

# ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ДЕГРАДАЦІЇ ГРУНТІВ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ ЗА КЛІМАТИЧНИМИ ТА АГРОЕКОЛОГІЧНИМИ ІНДИКАТОРАМИ

А.М. Ліщук, А.І. Парфенюк, Н.В. Карачинська, П.А. Яременко

*Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)*

*e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8339-9365*

*e-mail: verespar@ukr.net; ORCID: 0000-0003-0169-4262*

*e-mail: karachinskan051177@gmail.com; ORCID: 0000-0002-6571-8430*

*e-mail: pasha.yaremenko13@gmail.com; ORCID: 0009-0004-5828-7427*

*Стаття присвячена дослідженню процесів формування екологічних ризиків, зумовлених фізичною та хімічною деградацією ґрунтів у Лісостепу України під впливом зміни клімату та інтенсифікації сільського господарства. Метою дослідження є наукове обґрунтування та розробка Інтегрального індексу екологічного ризику ( $I_{ІЕР}$ ) для комплексної оцінки та картографування рівня деградації ґрунтів Лісостепу України в умовах кліматичної нестабільності. Методологія дослідження базується на системному підході та адитивному моделюванні трьох компонентів: кліматичного стресу (аридизації), антропогенного навантаження (розораність, еродованість) та деградаційної вразливості ґрунтів (вміст гумусу, баланс NPK). Проаналізовано масиви даних, що включають показники Українського гідрометеорологічного центру та результати державного агрохімічного моніторингу сільськогосподарських угідь. Доведено, що зростання середньорічної температури на  $1,2^{\circ}\text{C}$  за умови нестабільного зволоження спричиняє аридизацію територій східної частини Лісостепу ( $\text{ГТК} < 0,90$ ) та виникнення ризиків надмірного зволоження у його західній частині. Виявлено критичне антропогенне навантаження — рівень розораності угідь сягає  $80,8\%$ , що формує високий ризик ерозії для  $27,5\%$  орних земель. Багаторічний моніторинг підтвердив прогресивну дегуміфікацію (зниження вмісту гумусу від  $3,38\%$  до  $3,20\%$ ) та стабільну недостатність макроелементів, забезпеченість якими становить лише  $36\text{--}72\%$  від оптимуму. Розроблений індекс  $I_{ІЕР}$  дав змогу виділити осередки формування екологічного ризику в Лісостепу (Харківська, Полтавська та Черкаська обл.), де синергія природних та антропогенних чинників загрожувє незворотною втратою родючості ґрунту. Вперше для умов Лісостепу запропоновано уніфікований методичний підхід, що поєднує гідротермічні та агроєкологічні параметри в єдину прогностичну модель. Результати картографування за  $I_{ІЕР}$  є науковим інструментом для ідентифікації найменш стійких ланок агроєко-систем та обґрунтування переходу до систем регенеративного землеробства шляхом використання сучасних біологічно інтегрованих технологій.*

**Ключові слова:** інтегральний індекс ( $I_{ІЕР}$ ), зміна клімату, дегуміфікація, баланс макроелементів, розораність угідь, антропогенне навантаження, аридизація, регенеративне землеробство.

## ВСТУП

Деградація ґрунтового покриву є однією з найбільш глобальних екологічних проблем, що безпосередньо загрожувє світовій продовольчій безпеці, стійкості природних екосистем та концепції сталого землекористування. Протягом останніх десятиліть спостерігається стрімка експансія деградованих ландшафтів, зумовлена синергіч-

ним впливом природно-кліматичних змін, інтенсифікації аграрного виробництва та зростаючого антропогенного навантаження. Ці процеси спричиняють дестабілізацію біогеохімічних циклів, порушення водного режиму та істотну втрату природної родючості ґрунтів [1].

Український Лісостеп є одним із найпродуктивніших сільськогосподарських регіонів Східної Європи, що відіграє стратегічну роль у функціонуванні національ-

них та глобальних продовольчих систем. Домінуювальні в структурі ґрунтового покриття чорноземи характеризуються високим біопродуктивним потенціалом, проте за умов інтенсивного землеробства вони зазнають деградаційних процесів. На сьогодні проблема деградації ґрунтів у регіоні стоїть особливо гостро через поєднання високого рівня розораності угідь, який у багатьох районах перевищує 80%, та посилення кліматичної нестабільності [2].

Інтенсивний обробіток та тривале антропогенне навантаження істотно підвищують ризики водної і вітрової ерозії, дегуміфікації та незворотного порушення структурно-агрегатного стану ґрунтів [3]. Окрім традиційних чинників виснаження, сучасні агроєкосистеми зазнають додаткового навантаження внаслідок нерівномірного розподілу опадів та техногенного забруднення, що призводить до стрімкого зниження вмісту органічної речовини. Національні оцінки підтверджують, що масштабне поширення цих процесів створює реальні загрози для довгострокової стійкості сільськогосподарського виробництва та екологічної стабільності ландшафтів [4], що вимагає негайного перегляду існуючих систем моніторингу та розробки новітніх підходів до оцінки екологічних ризиків.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю створення уніфікованого інструментарію для оцінки складних багатофакторних ризиків деградації ґрунтів. Традиційні методи часто фокусуються на ізольованих показниках, не враховуючи їхньої кумулятивної дії. В умовах інтеграції України до Європейської екологічної мережі та реалізації Стратегії сталого розвитку, розробка інтегрованих індексів стає критично важливою для пріоритизації відновлювальних заходів та забезпечення екологічної безпеки землекористування [5; 6]. Не вирішеним залишається питання розробки методології оцінки сукупного екологічного ризику, що базується на поєднанні кліматичних чинників, інтенсивності антропогенного навантаження на агроєкосистеми та показників хімічного стану

ґрунтів у межах цілісної прогностичної моделі. Це особливо гостро відчувається в Лісостепу України, де складні взаємодії між деструктивними чинниками перешкоджають ефективному плануванню заходів із пом'якшення наслідків деградації.

