

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ АГРАРНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ В СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Латуша Д. Р.¹, Максименко М.П.¹, Кватернюк С. М.¹, Петрук В. Г.¹

¹Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Україна
kvaternuk@vntu.edu.ua

Анотація. У статті здійснено комплексну оцінку екологічних ризиків аграрного природокористування як критичного елемента системи екологічної безпеки України. Доведено, що сучасна модель агровиробництва, яка базується на екстенсивних методах та надмірній розораності земель (понад 70%), призвела до системної деградації природного капіталу. Ідентифіковано ключові джерела антропогенного тиску, серед яких: неконтрольована хімізація, порушення сівозмін та неефективне управління відходами тваринництва. Особливу увагу приділено методології оцінки вразливості підземних вод. Обґрунтовано та адаптовано використання модифікованої моделі Pesticide DRASTIC та DRASTIC-LU для умов інтенсивного землеробства. Встановлено, що інтеграція фактору землекористування підвищення ваги ґрунтового бар'єру дозволяють значно точніше прогнозувати ризики забруднення водоносних горизонтів нітратами та пестицидами порівняно зі стандартними підходами. У роботі вперше комплексно проаналізовано синергетичний ефект глобальних кліматичних змін та наслідків військової агресії. Прогнозується зростання середньорічних збитків від кліматичних ризиків на 42–66 % до 2050 року. Водночас висвітлено проблему формування бєлігеративних ландшафтів, що зазнали впливу бойових дій, де понад 30% оброблюваних земель зазнали механічної деградації, хімічного забруднення важкими металами та замінування. Доведено, що безальтернативним шляхом мінімізації

ризиків є перехід до концепції Сільське господарство 4.0, що передбачає впровадження точного землеробства, ГІС-технологій та біологізації виробництва. Обґрунтовано необхідність гармонізації національної політики з Європейським зеленим курсом та стратегією «Від ферми до виделки». Запропоновано організаційно-економічні механізми стимулювання сталого розвитку, зокрема через інструменти зеленого фінансування та екологічного страхування.

Ключові слова: екологічна безпека, аграрне природокористування, екологічний ризик, модель DRASTIC, зміна клімату, воєнні дії, сталий розвиток, точне землеробство.

Abstract. This article provides a comprehensive assessment of environmental risks associated with agricultural land use as a critical component of Ukraine's environmental security system. It is demonstrated that the current agricultural model, based on extensive methods and excessive land plowing (exceeding 70%), has led to the systemic degradation of natural capital. Key sources of anthropogenic pressure have been identified, including uncontrolled chemical application, crop rotation violations, and inefficient livestock waste management. Particular attention is devoted to the methodology of groundwater vulnerability assessment. The study substantiates and adapts the use of modified Pesticide DRASTIC and DRASTIC-LU models for intensive farming conditions. It was established that integrating the land-use factor and increasing the weight of the soil

barrier allows for significantly more accurate predictions of aquifer contamination by nitrates and pesticides compared to standard approaches. For the first time, this work comprehensively analyzes the synergistic effect of global climate change and the consequences of military aggression. Average annual losses from climate risks are projected to increase by 42–66% by 2050. Concurrently, the study highlights the emergence of belligerent landscapes impacted by combat operations, where over 30% of cultivated land has undergone mechanical degradation, chemical contamination with heavy metals, and landmining. The research proves that the only viable path to risk minimization is the transition to the Agriculture 4.0 concept, which entails the implementation of precision farming, GIS technologies, and the biologization of production. The necessity of harmonizing national policy with the European Green Deal and the Farm to Fork Strategy is substantiated. Finally, organizational and economic mechanisms for stimulating sustainable development are proposed, specifically through green finance instruments and environmental insurance.

Keywords: environmental security, agricultural land use, environmental risk, DRASTIC model, climate change, military actions, sustainable development, precision farming.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Сільське господарство України традиційно відіграє роль фундаменту національної економічної стабільності та гаранта глобальної продовольчої безпеки. Водночас аграрний сектор є джерелом потужного антропогенного тиску на навколишнє середовище, що проявляється у деградації ґрунтів, забрудненні водних ресурсів агрохімікатами та втраті біорізноманіття. Сучасна модель агровиробництва, попри свою економічну ефективність, все частіше вступає у конфлікт з екологічними імперативами, перетворюючи довкілля на «виробничий цех» та вичерпуючи природний капітал майбутніх поколінь [1]. В умовах євроінтеграції та глобальних кліматичних змін забезпечення екологічної безпеки агровиробництва стає не просто вимогою часу, а умовою виживання галузі на світовому ринку.

