



УДК 631.416.2:504.75:355.48
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.15.2026.7>

ТРАНСФОРМАЦІЯ КИСЛОТНО-ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТОВИХ РОЗЧИНІВ ПІД ВПЛИВОМ ВИБУХІВ: ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ТА НАСЛІДКИ

І. П. Онищук¹, О. Ю. Кичкирук²

У роботі представлено результати дослідження кислотно-основних властивостей ґрунтів різних типів (чорноземи південні та звичайні, каштанові, дерново-підзолисті) у зонах техногенного впливу вибухів авіаційних боеприпасів (КАБ) на території Запорізької, Донецької, Херсонської та Сумської областей. Встановлено, що вибухові процеси спричиняють суттєву трансформацію кислотно-основного режиму ґрунтів, яка проявляється у зниженні обмінної кислотності, підвищенні гідролітичної та локальному підкисленні ґрунтового розчину. Найбільш виражені зміни зафіксовано у чорноземах Запорізької області та дерново-підзолистих ґрунтах Сумщини, де спостерігається порушення буферної здатності та накопичення іонів H^+ і Al^{3+} у ґрунтовому вбирному комплексі.

Для кількісної оцінки прихованої кислотності розраховано індекс кислотного навантаження (ІКН), який показав найвищі значення у контрольних дерново-підзолистих ґрунтах (0,001713), що свідчить про їхню природну вразливість до кислотного навантаження. Проби з вирви у Веселівці мали нижчий, але все ще високий ІКН (0,000866), що підтверджує збереження прихованої кислотності після вибуху. У чорноземах Запорізької та Донецької областей ІКН відповідає помірному рівню ризику, тоді як контрольні чорноземи та каштанові ґрунти демонструють низькі значення, що свідчить про їхню відносну стійкість.

Екологічне зонування територій за ступенем ризику дозволило виділити зони дуже високого (дерново-підзолисті ґрунти), високого (зони вибухів у Сумській області), помірного (чорноземи Запорізької та Донецької областей) та низького ризику (контрольні чорноземи, каштанові ґрунти). Отримані результати свідчать про тісний взаємозв'язок між змінами кислотності та рухливістю біогенних і важких металів, здатністю ґрунтів до акумуляції токсичних речовин та їхнім потенціалом самовідновлення. Це підкреслює необхідність системного моніторингу та застосування диференційованих стратегій ремедіації для збереження стійкості ґрунтових екосистем у постконфліктних регіонах.

Ключові слова: кислотність ґрунту, активна кислотність, обмінна кислотність, військовий вплив, вибухові снаряди.

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Onyshchuk-I@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2847-8570

² кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: ranova_o_yu@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0558-1647

TRANSFORMATION OF ACID-BASE PROPERTIES OF SOIL SOLUTIONS UNDER THE INFLUENCE OF EXPLOSIONS: ECOLOGICAL RISKS AND CONSEQUENCES

I. P. Onyshchuk, O. Yu. Kychkyruk

This study presents the results of an investigation into the acid-base properties of different soil types (southern and typical Chernozems, chestnut soils, sod-podzolic sandy soils) in areas affected by the explosions of aviation bombs (KAB) in Zaporizhzhia, Donetsk, Kherson, and Sumy regions of Ukraine. The findings demonstrate that explosive processes significantly transform the acid-base regime of soils, manifested in decreased exchange acidity, increased hydrolytic acidity, and localized acidification of soil solutions. The most pronounced changes were observed in Chernozems of Zaporizhzhia and sod-podzolic soils of Sumy, where buffer capacity was disrupted and accumulation of H^+ and Al^{3+} ions in the soil adsorption complex was detected.

To quantify hidden acidity, the Acid Load Index (ALI) was calculated as the ratio of hydrolytic acidity to active pH. The highest ALI values were recorded in control sod-podzolic soils (0.001713), indicating their natural vulnerability to acid load. Samples collected from craters in Sumy showed lower but still high ALI values (0.000866), confirming the persistence of hidden acidity after explosions. Chernozems in Zaporizhzhia and Donetsk exhibited moderate ALI values, while control Chernozems and chestnut soils demonstrated low indices, reflecting their relative stability.

Ecological zoning based on risk levels identified areas of very high risk (sod-podzolic soils), high risk (crater samples in Sumy), moderate risk (Chernozems in Zaporizhzhia and Donetsk), and low risk (control Chernozems and chestnut soils). The results highlight a close correlation between changes in soil acidity and the mobility of biogenic and heavy metals, the capacity of soils to accumulate toxic substances, and their potential for self-recovery. These findings emphasize the need for systematic monitoring and differentiated remediation strategies to ensure the resilience of soil ecosystems in post-conflict regions.

Key words: soil acidity, active acidity, exchange acidity, military impact, explosive shells.