**Метою роботи** є наукове обґрунтування та розробка Інтегрального індексу екологічного ризику ( $I_{\text{ІЕР}}$ ) для комплексної оцінки та картографування ступеня деградації ґрунтів Лісостепу України.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання оцінки екологічних ризиків та моніторингу деградації земель перебувають у центрі уваги світової наукової спільноти. Фундаментальні підходи до моделювання деградаційних процесів закладені у працях G. Dinesh та K. Kopittke та ін. [7; 8], які акцентують увагу на нерозривному взаємозв'язку між здоров'ям ґрунту, секвестрацією вуглецю та природно-кліматичними змінами. Методологічну базу для європейської системи моніторингу ерозії сформували дослідження P. Panagos зі співавт., проведені в межах Спільного дослідницького центру Європейської Комісії (JRC), які наразі адаптуються до нових тенденцій екологічної політики ЄС [9].

Сучасні наукові розробки зосереджені на детальному вивченні окремих чинників деградації: механізмів ерозії, формування водного дефіциту та зміни гідрологічних властивостей ґрунтів [10]. Важливим вектором є розвиток концепції «вуглецевого сліду» та використання біомеліорантів для відновлення деградованих агроєкосистем [8]. Питання хімічної деградації, акумуляції важких металів та стійкості ландшафтів до техногенного тиску висвітлені у роботах А. Ліщук зі співавт. [11–13], О. Biedunkova зі співавт. [2] та ін.

Окремим важливим вектором для України є оцінка катастрофічних наслідків воєнних дій для ґрунтового покриття та адаптація європейських заходів щодо відновлення земель, які викладено у працях таких дослідників, як: Є. Бережияк та ін. [14], N. Didenko [15], Т. Чайка та І. Корот-

кова [16]. Фундаментальний внесок у дослідження еволюції та сталого управління чорноземами Лісостепу зробили українські видатні вчені С. Балюк, Л. Воротинцева, Л. Соловей та ін. [4], О. Тараріко зі співавт. [17], які обґрунтували закономірності деґуміфікації та агрофізичного виснаження ґрунтів.

Водночас у міжнародній практиці для аналізу вразливості екосистем домінує використання мультикритеріальної оцінки (МСДА), аналізу змін землекористування (LULC) та дистанційного зондування [6; 18]. Такі підходи дають можливість формувати інтегральні індекси ризику, що відображають сумарну дію стресорів і слугують основою для визначення пріоритетів управління.

Попри значні напрацювання, для агро-екосистем Українського Лісостепу подібні інтегровані моделі залишаються недостатньо опрацьованими. Невирішена частина загальної проблеми полягає у відсутності системного підходу до оцінки екологічних ризиків, який би об'єднував кліматичні параметри, інтенсивність землекористування та геохімічну чутливість ґрунтів у єдину прогностичну модель. Зокрема, існуючі методики не повною мірою враховують синергію між природними та антропогенними стресорами, що ускладнює прогнозування ймовірності незворотних трансформацій ґрунтового покриву [3; 5].

Для розв'язання зазначеної науково-методичної проблеми у дослідженні запропоновано Інтегральний індекс екологічного ризику ( $I_{ІЕР}$ ). Цей інструмент дає змогу кількісно верифікувати комплексний екологічний ризик шляхом синтезу даних про клімат, землекористування та хімічну стійкість ґрунтів.

Застосування алгоритмів цифрового картографування забезпечує візуалізацію просторового розподілу екологічних ризиків.

Це є підґрунтям для прийняття рішень щодо впровадження регенеративних технологій, спрямованих на відновлення деґрадованих агроекосистем та забезпечення їхнього сталого розвитку.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом дослідження є зона Лісостепу України (площа близько 202 тис. км<sup>2</sup>), де понад 70% території становлять сільськогосподарські угіддя. Для аналізу обрано сім репрезентативних областей (Вінницьку, Київську, Полтавську, Сумську, Харківську, Хмельницьку та Черкаську), ландшафти яких характеризуються високим біопродуктивним потенціалом і водночас інтенсивним розвитком деґрадаційних процесів. Клімат досліджуваного регіону помірно континентальний із середньорічною температурою повітря 7,5–9,5°C та річною сумою опадів 450–650 мм. Ґрунтовий покрив представлений переважно чорноземами типовими та опідзоленими, які за умов інтенсивного обробітку та кліматичної нестабільності виявляють високу вразливість до водної ерозії та деґуміфікації.

Інформаційною базою дослідження слугували моніторингові дані за період 2006–2022 рр.: показники гідротермічного режиму (за даними Українського гідрометеорологічного центру, URL: <https://www.meteo.gov.ua/>); результати ІХ–ХІ турів агрохімічного обстеження щодо вмісту гумусу, легкогідролізованого азоту та рухомих сполук фосфору і калію (згідно зі звітами ДУ «Держґрунтоохорона» [19–21]); а також статистичні відомості щодо структури угідь, рівня розораності та динаміки еродованих земель (Держстат України, URL: <https://ukrstat.gov.ua>).

Методичний підхід ґрунтується на концепції S. Andrews та ін. [22] і полягає у розрахунку Інтегрального індексу екологічного ризику ( $I_{ІЕР}$ ) за адитивною моделлю. Модель визначає загальний рівень екологічного ризику як результат синергічного впливу кліматичної експозиції (Е), антропогенного навантаження (Н) (через інтенсивність землекористування) та деґрадаційної вразливості ґрунтів (Д) за формулою:

$$I_{ІЕР} = (E + H + D) / 3, \quad (1)$$

де Е, Н, Д – нормовані значення кліматичної експозиції (стресу), антропогенного

навантаження та деградаційної вразливості ґрунтів відповідно.

Синергічна взаємодія цих чинників, що лежить в основі розрахунку інтегрального індексу екологічного ризику ( $I_{ІЕР}$ ), допомагає провести просторову диференціацію рівнів екологічної небезпеки.

