментальне вивчення здатності окремих дикорослих видів-гіперакумуляторів (зокрема, кропиви дводомної та певних штамів макроміцетів) до локального очищення забруднених ґрунтів лісових екосистем. Розробка та випробування екологічно безпечних методів інактивації рухомих форм токсикантів у ґрунті (наприклад, через внесення сорбентів, біочару чи вапнування) дозволить прискорити природні процеси відновлення лісових угідь.

3. Удосконалення ГІС-технологій та моделей предиктивного картографування. Подальша робота має бути спрямована на інтеграцію даних дистанційного зондування Землі надвисокої просторової розрізненості з алгоритмами машинного навчання. Створення автоматизованих моделей, які за динамікою індексів вегетації (NDVI, EVI) та стресу рослинності (NDRE) зможуть з точністю до окремого виділу прогнозувати зони підвищеного вмісту важких металів і радіонуклідів у недеревній продукції, дозволить розробити інтерактивні карти екологічного ризику для лісокористувачів.

4. Оцінка кумулятивного ризику для здоров'я населення. Важливим кроком є перехід від констатації вмісту токсикантів у сировині до математичного моделювання дозових навантажень на організм людини через трофічні ланцюги. Оцінка індивідуального та популяційного ризиків при споживанні дикорослих ягід і грибів із зон воєнно-техногенного навантаження дозволить розробити науково обґрунтовані національні стандарти та гігієнічні регламенти безпеки лісової продукції у поствоєнний період.

Література

1. Матусяк М.В., Нейко І.С., Нейко О.В., Юрків З.М. Вплив інтенсивності зрідження клонових плантацій дуба звичайного (Quercus robur L.) на плодоношення в умовах Вінниччини Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки. 2026. Вип. 148. Ч. 2. С. 353-362. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.2.41
2. Razanov S., Melnyk V., Symochko L., Dydiv A., Vradii O., Balkovskyi V., Khirivskyi P., Panas N., Lysak H., Koruniak O. Agroecological assessment of gray forest soils under intensive horticulture. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES).* 2022. Vol. 12 (4). P. 459–464. DOI: https://doi.org/10.31407/ijees12.4
3. Tkachuk O.P. Prerequisites for the transition of agriculture in Ukraine to ecologically balanced principles. Ecological sciences. 2022. № 5 (44). P. 144-149. doi: 10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.21
4. Neiko I.S., Matusiak M.V., Neiko O.V., Vradii O.I., Alieksieiev O.O. Characteristics of the condition and reproductive processes of trees in a clone plantation of *Pinus sylvestris L.* finnish origin in the conditions of Lytyn Forestry of the Vinnytsky Regional Forestry. *Сільське господарство та лісівництво.* 2025. № 4 (39). С. 15-29. doi: 10.37128/2707-5826-2025-4-2
5. Алєксєєв О.О., Врадій О.І., Разанов О.С., Салямон А.В. Інтенсивність накопичення радіонуклідів урожаєм еспарцету піщаного за його вирощування в умовах Полісся. *Аграрні інновації.* 2025. № 32. С. 7–11. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.32.1

6. Razanov S., Matusiak M., Bondar A., Vradii O. Bioecological and energy potential of *Robinia Pseudoacacia L.* stands under the conditions of the Vinnytsia forestry district of SE "Forests of Ukraine". *Збалансоване природокористування.* 2025. № 2. С. 85-93. doi: 10.33730/2310-4678.2.2025.337151
7. Панкова С.О., Бондар А.О., Матусяк М.В., Піддубна А.М. Методологічні та методичні засади моніторингу лісів України. *Український журнал природничих наук.* 2025. № 13. С. 394-401. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.37
8. Алєксєєв О.О., Врадій О.І. Вивчення інтенсивності накопичення важких металів рослинами буркуну білого (*Melilotus albus*) на ґрунтах, що зазнали впливу бойових дій. *Аграрні інновації.* 2025. № 30. С. 18–24. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.30.2
9. Matusyak M., Vradii O. Assessment of the success of the introduction and persprctives of the use of *Aesculus Pavia* in the conditions of Vinnitsa. *Сільське господарство та лісівництво.* 2025. № 1 (36). С. 147-159. doi: 10.37128/2707-5826-2025-1-11
10. Vradii O., Kovka N. Study of changes in the concentration of heavy metals in mushrooms during canning. *Agroecology, agriculture, forestry and horticulture in the 21st century: problems and solutions*. Monograph. Edited by S. Stankevych, O. Mandych. Tallinn: Teadmus OÜ, 2025. P. 126–139.
11. Wu D., Pulkkinen P., Pappinen A., Neyko I., Zhang G., Di Heinonen J., Repo T. Frost hardiness of Finnish plus tree progenies of Scots pine from seed orchards in Finland and Ukraine. *Eur J Forest Res.* 2023. Vol. 142. P. 1467-1477 https://doi.org/10.1007/s10342-023-01606-4.
12. Vradii O.I., Alieksieiev O.O. Ecological and economic assessment of the state of forest ecosystems in the conditions of marital state in Ukraine. *Аграрні інновації.* 2024. № 27. С. 29–36. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.27.4
13. Vradii O., Alieksieiev O. Intensity of accumulation of toxicants by non-wood forest products. *Agroecology, agriculture, forestry and horticulture in the 21st century: problems and solutions*. Monograph. Edited by S. Stankevych, O. Mandych. Tallinn: Teadmus OÜ, 2025. P. 377–394.
14. Матусяк М.В., Нейко І.С. Особливості репродуктивних процесів на клонових плантаціях дуба звичайного різних режимів зрідження в умовах Вінниччини. *Сільське господарство та лісівництво.* 2026. № 2 (41). С. 90-101. doi: 10.37128/2707-5826-2026-2-8
15. Нейко І.С., Матусяк М.В., Нейко О.В. Особливості стану та репродукції основних лісотвірних порід та горіхоплідних в умовах Лісостепу. Scientific strategies for conserving and restoring natural ecosystems under anthropogenic pressure: monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2026. P. 2-26. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-1
16. Neyko I., Yurkiv Z., Matusyak M., Katerynchak Yu. Condition of the permanent forest seed base objects of the Slavuta Forestry branch of the State Enterprise "Forests of Ukraine". Наукові доповіді НУБіП України. 2024. Т. 20. № 5. С. 90-104. doi: 10.31548/dopovidi/5.2024.90
17. Pavlenko A.P., Orlov O.O., Landin V.P., Chobotko G.M., Tyshchenko O.G., Musych O.G., Solomko V.L., Feshchenko V.P. Bioindication of ^{137}Cs contamination of forest ecosystems using test objects. *Agroecological Journal.* 2020. № 1. P. 19-27.
18. Матусяк М.В., Бондар А.О., Панкова С.О. Оцінка техногенного впливу на стан насаджень лісопаркової зони м. Вінниця. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2026. Вип. 143. Ч. 2. С. 319-325. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.36

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026