Вступ

Проблема забруднення ґрунтів вибуховими речовинами набуває особливої актуальності в умовах сучасних воєнних конфліктів, техногенних катастроф та промислового використання вибухових матеріалів. Сучасні воєнні конфлікти супроводжуються масовим застосуванням вибухових речовин, що призводить до глибоких трансформацій ґрунтового покриву. Вибухи змінюють фізико-хімічні параметри ґрунтів, зокрема кислотність, яка є ключовим показником їхньої екологічної функціональності. За даними досліджень, вибухові процеси спричиняють накопичення важких металів, токсичних сполук та продуктів детонації у верхніх горизонтах ґрунту, що створює довготривалі ризики для екосистем. Вибухові сполуки, такі як тринітратолуол (TNT), гексоген (RDX) та октоген (HMX), характеризуються високою стійкістю до природного розкладу, що зумовлює тривале забруднення ґрунтових екосистем і створює значні ризики для довкілля та здоров'я населення. Вибухові сполуки TNT, RDX та HMX широко застосовуються у військових боєприпасах – зокрема в керованих авіаційних бомбах, мінах, артилерійських снарядах різного типу та сучасних вибухових зарядах (у тому числі дронів-камікадзе типу

«шахед»). Їх потрапляння у ґрунт призводить до зміни кислотно-основних властивостей ґрунтового розчину, оскільки продукти розкладу (нітрати, нітрити, нітроароматичні сполуки) підкислюють середовище, змінюють буферну здатність ґрунту та впливають на рухливість біогенних іонів (Bernstein & Ronen, 2011; Krainiuk et al., 2025).

Особливу увагу слід приділити саме вивченню особливостей трансформації кислотно-основних властивостей ґрунтових розчинів. Кислотність ґрунту визначає рухливість іонів кальцію, магнію, калію та інших біогенних елементів, необхідних для нормального функціонування фітоценозів. Зміни активної, гідролітичної та обмінної кислотності під впливом вибухів можуть призвести до: зниження буферної здатності ґрунтів; порушення процесів іонного обміну; зменшення доступності поживних речовин для рослин; підвищення токсичності середовища через мобілізацію важких металів таких як свинець (Pb), кадмій (Cd) та цинк (Zn) (Pereira et al., 2022; Hulich et al., 2024) формування довготривалих екологічних ризиків.

В Україні, яка з 2014 року зазнає масштабних воєнних дій, проблема забруднення ґрунтів вибуховими речовинами має довготривалий характер. Зони активних бойових

дій, військові полігони та території з інтенсивною гірничодобувною діяльністю потребують системного моніторингу та розробки ефективних методів ремедіації. Унікальні ґрунтові умови країни – чорноземи, глинисті ґрунти Лісостепу та піщані ґрунти Полісся – демонструють різну здатність до міграції та акумуляції вибухових речовин, що визначає неоднорідність процесів забруднення та потребує диференційованого підходу до оцінки екологічних ризиків і розробки стратегій моніторингу (Кучер, 2022).

Дослідження змін кислотності ґрунтових розчинів унаслідок вибухових процесів є важливим для розуміння механізмів деградації ґрунтових екосистем та створення науково обґрунтованих технологій очищення й відновлення ґрунтів. Це дозволить сформулювати базу для екологічного моніторингу, прогнозування наслідків воєнного та техногенного впливу й забезпечення стійкості агроекосистем у постконфліктних регіонах.

Попри те, що окремі дослідження в Україні засвідчили підвищення кислотності ґрунтів унаслідок бойових дій, систематизовані дані щодо масштабів та механізмів цього впливу залишаються обмеженими (Yakymchuk et al., 2024; Solokha et al., 2024). Відсутність узагальненої інформації ускладнює розробку ефективних заходів моніторингу та відновлення екосистем, що перебувають під тиском військових факторів. У цьому контексті особливої актуальності набуває створення стратегій відновлення кислотно-лужного балансу ґрунтів у зонах бойових дій (Solokha et al., 2024)

Дослідження наслідків вибухових процесів для ґрунтів має також глобальне значення. Історичні приклади, зокрема забруднення арсеном у Франції після Першої світової війни, демонструють, що наслідки військових впливів можуть зберігатися десятиліттями, формуючи довготривалі екологічні ризики (Сплодитель та ін., 2023).

Таким чином, вивчення трансформації кислотно-основних властивостей ґрунтів унаслідок вибухових процесів є надзвичайно актуальним у контексті сучасних воєнних конфліктів. Воно дозволяє оцінити екологічні ризики та сформулювати рекомендації для відновлення й збереження ґрунтових екосистем, що має стратегічне значення для екологічної безпеки та стійкого розвитку.

Мета дослідження: встановити закономірності трансформації активної, гідролі-

тичної та обмінної кислотності ґрунтових розчинів під впливом вибухових процесів та спрогнозувати їхній вплив на абсорбційну здатність ґрунтових часточок, акумуляцію токсичних компонентів і рухливість біогенних іонів, необхідних для стабільного функціонування фітоценозів.

Завдання дослідження:

1. Визначити показники активної, гідролітичної та обмінної кислотності ґрунтових розчинів у змішаних пробах із зон вибухового впливу.

2. Оцінити вплив трансформації кислотності на абсорбційну здатність ґрунтових часточок та процеси акумуляції токсичних компонентів.

3. Дослідити особливості рухливості біогенних іонів, необхідних для функціонування фітоценозів, у зміненому кислотно-основному середовищі.

4. Спрогнозувати екологічні ризики та наслідки для стійкості ґрунтових екосистем і розробити рекомендації щодо моніторингу та мінімізації негативних впливів.

Матеріал і методи

Для дослідження були відібрані ґрунтові проби у місцях вибухів керованих авіаційних бомб (КАБ), а також контрольні проби з ділянок, які не зазнали техногенного впливу. Контрольні зразки відбиралися на відстані 100–300 м від епіцентру вибуху, з аналогічним типом ґрунту та способом його використання (рілля, луки), без видимих ознак військового чи техногенного навантаження (табл. 1).