Актуальність комплексної оцінки екологічних ризиків аграрного

природокористування зумовлена низкою критичних факторів:

– Інтенсифікація землеробства призвела до того, що рівень розораності земель в Україні перевищує 70%, спостерігається від’ємний баланс гумусу та поживних речовин, а забруднення водних об’єктів нітратами та пестицидами набуває загрозливих масштабів.

– Аграрний сектор стикається зі зростанням середньорічних збитків (AAL) від кліматичних ризиків, таких як посухи та екстремальні опади. Прогнозується, що до 2050 року ці втрати можуть зрости на 42–66%, що вимагає впровадження нових підходів до управління ризиками, зокрема концепції «шарування ризиків».

– Військова агресія завдала безпрецедентної шкоди довкіллю: понад 30% оброблюваних земель знаходяться в зоні ризику, фіксується хімічне забруднення ґрунтів та руйнування екосистем, що потребує специфічних методів оцінки збитків та відновлення.

– Виконання вимог Європейського зеленого курсу (European Green Deal) та стратегії «Від ферми до виделки» (Farm to Fork) вимагає від України гармонізації екологічних стандартів, зокрема щодо зменшення використання пестицидів та добрив, що неможливо без дієвої системи моніторингу та оцінки ризиків [3, 4].

– Існує потреба у вдосконаленні математичного моделювання екологічних ризиків, зокрема застосування моделей типу DRASTIC для оцінки вразливості підземних вод та інтеграції цих даних у системи прийняття управлінських рішень [2].

Метою роботи є розроблення теоретико-методологічних засад комплексної оцінки екологічних ризиків аграрного природокористування та обґрунтування стратегічних напрямів забезпечення екологічної безпеки в умовах глобальних викликів і повоєнного відновлення.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі основні завдання:

– проаналізувати сучасний стан впливу сільського господарства на довкілля, зокрема на водні та земельні ресурси, та ідентифікувати ключові джерела екологічної небезпеки;

– дослідити методологічні підходи до оцінки екологічних ризиків, зокрема адаптувати модель DRASTIC для визначення вразливості

підземних вод до забруднення агрохімікатами в умовах інтенсивного землеробства;
– оцінити вплив кліматичних змін та воєнних дій на формування нових загроз екологічній безпеці аграрного сектору;
– обґрунтувати доцільність впровадження інноваційних технологій (точне землеробство, біологізація) та організаційно-економічних механізмів для мінімізації екологічних ризиків та переходу до моделі сталого розвитку.

Для досягнення мети дослідження використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів, зокрема: системний аналіз та узагальнення наукових джерел для визначення сучасної парадигми екологічної безпеки АПК; порівняльно-географічний метод для оцінки стану земельних і водних ресурсів (зокрема на прикладі Вінниччини); індексний метод із застосуванням модифікованої математичної моделі Pesticide DRASTIC та DRASTIC-LU для розрахунку вразливості підземних вод до агрохімікатів; математичне моделювання та кореляційний аналіз для верифікації результатів оцінки ризиків із фактичними даними моніторингу; а також використання мови програмування Python (Google Colab) для автоматизації розрахунків та візуалізації результатів у межах концепції «Сільське господарство 4.0».

Виклад основного матеріалу. Сучасна наукова парадигма розглядає сільське господарство як потужний чинник антропогенного впливу на біосферу, що вимагає переосмислення підходів до екологічної безпеки. В науковій літературі екологічна безпека аграрного сектору визначається як стан розвитку агропромислового комплексу (АПК), за якого мінімізуються негативні наслідки для довкілля, забезпечується відтворення природних ресурсів та підтримується стійкість екосистем. Ключову роль у цій системі відіграють земельні ресурси, оскільки сталий розвиток аграрного сектору неможливий без реалізації принципів їх раціонального використання та охорони.