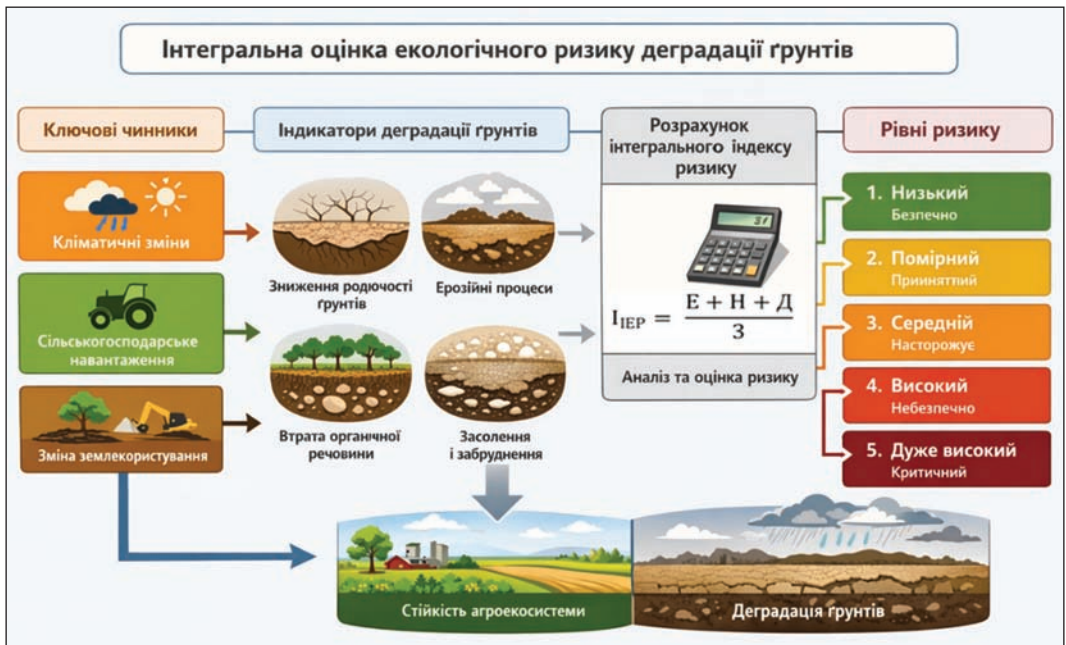
Оцінку кліматичного впливу ( $E$ ) здійснювали за відомою формулою розрахунку гідротермічного коефіцієнта Селянинова (ГТК) упродовж вегетаційного періоду (квітень–серпень). Показники антропогенного навантаження ( $H$ ) та деградаційної вразливості ґрунтів ( $D$ ) розраховували на основі фактичних значень розораності, еродованості [23] та дефіциту гумусу і макролементів відносно оптимальних значень (6,2% для гумусу [24] та ДСТУ 4362:2004 для NPK). Такий підхід дає змогу оцінити кумулятивний ефект чинників, що зумовлюють втрату родючості агроєкосистем.

Статистичну обробку даних виконано у середовищі MS Excel.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

**Обґрунтування інтегрованої моделі та шкали оцінювання екологічних ризиків.** Оцінка екологічної безпеки агроєкосистем потребує переходу від аналізу поодиноких параметрів до системного вимірювання синергічного впливу кліматичних та антропогенних чинників. Розроблена концептуальна модель інтегральної оцінки екологічного ризику деградації ґрунтів (рис. 1) базується на взаємодії кліматичного стресу, антропогенного тиску та деградаційної вразливості ґрунтового покриву. Зокрема, вона враховує гідротермічну мінливість середовища, інтенсивність землекористування (розораність та еродованість територій), а також стан ґрунтового гомеостазу за показниками вмісту гумусу та балансу поживних речовин (NPK).

Для кількісної оцінки та інтерпретації значень Інтегрального індексу екологічного ризику ( $I_{ІЕР}$ ) нами розроблено п'яти-



**Рис. 1.** Концептуальна схема інтегральної оцінки екологічного ризику деградації ґрунтів у Лісостепу України

Примітка: побудовано авторами.

бальну шкалу (від 1 до 5 балів), що класифікує рівні екологічної небезпеки та визначає пріоритетні напрями щодо управління агроекосистемами (табл. 1).

Дана шкала інтерпретації  $I_{ІЕР}$  ґрунтується на принципах лінійного нормування показників та адаптована до екологічних порогів стійкості чорноземних ґрунтів Лісостепу України [22]. Розподіл на класи проведено з кроком 0,20, що відповідає загальноприйнятій методології побудови інтегральних індексів і дає змогу диференціювати агроекосистеми від стану динамічної рівноваги ( $I_{ІЕР} \leq 0,20$ ) до критичної деградації ( $I_{ІЕР} \geq 0,81$ ). Значення індексу понад 0,80 свідчать про перетин критичної межі стійкості, за якої екосистема втрачає здатність до самовідновлення та потребує негайної реабілітації.

**Формування екологічних ризиків деградації ґрунтів за умов зміни клімату у Лісостепу України.** Екологічні ризики деградації ґрунтів в Україні формуються під впливом кліматичних трансформацій, які в зоні Лісостепу виражені поєднанням висхідних температурних трендів та дестабілізацією режиму зволоження. Аналіз міжрічної мінливості метеорологічних показників за період 2006–2022 рр. підтверджує тенденцію до підвищення серед-

ньорічної температури повітря на  $+1,2^{\circ}\text{C}$  відносно кліматичної норми. Особливо критичним виявився 2020 р., коли температурна аномалія сягнула  $+2,8^{\circ}\text{C}$  (Український гідрометеорологічний центр, URL: <https://meteo.gov.ua>). Гідротермічна динаміка останнього десятиліття свідчить про істотні коливання кількості опадів, що у поєднанні з високим термічним режимом призводить до інтенсифікації випаровування. За даними FAO [25], такі умови спричиняють поступове зміщення меж зон достатнього зволоження на північ країни. Фактично територія Лісостепу набуває гідротермічних ознак, характерних для більш посушливої зони Степу, що в науковій літературі класифікується як процес аридизації та зміни кліматичних меж агроландшафтів.