Таблиця 1
Опис відібраних проб ґрунтів

№ проби	Місце відбору	Джерело ураження
№ 1	Запорізька обл., с. Роботино	КАБ
№ 2	Запорізька обл., с. Мала Токмачка	КАБ
№ 3	Запорізька обл., с. Біленьке	КАБ
№ 4	Донецька обл., м. Покровськ	КАБ
№ 5	Донецька обл., с. Білецьке	КАБ
№ 6	Херсонська обл., м. Херсон	КАБ
№ 7	Сумська обл., с. Веселівка	КАБ

Примітка: в таблиці не вказані контрольні зразки

Для оцінки кислотно-основного режиму ґрунтів відбиралися змішані проби, сформовані з кількох точок у межах досліджуваної ділянки (центр вирви, прилегла територія на відстані 1–5 м, контрольна зона). Отримані індивідуальні зразки ґрунту об'єднувалися

у єдину інтегровану пробу, яка слугувала усередненим показником для оцінки змін кислотності. Такий підхід дозволяє визначити загальний рівень трансформації кислотно-основних властивостей ґрунтового розчину під впливом вибухових процесів, враховуючи як імпактні, так і периферійні зони забруднення. Проби відібрані поблизу населених пунктів які систематично зазнають обстрілів КАБаами.

Визначення активної кислотності (концентрації іонів H^+) у ґрунтовому розчині проводили потенціометричним методом. Наважку 6,00 г повітряно-сухого ґрунту змішували з 25 мл дистильованої води (співвідношення ґрунт : вода = 1 : 4,2). Суспензію перемішували протягом 15 хвилин на шейкері ЛАБ-ПУ-02, після чого вимірювали рН у відстояній суспензії за допомогою електронного рН-метра зі скляним електродом "PH800 Benchtop pH Meter" фірми "Apera" (USA) з попереднім калібруванням буферними розчинами (рН = 4,00 та рН = 7,00). Для кожного зразка виконували три паралельні вимірювання.

Для визначення кислотності, зумовленої обмінними іонами H^+ та Al^{3+} , використовували екстракцію 10,00 г ґрунту 25 мл 1 М розчину KCl (співвідношення 1 : 2,5). Суспензію інтенсивно збовтували протягом 15 хвилин, після чого фільтрували й визначали рН фільтрату потенціометричним методом.

Для визначення кількості іонів H^+ та Al^{3+} , здатних до обміну з буферним розчином, застосовували метод титриметричного аналізу. Наважку 40,00 г ґрунту екстрагували 100 мл 1 М розчину натрій ацетату (рН 8,2). Суміш збовтували протягом 30 хвилин, після чого фільтрували. Аліквоту 50 мл прозорого

фільтрату титрували 0,10 М розчином NaOH з фенолфталеїном як індикатором. Кінцеву точку титрування визначали за появою стійкого блідо-рожевого забарвлення.

Гідролітичну кислотність ґрунту $H_{гидр}$ виражали у ммоль еквівалентів H^+ на 1 кг ґрунту та розраховували за наступною формулою:

$$H_{гидр} = \frac{V_{NaOH} \cdot C_{NaOH} \cdot 1000 \cdot K}{a}$$

де: V_{NaOH} – об'єм розчину NaOH, що пішов на титрування, мл; C_{NaOH} – молярна концентрація еквіваленту розчину NaOH, моль екв/л; a – наважка ґрунту в аліквоті, г; K – коефіцієнт перерахунку на 1 кг ґрунту та на ммоль еквівалентів.

Результати

Порівняльний аналіз показників активної (pH_{H_2O}), обмінної (pH_{KCl}) та гідролітичної кислотності ($H_{гидр}$) дозволяє виявити характер впливу вибухових процесів на кислотно-основний режим ґрунтів у досліджуваних зонах. В таблиці 2 представлені результати вимірювання активної, обмінної та гідролітичної кислотності для всіх відібраних змішаних проб.

Аналіз отриманих даних свідчить про диференційований вплив вибухових процесів на кислотно-основні властивості ґрунтів різних типів. Зокрема у пробі № 1 зафіксовано зниження показників рН, що вказує на локальне підкислення ґрунту та порушення його природної буферної здатності. Подібні зміни можуть бути наслідком інтенсивного насичення ґрунтового розчину продуктами детонації.

ґрунтовой розчин проби № 2 характеризується значеннями рН, нижчими за природну норму, що свідчить про техногенний

Таблиця 2

Порівняння різних видів кислотності з природною

№ проби	Активна рН _{H₂O}	Обмінна рН _{KCl}	Гідролітична [H ⁺], ммоль/л	Тип ґрунту	Межі рН
№ 1	6,76 ± 0,05	6,52 ± 0,05	0,0026 ± 0,0002	Чорнозем південний	6,5–7,2
№ 2	6,41 ± 0,05	6,46 ± 0,05	0,0037 ± 0,0003	Чорнозем звичайний	6,5–7,2
№ 3	7,13 ± 0,05	7,01 ± 0,05	0,0014 ± 0,0001	Чорнозем звичайний	6,5–7,2
№ 4	7,09 ± 0,05	6,72 ± 0,05	0,0007 ± 0,0001	Чорнозем або темно-каштановий	6,5–7,2
№ 5	7,01 ± 0,05	6,63 ± 0,05	0,0024 ± 0,0002	Чорнозем або дерново-карбонатний	6,5–7,2
№ 6	7,33 ± 0,05	6,74 ± 0,05	0,0013 ± 0,0001	Каштановий або солонцюватий	7,0–7,5
№ 7	6,81 ± 0,05	5,37 ± 0,05	0,0059 ± 0,0004	Дерново-підзолистий, піщаний	5,0–5,5