Дослідники [5], наголошують, що сучасна модель агровиробництва, попри свою економічну ефективність, призводить до деградації ґрунтів катастрофічними темпами через інтенсивні методи господарювання та

техногенні викиди. Актуалізується необхідність зміни парадигми господарювання – від екстенсивної експлуатації до моделі сталого управління, що базується на «зеленому переході» та гармонізації з міжнародними стандартами, зокрема Європейським зеленим курсом (European Green Deal) [4]. Стратегія «Від ферми до виделки» (Farm to Fork) розглядається як центральна складова цього процесу, спрямована на створення справедливої та екологічно чистої продовольчої системи.

Значний масив досліджень присвячено аналізу негативного впливу інтенсивних агротехнологій на ґрунти та водні ресурси. Науковці фіксують масштабну деградацію ґрунтів в Україні, що проявляється через ерозію, виснаження поживних речовин, ущільнення та закислення [5]. Зокрема, на Вінниччині водна ерозія пошкодила значні площі сільськогосподарських угідь, а понад 53% земель мають кислі ґрунти.

Окремий фокус досліджень зосереджено на забрудненні водних ресурсів. Аграрна діяльність визнається одним із основних джерел забруднення поверхневих та підземних вод нітратами, фосфатами та пестицидами, що призводить до евтрофікації водойм. Дослідження підтверджують пряму кореляцію між часткою сільськогосподарських угідь у водозборі та концентрацією азоту в річках, а також вказують на ризики для здоров'я населення через забруднення питної води в зонах інтенсивного тваринництва.

Для кількісної оцінки вразливості екосистем до аграрного впливу вчені все частіше застосовують математичне моделювання. Одним із найбільш поширених інструментів є модель DRASTIC та її модифікації (Pesticide DRASTIC, DRASTIC-LU). Ця модель дозволяє оцінити потенціал забруднення підземних вод на основі гідрогеологічних параметрів (глибина залягання вод, інфільтраційне живлення, тип ґрунту тощо) [6-8].

Сучасні дослідження вказують на необхідність адаптації моделі DRASTIC до специфічних умов агроландшафтів. Зокрема, модифікація Pesticide DRASTIC надає більшої ваги типу ґрунту та топографії, що дозволяє точніше оцінювати ризики забруднення пестицидами. Також науковці пропонують інтегрувати у модель параметр землекористування, що підвищує точність

оцінки реального антропогенного навантаження. Важливим напрямом є валідація моделей за допомогою фактичних даних моніторингу нітратів у підземних водах, що підтверджує ефективність модифікованих версій DRASTIC для зон інтенсивного землеробства.

В літературі значна увага приділяється новим категоріям ризиків. Зміна клімату розглядається як драйвер трансформації екологічних загроз, що призводить до зростання середньорічних збитків від посух та екстремальних опадів. Прогнозується, що до 2050 року втрати врожайності через кліматичні чинники можуть зрости на 42–66% [9].

Окремий пласт досліджень присвячено впливу воєнних дій на екологічну безпеку агросфери. Науковці фіксують безпрецедентні збитки: фізичне пошкодження ґрунтів, хімічне забруднення важкими металами від вибухів, знищення зрошувальних систем та замінування значних площ. Це створює довгострокові екологічні ризики, що потребують специфічних методів оцінки та рекультиватії.

У наукових працях обґрунтовується необхідність переходу до концепції «Сільське господарство 4.0» та впровадження інноваційних технологій [10]. Точне землеробство, використання ГІС-технологій, дистанційне зондування землі та диференційоване внесення агрохімікатів розглядаються як ефективні інструменти зниження екологічного навантаження. Також акцентується увага на важливості біологізації землеробства, розвитку органічного виробництва та впровадженні принципів циркулярної економіки для забезпечення сталого розвитку аграрного сектору.

Сучасний аграрний сектор України характеризується високим рівнем антропогенного навантаження на екосистеми, що зумовлено екстенсивною моделлю господарювання та домінуванням ресурсомістких технологій. Аналіз літературних джерел та статистичних даних дозволяє виокремити критичні тенденції деградації земельних та водних ресурсів, а також ідентифікувати основні джерела екологічної небезпеки.