Такі трансформації навколишнього середовища, що широко дискутуються у науковій спільноті, створюють низку екологічних ризиків, як-от дефіцит продуктивної вологи, фізична деградація, агротехнологічні ризики тощо. Насамперед дефіцит продуктивної вологи та підвищення середньодобових температур у поєднанні з сухими вітрами та малосніжними зимами призводить до виснаження запасів ґрунтової вологи. Інтенсивне випаровування та пере-

Таблиця 1. Шкала інтерпретації Інтегрального індексу екологічного ризику

Значення $I_{ІЕР}$	Бал	Рівень ризику	Характеристика стану та рекомендації щодо управління
$\leq 0,20$	1	Низький	Стійкий стан агроекосистеми. Самовідновлення домінує над антропогенним навантаженням
0,21–0,40	2	Помірний	Початкові ознаки дегуміфікації або ерозії. Потребує постійного моніторингу та впровадження превентивних ґрунтозахисних заходів
0,41–0,60	3	Середній	Структурна трансформація ґрунту, яка потребує перегляду інтенсивності землекористування та впровадження елементів регенеративного землеробства
0,61–0,80	4	Високий	Істотне порушення екологічних функцій ґрунту, що потребує впровадження комплексних меліоративних заходів та обмеження обробітку
$\geq 0,81$	5	Дуже високий	Загроза незворотної втрати родючості та екологічної стійкості агроекосистем. Потребує термінового виведення земель з інтенсивного обробітку та їх реабілітації

сихання верхнього шару ґрунту посилюють процеси фізичного «вивітрювання» та втрату структурної цілісності ґрунту. Агротехнологічні ризики посилюються за обмеження потенціалу проростання насіння та пригнічення розвитку озимих культур через нестачу вологи в критичні фази вегетації.

В умовах дефіциту природного зволоження зростання температурного режиму перетворюється з позитивного чинника теплозабезпечення на деструктивний чинник стресу для агроценозів. Ситуація ускладнюється низьким рівнем адаптації: наразі лише 2% орних земель України забезпечені системами зрошення, що значно підвищує екологічну вразливість агроєкосистем Лісостепу до кліматичних флуктуацій.

**Просторова диференціація та екологічні наслідки кліматичної мінливості.** Аналіз даних ГТК свідчить про чітку територіальну неоднорідність, за якої західні регіони (Хмельницька обл.) та центральні (Вінницька й Київська обл.) характеризуються ризиком періодичного перезволоження, тоді як східна частина Лісостепу (Сумська, Полтавська та Харківська обл.) демонструє стійку тенденцію до аридизації (ГТК < 1,0) (табл. 2).

Сучасні кліматичні зміни мають подвійний вплив на агроєкосистеми регіону [26]. До умовно позитивних наслідків належать покращання умов перезимівлі озимих культур через зростання середньозимових температур та можливість культивування продуктивніших пізньостиглих гібридів завдяки подовженню вегетаційного періоду. Однак ці переваги повністю нівелюються домінуючими деструктивними процесами, як-от інтенсифікація дегуміфікації та активізація ерозії.

Інтенсифікація дегуміфікації обумовлена підвищенням температури ґрунту, що прискорює мікробіологічну мінералізацію органічної речовини. Згідно з даними ДУ «Держґрунтоохорона» [21], ерозійні втрати гумусу сягають 1,38 т/га, що призводить до критичного зниження врожайності. Активізацію ерозії спричиняють нерівномірність опадів та посилення посушливості, що провокують водну та вітрову ерозію, виснажуючи біопродуктивний потенціал чорноземів швидше, ніж агроценози встигають адаптуватися.

Тому, кліматична мінливість постає первинним чинником експозиції, який в умовах інтенсивного антропогенного тиску

Таблиця 2. Гідротермічні характеристики та ймовірність екстремальних умов у Лісостепу України (середньобагаторічні значення за квітень–серпень)

Область	ГТК	Ймовірність сухих років (%)	Ймовірність перезвожених років (%)	Домінуючий кліматичний ризик
Вінницька	1,25	0	25	Помірний ризик перезволоження
Київська	1,05	5	25	Нестійке зволоження, ризик перезволоження
Полтавська	0,90	20	0	Аридизація, помірний ризик посухи
Сумська	0,95	10	0	Нестійке зволоження з тенденцією до аридизації
Харківська	0,85	35	0	Високий ризик аридизації та жорстких посух
Хмельницька	1,28	0	40	Високий ризик перезволоження
Черкаська	0,90	20	0	Аридизація, помірний ризик посухи

*Примітки:* значення < 1,0 вказують на ризик виникнення посухи та підвищену ймовірність розвитку процесів деградації ґрунтів, пов'язаних з аридизацією, > 1,2 – про надмірне зволоження.

трансформується у комплексний екологічний ризик.

**Екологічні ризики фізичної деградації ґрунтів.** Окрім абіотичних чинників, формування екологічних ризиків істотно зумовлено недосконалим управлінням землекористуванням: надмірним механічним обробітком, незбалансованим внесенням агрохімікатів та дефіцитом органічних добрив. Оцінювання ризиків у нашому дослідженні базувалося також на інтегрованому аналізі фізичної (ерозія, ущільнення) та хімічної (дегуміфікація, дисбаланс NPK) деградації.

Фізична деградація ґрунтів є домінуючим джерелом екологічних ризиків у агро-екосистемах, що проявляється через деструкцію ґрунтової структури, переущільнення орного шару та прогресивне погіршення водно-фізичних властивостей. Основним чинником цих негативних процесів є висока розораність земель. Аналіз динаміки за 2006–2020 рр. демонструє стрімке зростання частки ріллі в усіх природно-кліматичних зонах України. Найвираженіша тенденція зафіксована на Поліссі (з 34,1% до 65,7%), тоді як у зонах Лісостепу та Степу рівень розораності досяг критичних значень — 80,8% і 81,2% відповідно (рис. 2).