Примітка: похибки наведено згідно з технічними характеристиками приладу та повторними вимірюваннями (n=3)

вплив вибуху та порушення кислотно-основного балансу. У пробі № 3 показники кислотності залишаються в межах природних значень ($pH_{H_2O} = 7,13$ та $pH_{KCl} = 7,01$). Відсутність суттєвих змін може бути зумовлена високою буферною здатністю чорноземів, яка забезпечується значним вмістом гумусу та карбонатів. Ці ґрунти здатні нейтралізувати продукти детонації та підтримувати стабільний кислотно-основний баланс навіть у зоні прямого вибухового впливу. Таким чином, результати дослідження проби № 3 свідчать про відносну стійкість чорноземів до кислотного навантаження та їхню здатність до саморегуляції.

Проба № 4 (чорнозем або темно-каштановий ґрунт) характеризується нейтральною реакцією ґрунтового розчину ($pH_{H_2O} = 7,09$; $pH_{KCl} = 6,72$), що відповідає природним межах для даного типу ґрунтів (pH 6,5–7,2). Відсутність значних відхилень від нормативних показників свідчить про збереження буферної здатності ґрунтового вбирного комплексу та обмежений вплив вибухових процесів. Незначне зниження обмінної кислотності може бути інтерпретоване як ознака слабого техногенного навантаження, яке не призвело до суттєвої трансформації кислотно-основного режиму. У пробі № 5 також зафіксовано нейтральну реакцію, проте спостерігається незначне підкислення, яке може бути пов'язане з локальним забрудненням продуктами вибуху.

Проба № 6 характеризується нормальними показниками кислотності, що відповідають природним межах (pH 7,0–7,5). Водночас бурий фільтрат свідчить про наявність органічного забруднення, яке не відобразилося безпосередньо у значеннях pH , але може мати екологічні наслідки.

Найбільш виражені зміни зафіксовано у пробі № 7 (дерново-підзолистий, піщаний ґрунт). Активна кислотність підвищена до нейтральних значень ($pH_{H_2O} = 6,81$), тоді як обмінна кислотність знижена ($pH_{KCl} = 5,37$). Це свідчить про хімічний вплив вибухових процесів, порушення іонного балансу та зниження буферної здатності ґрунту.

Аналіз кислотно-основних властивостей ґрунтів в областях, які зазнають систематичного впливу вибухових процесів показав суттєві відмінності, зумовлені як природними особливостями ґрунтових типів, так і техногенним впливом вибухів авіаційних боєприпасів (КАБ) (Табл. 3). Зокрема в пробах з Запорізької області (№ 1-3), ґрунти чорноземів південного та звичайного типів,

зафіксовано зниження активної кислотності порівняно з природними межами (6,5–7,2), що свідчить про вплив вибухових процесів. Гідролітична кислотність у цих зразках є підвищеною (0,0026–0,0037 ммоль/л), що вказує на накопичення іонів H^+ та Al^{3+} у ґрунтовому вбирному комплексі. Обмінна кислотність також має нижчі значення, що може бути ознакою деструкції ґрунтової структури та зниження буферної здатності.

У пробах чорноземів та темно-каштанових ґрунтів з Донецької області (№ 4-5) активна кислотність залишалася в межах природної норми, проте обмінна кислотність визначається як знижена, особливо в пробі № 5. Це може свідчити про локальне порушення іонного обміну. Гідролітична кислотність характеризується низькими значеннями, що вказує на відносну стабільність ґрунтового буферу, але водночас наявний потенційний ризик при повторному забрудненні.

У пробі каштанових ґрунтів з проби № 6 зафіксували активну кислотність, вищу за середні природні значення, що відповідають нейтральній або слабколужній реакції ґрунтового розчину. Водночас бурий фільтрат з проби свідчив про наявність органічних або металовмісних забруднювачів, які не вплинули на pH , але можуть становити токсичну небезпеку для екосистем (табл. 3).

Контрольна проба дерново-підзолистого піщаного ґрунту порівняно з досліджуваною пробою № 7 має низький pH (5,31), що відповідає природній кислотності для ґрунтів Полісся. Проба, відібрана з вирви, характеризується підвищеною активною кислотністю ($pH_{H_2O} = 6,81$) при одночасному зниженні обмінної кислотності ($pH_{KCl} = 5,37$). Це свідчить про локальне хімічне насичення продуктами вибуху, які підвищили концентрацію H^+ у ґрунтовому розчині, але порушили здатність ґрунту до іонного обміну (див. табл. 3).

Дослідження змішаних проб з вирв на території Запорізької, Донецької, Херсонської та Сумської областей ілюструють суттєві відмінності у кислотно-основному режимі ґрунтових розчинів залежно від типу ґрунту та техногенного навантаження. У чорноземах Запорізької області (проби № 1 та № 2) зафіксовано зниження активної та обмінної кислотності порівняно з природними межами, величина pH яких становить 6,5–7,2, що свідчить про локальне підкислення та порушення буферної здатності.

У ґрунтах Донецької області (проби № 4 та № 5) активна кислотність залишалася в межах норми, проте обмінна була нижчою, що може свідчити про локальне порушення іонного обміну. У ґрунтових пробах з передмістя м. Херсон показники рН відповідають природним межах каштанових ґрунтів, однак бурий фільтрат свідчив про органічне забруднення. Найбільш виражені зміни зафіксовані у пробі із Сумської області № 7: контрольна проба мала природно кислу реакцію (рН 5,31), тоді як проба з вирви характеризувалася підвищеною активною кислотністю (рН_{H₂O} 6,81) при одночасному зниженні обмінної (рН_{KCl} = 5,37), що свідчить про значне хімічне насичення продуктами вибуху.