Стан та трансформація земельних ресурсів Земля є основним засобом виробництва в аграрному секторі, проте інтенсифікація

землеробства призвела до порушення екологічної рівноваги. Рівень розораності земель в Україні перевищує 70%, що є одним із найвищих показників у світі. У Вінницькій області, яка є показовим аграрним регіоном, сільськогосподарські угіддя займають близько 76–77% території, а рілля становить понад 65% земельного фонду. Таке надмірне навантаження призводить до масштабної деградації ґрунтів.

Ключовими проявами деградації є ерозійні процеси. Майже 25% сільгоспугідь Вінниччини піддаються водній ерозії, а 7% – вітровій. Щорічно внаслідок ерозії втрачаються мільйони тонн родючого шару ґрунту, що призводить до незворотних втрат гумусу та поживних речовин. Крім того, відмічається закислення та втрата родючості ґрунтів. Близько 53–57% ґрунтів Вінницької області є кислими. Спостерігається від’ємний баланс поживних речовин (азоту, фосфору, калію) та гумусу, оскільки винос елементів з урожаєм не компенсується внесенням добрив. Використання важкої техніки спричиняє переущільнення ґрунту (на глибину до 60 см), що погіршує його водно-фізичні властивості та аерацію.

Додатковим критичним фактором став вплив військових дій. Станом на 2025 рік, близько 139 тис. км² території України вважаються забрудненими вибухонебезпечними предметами, а фізичне пошкодження ґрунтів (вирви, ущільнення) та хімічне забруднення важкими металами виводять значні площі з обігу.

Сільське господарство виступає як найбільшим споживачем води, так і потужним джерелом її забруднення. Вплив агровиробництва на гідросферу проявляється у двох площинах: виснаження водних горизонтів та хімічне і бактеріальне забруднення. Основну загрозу становить поверхневий стік із полів, насичений азотними та фосфорними сполуками, що призводить до евтрофікації водойм. Дослідження фіксують пряму кореляцію між часткою ріллі у водозборі та концентрацією азоту в річках. Пестициди, які мають високу мобільність, потрапляють у ґрунтові води та поверхневі водойми, створюючи токсикологічні ризики для біоти та людини. У країнах ЄС до 50% діючих речовин пестицидів виявляються навіть у дощовій воді. Водні об’єкти Вінниччини, які на 80% формуються за рахунок місцевого стоку, зазнають значного тиску.

Моніторинг фіксує перевищення ГДК по нітридах, фенолах, сполуках міді та марганцю. У зонах інтенсивного тваринництва (зокрема, поблизу птахофабрик) спостерігається підвищений вміст нітратів у підземних водах та високий колі-індекс у малих річках, що свідчить про забруднення органічними відходами.

На основі аналізу впливу на компоненти довкілля ідентифіковано ключові джерела екологічної небезпеки аграрного походження:

– неконтрольоване та незбалансоване використання мінеральних добрив і пестицидів є головним джерелом дифузного забруднення вод та деградації біоти ґрунту.

– висока розораність, недотримання сівозмін та домінування монокультур (соняшник, кукурудза, ріпак) виснажують ґрунт і посилюють ерозію. Розорювання схилів та прибережних захисних смуг є критичним фактором замулення річок.

– великі тваринницькі комплекси генерують значні обсяги гною та посліду. Неналежне управління цими відходами призводить до емісії аміаку в атмосферу та інфільтрації нітратів у водоносні горизонти.

– фізичне руйнування ландшафтів, хімічне забруднення продуктами вибухів та замінування територій створили нову категорію джерел небезпеки, що мають довгостроковий вплив на екологічну безпеку агросфери.

Таким чином, сучасний стан впливу сільського господарства на довкілля характеризується системним порушенням екологічної рівноваги, що вимагає впровадження комплексних інструментів оцінки ризиків та переходу до адаптивних моделей природокористування.

Для оцінки вразливості підземних вод до забруднення агрохімікатами в сучасній науці застосовують три основні групи методів: методи, що базуються на процесному моделюванні (simulation models), статистичні методи та методи накладання індексів (overlay and index methods). Хоча методи моделювання процесів забезпечують високу точність, вони потребують значних масивів вхідних даних, які часто недоступні на регіональному рівні. Статистичні методи ефективні лише за наявності великої кількості даних моніторингу якості води. В умовах необхідності оцінки ризиків на великих територіях з обмеженими

даними найбільш доцільним є використання індексних методів, серед яких світовим стандартом визнано модель DRASTIC.