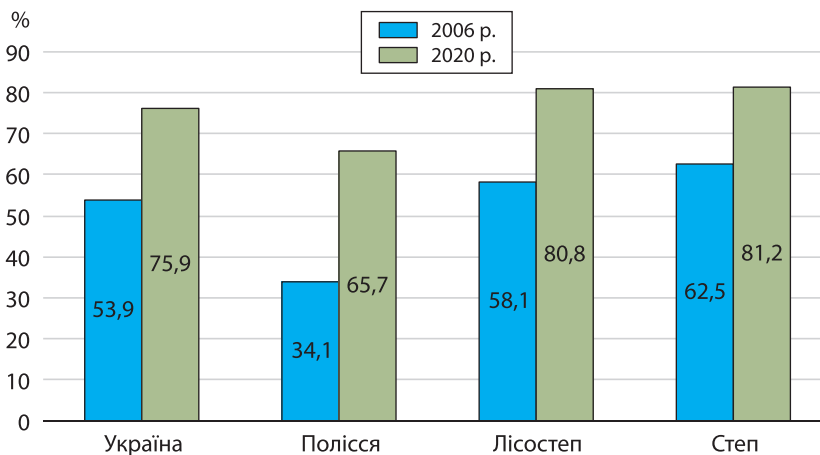
Надмірна антропогенна трансформація угідь у поєднанні з механічним тиском

сільськогосподарської техніки провокує структурну нестабільність ґрунтового покриття. За нашими розрахунками, приблизно 27,5% орних земель регіону зазнали впливу ерозійних процесів. Найвища концентрація еродованих площ зафіксована у Вінницькій, Харківській та Хмельницькій обл. (рис. 3).

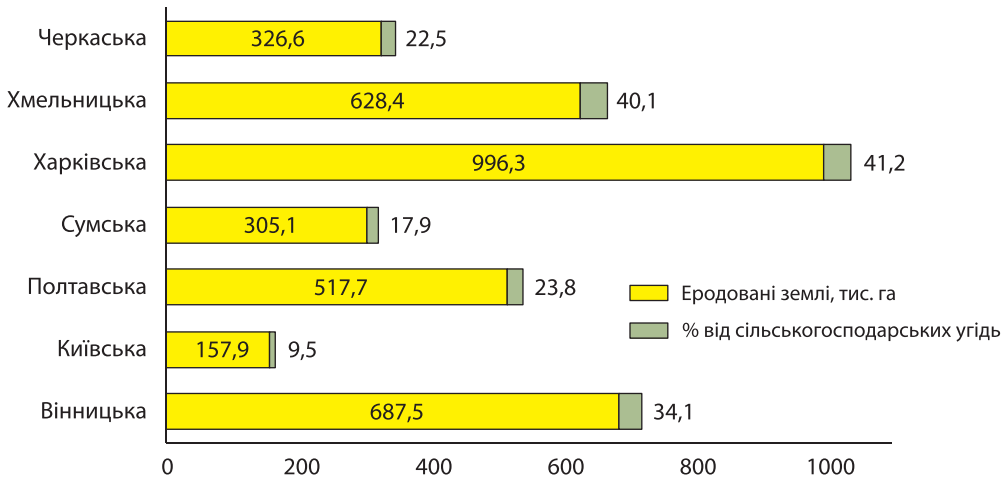
Синергія високої розораності та ерозійних процесів формує стійкий тренд до зниження екосистемної стійкості ґрунтів. Фізична деградація у таких умовах призводить до: втрати агрегатної стабільності та розпилення структури ґрунту; зниження інфільтраційної здатності, що обмежує поглинання атмосферних опадів та посилює поверхневий стік; зменшення потенційної родючості через вимивання дрібнодисперсних часток та органічної речовини.

Отже, сформований високий рівень екологічного ризику фізичної деградації стає бар'єром для сталого ведення сільського господарства в регіоні, вимагаючи негайного впровадження ґрунтозахисних технологій та оптимізації структури угідь.

**Екологічні ризики хімічної деградації ґрунтів та дефіциту макроелементів.** Екологічні ризики, спричинені хімічною деградацією ґрунтів, передусім пов'язані з порушенням балансу поживних речовин та інтенсивною дегуміфікацією. Головним



**Рис. 2.** Площа ріллі та її частка у структурі сільськогосподарських угідь у регіонах Лісостепу  
Примітка: розраховано і побудовано авторами за даними Держстату України (URL: <https://ukrstat.gov.ua>).



**Рис. 3.** Частка еродованих сільськогосподарських земель у регіонах Лісостепу (тис. га, %)

*Примітка:* розраховано і побудовано авторами за даними Держстату України (URL: <https://ukrstat.gov.ua>; URL: <https://land.gov.ua>).

індикатором стійкості агроєкосистеми залишається вміст гумусу, від якого безпосередньо залежить екологічна стабільність агроєкосистеми [2].

Аналіз даних агрохімічного обстеження (IX–XI тури, 2006–2020 рр.) свідчить про стійку тенденцію до дегуміфікації чорноземів Лісостепу, в яких середньозважений вміст гумусу за цей період знизився від 3,38% до 3,20% [19–21]. У зазначені роки в усіх досліджених областях фактичні показники залишаються стабільно низькими відносно нормативу (*табл. 3*), який для цієї зони становить 6,2% [24].

Найвищі темпи втрати органічної речовини виявлено у Київській, Сумській та Черкаській обл. Як свідчать дані *табл. 3*, у п'яти з семи областей (Вінницька, Київська, Полтавська, Хмельницька, Черкаська) вміст гумусу не досягає навіть 55% від еталонного рівня. Найбільш критична ситуація зберігається у Вінницькій обл., де дефіцит сягає 56,5% (порівняно з нормою 6,2%). Відносно краща ситуація спостерігається у Харківській обл. (69,4% від еталону), що зумовлено природно-генетичними особливостями поширених там чорноземів, проте і тут дефіцит органічної речовини

**Таблиця 3.** Динаміка відхилення середньозваженого вмісту гумусу від еталонного рівня в ґрунтах областей Лісостепу України (2006–2020 рр.), %

Область	2006–2010 рр. (%)	2011–2015 рр. (%)	2016–2020 рр. (%)	% від еталону (2016–2020 рр.)*
Вінницька	2,70	2,70	2,70	43,5
Київська	2,93	3,06	2,98	48,1
Полтавська	3,26	3,18	3,23	52,1
Сумська	3,55	3,58	3,50	56,5
Харківська	4,50	4,10	4,30	69,4
Хмельницька	3,08	2,96	3,02	48,7
Черкаська	3,12	3,06	3,05	49,2

*Примітка:* \* еталонний вміст гумусу для ґрунтів зони Лісостепу становить 6,2% [24].