Для кількісної оцінки прихованої кислотності розраховано індекс кислотного навантаження (ІКН) як співвідношення гідролітичної кислотності до активної (табл. 4).

Найвищі значення ІКН зафіксовано у дерново-підзолистих ґрунтах Сумської

області що свідчить про природну вразливість цих ґрунтів до кислотного навантаження. Проба № 7 з вирви характеризується нижчим ІКН (0,000866) відносно контрольної проби – 0,001713, але все ще порівняно високим, що підтверджує збереження прихованої кислотності після вибуху. У чорноземах Запорізької області (№ 2 – 0,000577; № 1 – 0,000384) та Донецької області (№ 5 – 0,000348). Проби № 3 (0,000193), а також ґрунт з передмістя Херсона № 6 (0,000181) та № 4 (0,000095) характеризуються низьким або дуже низьким ІКН, що відповідає нейтральним ґрунтам зі збереженою буферною здатністю.

Отже, на основі аналізу отриманих даних виділено такі рівні екологічного ризику:

– Зона високого ризику: дерново-підзолисті ґрунти Сумської області (проба з вирви). Після вибуху ІКН є досить висо-

Таблиця 3

Порівняльні результати активної та обмінної кислотності

№ проби	Активна кислотність (рН _{H₂O})	Обмінна кислотність (рН _{KCl})	Відхилення від природної норми	Інтерпретація
№ 1	6,76 ± 0,05	6,52 ± 0,05	нижче нейтральної (6,5–7,2)	локальне підкислення, зниження буферної здатності
№ 2	6,41 ± 0,05	6,46 ± 0,05	нижче нейтральної (6,5–7,2)	підкислення, порушення іонного обміну
№ 3	7,13 ± 0,05	7,01 ± 0,05	відповідає нормі	стабільний стан, без впливу
№ 4	7,09 ± 0,05	6,72 ± 0,05	відповідає нормі	нейтральна реакція, слабкий вплив
№ 5	7,33 ± 0,05	6,74 ± 0,05	відповідає нормі (7,0–7,5)	нормальний стан, але бурий фільтрат → органічне забруднення
№ 6	7,01 ± 0,05	6,63 ± 0,05	відповідає нормі	нейтральна реакція, незначне підкислення
№ 7	6,81 ± 0,05	5,37 ± 0,05	активна кислотність вище норми, обмінна нижча	хімічне насичення продуктами вибуху, порушення іонного балансу

Таблиця 4

Індекс кислотного навантаження та порівняння прихованої кислотності

№ проби	Активна кислотність (рН _{H₂O})	Гідролітична [H ⁺], ммоль/л	ІКН	Ризик
№ 1	6,76 ± 0,05	0,0026 ± 0,0002	0,000384	помірний
№ 2	6,41 ± 0,05	0,0037 ± 0,0003	0,000577	помірно-високий
№ 3	7,13 ± 0,05	0,0014 ± 0,0001	0,000193	низький
№ 4	7,09 ± 0,05	0,0007 ± 0,0001	0,000095	дуже низький
№ 5	7,33 ± 0,05	0,0024 ± 0,0002	0,000348	помірний
№ 6	7,01 ± 0,05	0,0013 ± 0,0001	0,000181	низький
№ 7	6,81 ± 0,05	0,0059 ± 0,0004	0,000866	високий

Примітка: джерело порогів: дуже високий > 0,001; високий 0,0008–0,001; помірно-високий 0,0006–0,0008; помірний 0,0003–0,0006; низький 0,00015–0,0003; дуже низький < 0,00015 (ДСТУ..., 2004)

ким, активна кислотність (pH_{H_2O}) підвищена до нейтральнішої, тоді як гідролітична кислотність залишається значною. Це типовий профіль після вибуху: розчин насичений продуктами детонації, а поглинальний комплекс утримує кислотні форми іонів. Рекомендовані цільові заходи ремедіації (вапнування, внесення органо-мінеральних амендаторів, моніторинг Al^{3+}). Слід зазначити, що в зоні дуже високого ризику знаходяться дерново-підзолисті ґрунти Сумської області. Високий ІКН без техногенного впливу свідчить про природну структурну вразливість до додаткового кислотного навантаження, високий ризик для кореневих систем, зумовлений токсичністю Al^{3+} та вилуговування базових катіонів.

– Зона помірного ризику: чорноземи Запорізької та Донецької областей, характеризуються підвищеною прихованою кислотністю, що потребує превентивних дій (локальне вапнування, контроль базових катіонів, повторні вимірювання після опадів). Помірні значення ІКН свідчать про підкислення вбирного комплексу чорноземів – нетипове для природно нейтральних ґрунтів.

В таких ґрунтах можливе зниження доступності Ca^{2+}/Mg^{2+} та підвищення рухливості металів у мікрозонах.

– Зона низького ризику: контрольні проби чорноземів Запорізької області, каштанових ґрунтів поблизу Херсона та чорноземів поблизу м. Покровськ. Отримані результати відповідають природним показникам кислотності, потребують підтримувального моніторингу; додатково слід вивчити супутні забруднювачі (органічні та металеві вклучення).

Таким чином, інтегрований аналіз кислотно-основних властивостей та індексу кислотного навантаження дозволяє не лише оцінити локальні зміни рН, але й визначити приховану кислотність та потенційні ризики для ґрунтового поглинального комплексу.

Обговорення

Отримані результати дослідження кислотності ґрунтових розчинів проб, які відібрані з вирв поблизу населених пунктів Запорізької, Донецької, Херсонської та Сумської областей свідчать про суттєві зміни кислотно-основних властивостей ґрунтів під впливом вибухових процесів та речовин, зокрема проби № 1 та № 2 характеризуються зниженням активної та обмінної кислотності порівняно з контрольними значеннями характерними для чорноземів,

що вказує на локальне підкислення та порушення буферної здатності в результаті техногенного навантаження. Подібні тенденції підтверджуються дослідженнями описаними (Khomiak et al., 2025), які показали, що вибухи спричинені безпілотними літальними апаратами, призводять до підвищення концентрації іонів H^+ у ґрунтовому розчині та зміни напрямків сукцесії рослинності на території Полісся.

У Сумській області контрольні проби дерново-підзолистих ґрунтів мають кислу реакцію ($pH \approx 5,3$), що відповідає даним про природну кислотність поліських ґрунтів (Зайцев та ін., 2022). Однак аналіз змішаної проби з вирви № 7 показав підвищення активної кислотності до нейтральних значень ($pH_{H_2O} \approx 6,8$) при одночасному зниженні обмінної кислотності. Це свідчить про хімічне насичення ґрунтового розчину продуктами детонації та порушення іонного балансу. Подібні явища описані щодо забруднення ґрунтів Харківської області (Solokha et al., 2025), де зазначено, що військові дії в Україні спричиняють довготривале забруднення ґрунтів вибуховими сполуками, які змінюють кислотно-основний режим і знижують родючість ґрунтів.

Дані з Донецької області (проби № 4 та № 5) та Херсону (проба № 6) показали відносно стабільні значення активної кислотності ($pH_{H_2O} = 7,0-7,3$), проте обмінна кислотність була нижчою, що свідчить про приховане порушення ґрунтового вбирного комплексу. Це узгоджується з висновками (Krainiuk et al., 2025), які вказують, що воєнні операції призводять до накопичення важких металів та токсичних сполук у ґрунтах, що може не одразу проявлятися у зміні активного рН, але суттєво впливає на буферні властивості ґрунтового розчину та рухливість біогенних іонів.

Важливим показником є співвідношення гідролітичної кислотності до активної (ІКН). Подібні результати наведені у роботі (Hryhoriv et al., 2024), де показано, що зміни буферної здатності ґрунтів під впливом антропогенних факторів призводять до накопичення прихованої кислотності та підвищення токсичності Al^{3+} .

Отримані результати також демонструють тісний взаємозв'язок між змінами кислотності ґрунтів та активністю біогенних та важких металів, Зниження обмінної кислотності створює умови для підвищеної рухливості іонів Ca^{2+} , Mg^{2+} та K^+ , що є критично важливими для підтримання життєдіяль-

ності фітоценозів, Водночас підвищення гідролітичної кислотності сприяє мобілізації токсичних форм Al^{3+} та Fe^{2+} , які у високих концентраціях можуть пригнічувати розвиток кореневої системи рослин. Подібні закономірності описані у роботах (Hryhoriv et al., 2024), де показано, що підвищення прихованої кислотності ґрунтів призводить до зростання токсичності алюмінію та зниження доступності базових катіонів.

Важкі метали, такі як Pb, Cd та Zn, накопичуються у верхніх горизонтах ґрунту під впливом вибухових процесів, що посилюється при зниженні рН. Отримані у роботі результати підтверджують цю тенденцію: у пробах № 1 та № 2 зафіксовано зниження обмінної кислотності, що може сприяти підвищеній рухливості важких металів і їхньому переходу у ґрунтовий розчин. Це створює ризики вторинного забруднення ґрунтових вод та довготривалої токсичності для агроєкосистем (Kabata-Pendias, 2011; Онишук та ін., 2025).

Здатність ґрунту до акумуляції шкідливих речовин також залежить від його кисло-основного режиму. Підвищена гідролітична кислотність у пробі № 7 свідчить про накопичення іонів H^+ та Al^{3+} у ґрунтовому поглинальному комплексі, що знижує його буферну здатність і підвищує ризик акумуляції токсичних сполук. Це узгоджується з висновками (Сплодитель та ін., 2023), які зазначають, що вибухові речовини TNT, RDX та HMX здатні тривалий час зберігатися у ґрунтах, утворюючи стійкі комплекси з органічною речовиною та мінеральними часточками (Mystrioti & Papassiori, 2024).

Щодо потенціалу самовідновлення ґрунтів, результати показують, що чорноземи Запорізької та Донецької областей мають відносно високий рівень буферної здатності, що дозволяє їм частково компенсувати кислотне навантаження. Це підтверджується даними (Mystrioti & Papassiori, 2024), де зазначено, що чорноземи завдяки високому вмісту гумусу здатні до поступового відновлення кисло-основного балансу. Водночас дерново-підзолисті ґрунти Сумщини характеризуються низькою буферною здатністю, що обмежує їхню здатність до самовідновлення і потребує застосування ремедіаційних заходів (вапнування, внесення органічних амендаторів).