перевищує 30%. У Вінницькій обл. найнижчий показник умісту гумусу в ґрунті, який становить 2,70% протягом усіх 15 років. Це свідчить про те, що існуючі агротехнології лише компенсують поточні втрати, але не забезпечують відтворення гумусу до оптимальних параметрів.

Хімічна деградація підсилюється хронічним дефіцитом основних елементів живлення — азоту, фосфору та калію. Результати аналізу (табл. 4) засвідчують істотний дефіцит фактичного вмісту від еталонних параметрів (згідно з ДСТУ 4362:2004).

Аналіз макроелементів показав забезпеченість ґрунтів NPK на рівні лише 36–72% від оптимальних значень. Найбільш критична ситуація спостерігається з азотним режимом, де фактичний вміст легкогідролізованого азоту не досягає навіть половини від біологічної потреби агроценозів. Особливо вразливою є Вінницька обл., де поєднується мінімальний вміст легкогідролізованого азоту (81 мг/кг) та низька забезпеченість гумусом. Поєднання втрати гумусу та глибокого дефіциту макроелементів формує інтегрований рівень хіміч-

ної деградації. Це не лише знижує врожайність, а й підвищує екологічну вразливість ґрунтів до кліматичних стресів, оскільки дегуміфіковані ґрунти швидше втрачають вологу та сильніше піддаються ерозійним процесам.

**Інтегральна оцінка екологічного ризику деградації ґрунтів Лісостепу.** За отриманими результатами розраховано Інтегральний індекс екологічного ризику ( $I_{ІЕР}$ ) за адитивною моделлю. Розрахунок базувався на синтезі нормованих показників кліматичної експозиції (Е), антропогенного навантаження (Н) та деградаційної вразливості ґрунту (Д).

Результати розрахунків вказують на неоднорідність екологічного стану регіону (табл. 5). Найвищі значення індексу  $I_{ІЕР}$  зафіксовані у Харківській (0,78) та Полтавській (0,72) обл., що відповідає високому рівню ризику. Це зумовлено синергією критичної розораності (понад 80%) та активною аридизацією клімату. Натомість Вінницька та Хмельницька обл., попри високу еродованість, мають дещо нижчий інтегральний бал завдяки кращому воло-

Таблиця 4. Відхилення вмісту основних макроелементів від оптимальних значень у ґрунтах Лісостепу (2006–2020 рр.)

Елемент	Фактичний діапазон (мг/кг)	Оптимум (мг/кг)*	% від оптимуму
Азот легкогідролізований	81–124	225	36,0–55,1
Фосфор (рухомі сполуки)	87–129	200	43,5–64,5
Калій (рухомі сполуки)	102–130	180	56,7–72,2

Примітка: \* згідно з ДСТУ4362:2004.

Таблиця 5. Розрахункові значення компонентів та Інтегрального індексу екологічного ризику ( $I_{ІЕР}$ )

Регіон (область)	Експозиція (Е)	Навантаження (Н)	Деградаційна вразливість ґрунтів (Д)	$I_{ІЕР}$	Рівень екологічного ризику
Харківська	0,85	0,82	0,67	0,78	Високий
Полтавська	0,72	0,81	0,63	0,72	Високий
Черкаська	0,68	0,78	0,65	0,70	Високий
Вінницька	0,45	0,75	0,58	0,59	Середній
Хмельницька	0,42	0,72	0,61	0,58	Середній
Сумська	0,55	0,68	0,52	0,58	Середній
Київська	0,48	0,70	0,54	0,57	Середній

гозабезпеченню, хоча й класифікуються як зони середнього ризику.

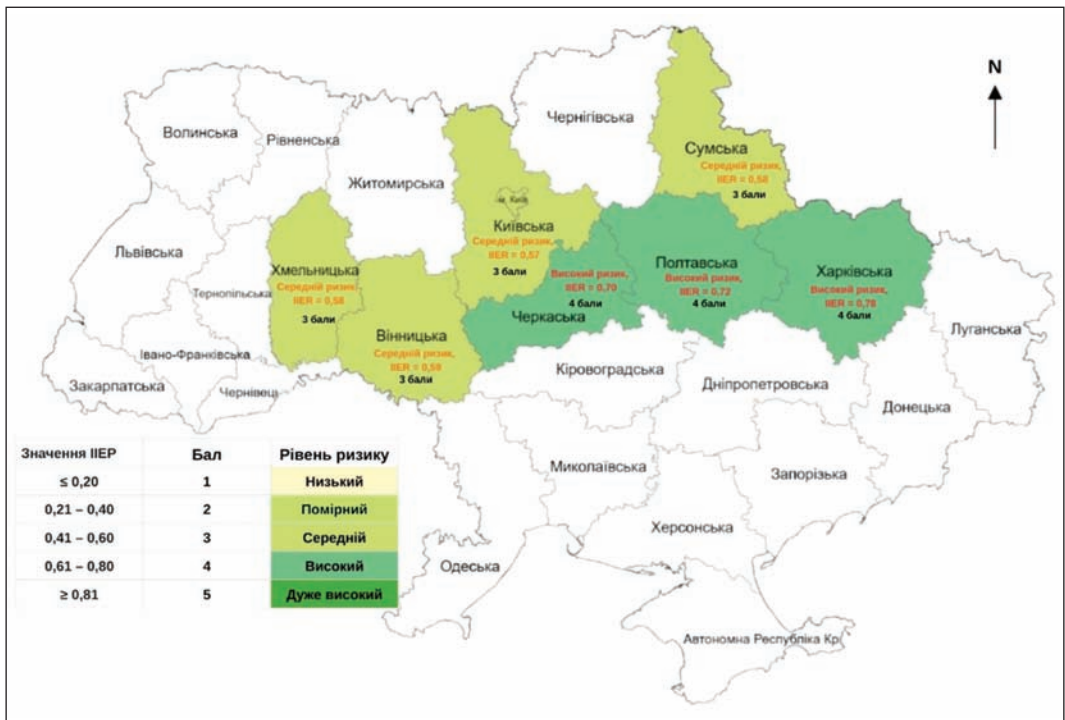
**Аналіз просторового розподілу екологічних ризиків** за методикою  $I_{EP}$  свідчить про територіальну неоднорідність екологічного стану Лісостепу України, за якої простежується виражене посилення деградації ґрунтів у напрямку з північного заходу на південний схід України (рис. 4).

Відповідно до отриманих значень індексу, виділено дві основні зони екологічного ризику деградації ґрунтів у областях Лісостепу України:

1) зона високого ризику (Харківська, Полтавська та Черкаська обл.), яка охоплює східну та центральну частини регіону. Тут процеси деградації мають виражений кумулятивний характер, що спричинено синергією інтенсивної аридизації клімату ( $ГТК < 1,0$ ) та критичної розораності

угідь (понад 80%). Такий стан агроєко-систем вимагає негайного впровадження контурно-меліоративного землеробства, збільшення частки багаторічних трав та системної оптимізації структури землеко-ристування;

2) зона середнього ризику (Вінницька, Хмельницька, Сумська та Київська обл.), яка включає Західне Поділля, північні та центральні регіони Лісостепу. Незважаючи на відносну кліматичну стійкість та дещо краще вологозабезпечення, ці території характеризуються стійким трендом до фізичної деградації. Головними дестабілізуювальними чинниками тут залишаються висока еродованість земель та дефіцит органічної речовини в ґрунтах. Управління екологічними ризиками в цій зоні потребує переходу до систем мінімального обробітку ґрунту (*no-till, strip-till*) та компенсації



**Рис. 4.** Просторова диференціація рівнів Інтегрального індексу екологічного ризику ( $I_{EP}$ ) деградації ґрунтів у областях Лісостепу України

*Примітки:* побудовано авторами за результатами адитивного моделювання компонентів кліматичної експозиції (Е), антропогенного навантаження (Н) та деградаційної вразливості ґрунтів (Д).

втрата гумусу шляхом використання сучасних біологічно інтегрованих регенеративних технологій землеробства.

## ВИСНОВКИ

Основним чинником екологічного ризику кліматичного тиску в Лісостепу України є прогресивне потепління (+1,2°C від кліматичної норми) у поєднанні з високою міжрічною мінливістю опадів. Просторова диференціація за гідротермічним коефіцієнтом Селянинова (ГТК) підтверджує зміщення кліматичних меж: східна частина регіону (Харківська, Полтавська обл.) проявляє стійку тенденцію до аридизації (ГТК<0,90), тоді як західна – зберігає ризик періодичного перезволоження, що потребує диференційованих підходів до адаптації агроєкосистем.

Доведено, що надмірна розораність земель, яка в окремих областях Лісостепу сягає 80,8%, у поєднанні з інтенсивним механічним обробітком, є головним чинником фізичної деградації. Це призводить до охоплення ерозійними процесами понад 27,5% орних угідь, руйнування структури ґрунту та зниження його інфільтраційної

здатності, що в умовах кліматичного стресу формує кумулятивний деструктивний ефект.

Багаторічний моніторинг засвідчив прогресивну дегуміфікацію (зниження середньозваженого вмісту гумусу від 3,38% до 3,20%) та системний дефіцит основних макроелементів. Забезпеченість ґрунтів азотом, фосфором і калієм становить лише 36–72% від оптимальних значень (ДСТУ 4362:2004). Найбільш критичний рівень хімічної деградації ґрунтів виявлено щодо азотного режиму, що обмежує адаптивний потенціал агроценозів.

Розроблена адитивна модель Інтегрального індексу екологічного ризику ( $I_{EP}$ ) забезпечила можливість типізації територій за ступенем деградаційної небезпеки. Виявлено зони екологічного ризику (Черкаська, Харківська та Полтавська обл.), де значення індексу ( $I_{EP}>0,61$ ) відповідають високому рівню. Застосування даної методики забезпечує наукове підґрунтя для просторового планування ґрунтозахисних заходів та переходу до регенеративного землекористування в умовах природно-кліматичних змін.

## ЛІТЕРАТУРА

- Saik, P., Koshkalda, I., Bezuhla, L., Stoiko, N., & Riasnianska, A. (2024). Achieving land degradation neutrality: Land-use planning and ecosystem approach. *Frontiers in Environmental Science*, 12, Article 1446056. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1446056>.
- Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Kucherova, A., & Tsipan, Y. (2026). Monitoring of soil chemical properties in Ukraine using digital soil mapping. *Discover Environment*, 4(1), Article 78. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44274-026-00545-2>.
- Zakharchenko, E., Klymenko, O., Trotsenko, V., Kravchenko, N., Kliuchevych, M., Mozharivska, I., ... Kotiuk, R. (2025). Monitoring and restoration of soils (agrocenoses) in the border regions of the North-Eastern Forest-Steppe of Ukraine: Challenges and prospects. *Modern Phytomorphology*, 19(4). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17349579>.
- Балюк, С., Воротинцева, Л., Соловей, В., & Шимель, В. (2023). Реалії українського чорнозему: сучасний стан, еволюція, охорона та стале управління. *Вісник аграрної науки*, 101(3), 5–13. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202012-01>.
- Moldavan, L., Pimenova, O., Vlasov, V., Shpykulyak, O., Kropyvko, M., & Galushko, V. (2023). Sustainable development of agriculture of Ukraine in the context of climate change. *Sustainability*, 15(13), Article 10517. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151310517>.
- Moradi, E., Khosravi, H., Rahimabadi, P. D., Choubin, B., & Muchova, Z. (2024). Integrated approach to land degradation risk assessment in arid and semi-arid Ecosystems: Applying SVM and eDPSIR/ANP methods. *Ecological Indicators*, 169, 112947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112947>.
- Dinesh, G. K., Venkatramanan, V., Jayaraman, S., Bolan, N., Rao, C. S., Meena, R. S., ... Velmurugan, A. (2025). Carbon farming: Ecosystem services and its potential in achieving UN sustainable development goals. *Advances in Agronomy*. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2025.10.002>.
- Kopittke, P. M., Harper, S. M., Asio, L. G., Asio, V. B., Batalon, J. T., Batuigas, A. M. T., ... Sanchez, P. B. (2025). Soil degradation: An integrated model of the causes and drivers. *International Soil and Water Conservation Research*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.07.010>.
- Panagos, P., Lugato, E., Ballabio, C., Biavetti, I., Montanarella, L., & Borrelli, P. (2022). Soil erosion in Europe: From policy developments to models, indicators and new research challenges. In *Global Degradation of Soil and Water Resources: Regional Assessment and Strategies* (pp. 319–333). Springer