Таким чином, отримані результати узгоджуються з даними сучасних досліджень і підтверджують, що вибухові процеси призводять до комплексної трансформації кисло-ос-

новних властивостей ґрунтів. Найбільш небезпечні зміни спостерігаються у чорноземах Запорізької області та дерново-підзолистих ґрунтах Сумщини, де фіксується зниження обмінної кислотності та підвищення гідролітичної. Це створює ризики для агроєкосистем, знижує доступність біогенних елементів і підвищує токсичність середовища. Потенціал самовідновлення залежить від типу ґрунту: чорноземи мають відносно високі компенсаторні можливості, тоді як дерново-підзолисті ґрунти залишаються найбільш вразливими. Це підкреслює необхідність системного моніторингу та розробки стратегій ремедіації для збереження стійкості ґрунтових екосистем у постконфліктних регіонах.

Висновки

1. Вибухові процеси суттєво трансформують кисло-основні властивості ґрунтів. У пробах із Запорізької та Сумської областей зафіксовано зниження обмінної кислотності та підвищення гідролітичної, що свідчить про накопичення іонів H^+ та Al^{3+} у ґрунтовому вбирному комплексі та порушення його буферної здатності.

2. Індекс кислотного навантаження (ІКН) підтверджує наявність прихованої кислотності. Найвищі значення ІКН зафіксовано у дерново-підзолистих ґрунтах Сумщини, що вказує на їхню природну вразливість до кислотного навантаження. У чорноземах Запорізької області ІКН є помірним, але перевищує контрольні значення, що свідчить про техногенний вплив вибухів.

3. Зміни кислотності корелюють із рухливістю біогенних та важких металів. Зниження обмінної кислотності сприяє мобілізації токсичних форм Al^{3+} та Fe^{2+} , а також підвищує рухливість Pb, Cd та Zn. Це створює ризики вторинного забруднення ґрунтових вод та зниження доступності Ca^{2+} , Mg^{2+} і K^+ для рослин. Зокрема, активна кислотність у більшості проб залишається близькою до нейтральної, але обмінна кислотність систематично нижча, що є індикатором порушення ґрунтового вбирного комплексу.

4. Здатність ґрунтів до акумуляції шкідливих речовин залежить від їхнього типу. У дерново-підзолистих ґрунтах Сумської області спостерігається висока схильність до накопичення токсичних компонентів через низьку буферну здатність. Чорноземи Запорізької та Донецької областей демонструють відносно вищу стійкість, проте також зазнають локальних змін кислотності.

5. Потенціал самовідновлення ґрунтів є диференційованим. Чорноземи завдяки

високому вмісту гумусу мають здатність частково компенсувати кислотне навантаження та поступово відновлювати кислотно-основний баланс. Дерново-підзолисті ґрунти залишаються найбільш вразливими та потребують застосування ремедіаційних заходів (вапнування, внесення органічних амендаторів).

6. Екологічні ризики мають довготривалий характер. Отримані результати узгоджуються з міжнародними дослідженнями, які показують, що вибухові речовини TNT, RDX та HMX здатні тривалий час зберігатися у ґрунтах, змінюючи їхні кислотно-ос-

новні властивості та створюючи загрозу для агроєкосистем і ґрунтових вод.

Таким чином, дослідження підтверджує, що трансформація кислотно-основних властивостей ґрунтів унаслідок вибухових процесів є комплексним явищем, яке охоплює зміни буферної здатності, рухливість біогенних та важких металів, акумуляцію токсичних речовин і потенціал самовідновлення. Це підкреслює необхідність системного моніторингу та розробки диференційованих стратегій ремедіації для збереження стійкості ґрунтових екосистем у постконфліктних регіонах.

Список використаної літератури

ДСТУ 4362:2004 «Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів». Наказ від 09.12.2004 № 273. [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67099 (дата звернення 22.12.2025)

Зайцев Ю.О., Грищенко О.М., Романова С.А., Зайцева І.О. Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського районів Сумської обл. *Агроєкологічний журнал*. 2022. № 3. С. 136–149. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.32022.266419>

Кучер А. Методика оцінювання збитків, завданих збройною агресією земельному фонду та ґрунтам: проблеми та напрями вдосконалення. *Journal of Innovations and Sustainability*. 2022. Vol. 6(2). P. 10. <https://doi.org/10.51599/is.2022.06.02.10>.

Онищук І. П., Кичкирук О. Ю., Гаврилова А. М. Визначення вмісту іонів важких металів у ґрунтах, трансформованих у результаті вибухів. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 13. С. 381–393. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.36>.

Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна А. Вплив війни Росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. Київ : ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія»», 2023. 154 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii2.pdf> (дата звернення 22.12.2025).

Bernstein A., Ronen Z. Biodegradation of the Explosives TNT, RDX and HMX. In book: *Microbial Degradation of Xenobiotics*. 2011. P. 135–176. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23789-8_5.

Hryhoriv Y., Butenko A., Solovei H., Filon V., Skydan M., Kravchenko N., Masyk I., Zakharchenko E., Tykhonova O., Polyvaniy A. Study of the Impact of Changes in the Acid-Base Buffering Capacity of Surface Sod-Podzolic Soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. 25(6). P. 73–79. <https://doi.org/10.12911/22998993/186928>.

Hulich M.P., Kharchenko O.O., Yemchenko N.L., Olshevska O.D., Lyubarska L.S. The war in Ukraine: the problem of heavy metal contamination of agricultural land and products. Аналіз літературних даних. *Environment & Health*. 2024. 4(113). P. 38–44. <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.038>.

Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 2011. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>.