- Nature Singapore. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2_21).
10. Afshar, M. H., Hassani, A., Aminzadeh, M., Borrelli, P., Panagos, P., Robinson, D. A., ... Shokri, N. (2025). Spatial and temporal assessment of soil degradation risk in Europe. *Scientific Reports*. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33318-7>.
  11. Lishchuk, A., Parfenyuk, A., Horodyska, I., Boroday, V., Ternovyi, Y., & Tymoshenko, L. (2023). Environmental risks of the pesticide use in agrocenoses and their management. *Journal of Ecological Engineering*, 24(3), 199–212. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/158537>.
  12. Лішук, А. М., Парфенюк, А. І., Городиська, І. М., Бородай, В. В., & Драга, М. В. (2022). Основні важелі управління екологічними ризиками в агроценозах. *Агроекологічний журнал*, 2, 74–85. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2022.263320>.
  13. Lishchuk, A., Parfenyuk, A., Furdychko, O., Boroday, V., Beznosko, I., Drebot, O., & Karachinska, N. (2024). Ecotoxicological hazard of pesticide use in traditional agricultural technologies. *Journal of Ecological Engineering*, 25(2), 274–289. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/177275>.
  14. Бережняк, Є. М., Бондарь, В. І., Наумовська, О. І., Ракоїд, О. О., Клепко, А. В., Ладика, М. М., ... Дем'янюк, О. С. (2024). Аналіз прояву деградаційних процесів ґрунтового покриву Київської області за впливу воєнних дій. *Збалансоване природокористування*, 4, 116–128. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.324377>.
  15. Didenko, N. O. (2024). Soil damage and recovery in Ukraine: Lessons from global post-war experiences. *Land Reclamation and Water Management*, 2, 79–86. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202402-391>.
  16. Чайка, Т. О., & Короткова, І. В. (2023). Відновлення родючості ґрунту в Україні після воєнних дій. *Захист і відновлення екологічної рівноваги та забезпечення самовідновлення екосистем: колект. монограф.* (с. 232–281). Полтава: Видавництво ПП «Астрая».
  17. Тараріко, О. Г., Ільєнко, Т. В., Кучма, Т. Л., Адамчук-Чала, Н. І., & Білокінь, О. А. (2022). Формування науково-методичних засад супутникового агроекологічного моніторингу в Україні. *Агро-екологічний журнал*, 2, 6–21. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2022.263312>.
  18. Li, W., Fang, W., & Hu, Y. (2025). Integrating climate resilience into sustainable land management: A strategy to combat land degradation. *Land Degradation & Development*, 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.70279>.
  19. Яцук, І. П. (Ред.). (2015). *Періодична доповідь по стан ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення України за результатами ІХ туру (2006–2010 рр.) агрохімічного обстеження земель*. Київ: ДУ «Інститут охорони ґрунтів України». URL: <https://www.old.iogu.gov.ua/publikacii/stan-gruntiv/>.
  20. Яцук, І. П. (Ред.). (2020). *Періодична доповідь по стан ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення України за результатами Х туру (2011–2015 рр.) агрохімічного обстеження земель*. Київ: ДУ «Інститут охорони ґрунтів України». URL: <https://www.old.iogu.gov.ua/publikacii/stan-gruntiv/>.
  21. Романова, С. А., Паламарчук, Р. П., Грищенко, О. М., Брошак, І. С., Гульванський, І. М., Демчишин, А. М., ... Яценко, Ю. М. (2023). Наукові дослідження за моніторингу та обстеження сільськогосподарських угідь України: за результатами ХІ туру (2016–2020 рр.). Київ: ДУ «Інститут охорони ґрунтів України». URL: <https://www.old.iogu.gov.ua/publikacii/stan-gruntiv/>.
  22. Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems & environment*, 90(1), 25–45. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8).
  23. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2020). *Global symposium on soil erosion — Terminology and risk assessment*. URL: <https://www.fao.org/about/meetings/soil-erosion-symposium/key-messages/en/>.
  24. Яцук, І. П., & Балюк, С. А. (Ред.). (2019). *Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення (керівний нормативний документ)*. Київ: ДУ «Держґрунтоохорона». URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u391/metodika\\_provedennya\\_agrohimichnoyi\\_raspportizaciyi\\_2019.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u391/metodika_provedennya_agrohimichnoyi_raspportizaciyi_2019.pdf).
  25. FAO, *Status of the World's Soil Resources Report*. URL: <http://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>.
  26. Шевченко, О. В., Пронь, О. С., & Чеботарьова, І. В. (2024). Вплив кліматичних змін на деградацію земель та агроекосистем. *Збалансоване природокористування*, 3, 81–88. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2024.314921>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 18.02.2026  
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.03.2026  
 Дата публікації: 10.04.2026