Khomiak I.V., Onyshchuk I.P., Kychkyruk O.Y., Vakerych M.M., Hasynets Y.S., Schwartau V.V. The impact of strike UAV explosions on soil acidity and vegetation dynamics. *Biosystems Diversity*. 2025. Vol. 33 No. 2. <https://doi.org/10.15421/012530>.

Krainskiy O.V., Buts Y.V., Ponomarenko R.V., Asotskiy V.V., Darmofal E.A., Kalynovskiy A.Y., Maniuk V.V. Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2025. 34(2). P. 304–317. <https://doi.org/10.15421/112526>.

Mystrioti C., Papassiopi N. A comprehensive review of remediation strategies for soil and groundwater contaminated with explosives. *Sustainability*. 2024. 16(3) P. 961. <https://doi.org/10.3390/su16030961>.

Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*. 2022. 837. P. 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>.

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

Solokha M., Melnyk O., Cannon N., Horton M., Datsko O., O'Connor D. Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of The Total Environment*. 2025. 995. 180105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180105>.

Yakymchuk A., Balanda O., Bzowska-Bakalarz M. Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals. *Scientific Papers of Silesian University of Technology*. 2024. 196. P. 667–685. <http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2024.196.45>.

References

DSTU 4362:2004. (2004). *Yiakist gruntiv. Pokaznyky rodiuchosti gruntiv* [Soil quality. Indicators of soil fertility]. State Committee for Technical Regulation and Consumer Policy of Ukraine. [Electronic resource] https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67099 (access date 22.12.2025) [in Ukrainian].

Zaitsev, Y.O., Hryshchenko, O.M., Romanova, S.A., & Zaitseva, I.O. (2022). Vplyv boiovykh dii na vmist valovykh form vazhkykh metaliv u hruntakh Sumskoho ta Okhtyrskoho raioniv Sumskoi obl [The impact of military actions on the content of total forms of heavy metals in the soils of Sumy and Okhtyrka districts of Sumy region]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological Journal]*, (3), 136–149. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.32022.266419> [in Ukrainian].

Kucher, A. (2022). Metodyka otsiniuvannia zbytkiv, zavdanykh zbroinoiu ahresiieiu zemelnomu fondu ta gruntam: problemy ta napriamy vdoskonalennia [Methodology for assessing damage caused by armed aggression to the land fund and soils: problems and directions for improvement]. *Journal of Innovations and Sustainability*, 6(2), 10. <https://doi.org/10.51599/is.2022.06.02.10> [in Ukrainian].

Onyshchuk, I. P., Kychkyruk, O. Y., & Havrylova, A. M. (2025). Vyznachennia vmistu ioniv vazhkykh metaliv u hruntakh, transformovanykh u rezultati vybuchiv [Determination of the content of heavy metal ions in soils transformed as a result of explosions]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychuykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, (13), 381–393. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.36> [in Ukrainian].

Splodytel, A., Holubtsov, O., Chumachenko, S., & Sorokina, L. (2023). *Vplyv viiny Rosii proty Ukrainy na stan ukrainskykh gruntiv. Rezultaty analizu* [The impact of Russia's war against Ukraine on the state of Ukrainian soils. Analysis results]. NGO "Center for Environmental Initiatives "Ecoaction"". [Electronic resource] <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii2.pdf> (access date 22.12.2025) [in Ukrainian].

Bernstein, A., & Ronen, Z. (2011). Biodegradation of the explosives TNT, RDX and HMX. In *Microbial Degradation of Xenobiotics* (pp. 135-176). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23789-8_5 [in English].

Hryhoriv, Y., Butenko, A., Solovei, H., Filon, V., Skydan, M., Kravchenko, N., Masyk, I., Zakharchenko, E., Tykhonova, O., & Polyvanyi, A. (2024). Study of the impact of changes in the acid-base buffering capacity of surface sod-podzolic soils. *Journal of Ecological Engineering*, 25(6), 73–79. <https://doi.org/10.12911/22998993/186928> [in English].

Hulich, M. P., Kharchenko, O. O., Yemchenko, N. L., Olshevska, O. D., & Lyubarska, L. S. (2024). The war in Ukraine: The problem of heavy metal contamination of agricultural land and products. *Environment & Health*, 4(113), 38-44. <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.038> [in English].

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158> [in English].

Khomiak, I.V., Onyshchuk, I.P., Kychkyruk, O.Y., Vakerych, M.M., Hasynets, Y.S., & Schwartzau, V.V. (2025). The impact of strike UAV explosions on soil acidity and vegetation dynamics. *Biosystems Diversity*, 33(2). <https://doi.org/10.15421/012530> [in English].

Krainiuk, O.V., Buts, Y.V., Ponomarenko, R.V., Asotskyi, V.V., Darmofal, E.A., Kalynovskyi, A.Y., & Maniuk, V.V. (2025). Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 34(2), 304–317. <https://doi.org/10.15421/112526> [in English].

Mystrioti, C., & Papassiopi, N. (2024). A comprehensive review of remediation strategies for soil and groundwater contaminated with explosives. *Sustainability*, 16(3), 961. <https://doi.org/10.3390/su16030961> [in English].

Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, 837, 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865> [in English].

Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614> [in English].

Solokha, M., Melnyk, O., Cannon, N., Horton, M., Datsko, O., & O'Connor, D. (2025). Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of The Total Environment*, 995, 180105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180105> [in English].

Yakymchuk, A., Balanda, O., & Bzowska-Bakalarz, M. (2024). Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals. *Scientific Papers of Silesian University of Technology*, 196, 667–685. <http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2024.196.45> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 30.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.03.2026

Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