Модель DRASTIC, розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA), дозволяє оцінити внутрішню (природну) вразливість водоносних горизонтів на основі семи гідрогеологічних параметрів, що утворюють акронім назви моделі [6-8]:

– D (Depth to water) – глибина залягання підземних вод: визначає шлях, який має подолати забруднювач до дзеркала вод;

– R (Net Recharge) – ефективне інфільтраційне живлення: обсяг води, що транспортує забруднювач з поверхні;

– A (Aquifer media) – літологічний склад водоносного горизонту: характеризує здатність породи вміщувати та пропускати воду;

– S (Soil media) – ґрунтовий покрив: верхній шар, де відбуваються основні біологічні процеси деградації забруднювачів;

– T (Topography) – нахил поверхні: впливає на співвідношення між поверхневим стоком та інфільтрацією;

– I (Impact of vadose zone) – вплив зони аерації: шар порід над водоносним горизонтом, який може затримувати або прискорювати рух забруднювачів;

– C (Hydraulic Conductivity) – гідравлічна провідність: здатність водоносного горизонту передавати воду.

Розрахунок індексу вразливості (DI) здійснюється методом зваженої суми за формулою:

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w, \quad (1)$$

де r – рейтинг параметра (від 1 до 10),

w – вага параметра (від 1 до 5), що відображає його значущість.

Стандартна модель DRASTIC розрахована на загальну оцінку вразливості. Однак для умов інтенсивного землеробства, де основним джерелом небезпеки є пестициди та нітрати, необхідно застосовувати модифікацію Pesticide DRASTIC. Ця модифікація враховує специфіку поведінки агрохімікатів, змінюючи ваги параметрів (Таблиця 1).

Таблиця 1. Порівняння ваги параметрів у стандартній та пестицидній моделях DRASTIC

Параметр	Вага (Стандартна)	Вага (Пестицидна)	Обґрунтування змін для агрохімікатів
D (Глибина)	5	5	Залишається критичним фактором.
R (Живлення)	4	4	Основний транспортний засіб для нітратів.
A (Водонос)	3	3	Впливає на поширення у горизонті.
S (Ґрунт)	2	5	Ґрунт є головним бар'єром для адсорбції пестицидів.
T (Топографія)	1	3	Підвищена вага через ризик змиву хімікатів на схилах.
I (Зона аерації)	5	4	Менша вага порівняно з ґрунтом.
C (Провідність)	3	2	Менший вплив на вертикальний рух хімікатів.

У моделі Pesticide DRASTIC вага ґрунту (*S*) зростає з 2 до 5, оскільки саме у ґрунтового профілі відбуваються процеси сорбції та біодеградації складних органічних сполук пестицидів. Вага топографії (*T*) збільшується з 1 до 3, оскільки рельєф визначає, чи затримається пестицид на полі для інфільтрації, чи буде змитий поверхневим стоком.

Інтеграція фактору землекористування (Modified DRASTIC-LU). Для підвищення точності оцінки ризиків в умовах антропогенного навантаження методологія передбачає додавання параметра землекористування (LU – Land Use). Інтенсивне сільське господарство генерує значні обсяги нітратів, які не враховуються класичною моделлю, що оцінює лише природну вразливість. Модифікований індекс розраховується як:

$$DI_{modified} = DI + LU_w \cdot LU_r \quad (2)$$

Для орних земель та зон інтенсивного землеробства параметру LU присвоюється високий рейтинг (зазвичай 7–8), а вага цього параметра встановлюється на рівні 5, що робить його одним із найбільш впливових у моделі.

Важливим етапом методології є верифікація отриманих карт вразливості шляхом кореляційного аналізу з фактичними даними концентрації нітратів (NO_3^-) у підземних водах. Нітрати виступають індикатором аграрного забруднення, оскільки їх наявність у ґрунтових водах є неприродною і свідчить про антропогенний вплив. Дослідження показують,

що модифіковані моделі (Pesticide DRASTIC та DRASTIC-LU) мають вищий коефіцієнт кореляції з даними польових вимірювань порівняно зі стандартною моделлю, що підтверджує доцільність їх використання для агроландшафтів.

На основі наведеної математичної моделі авторами складено програмне забезпечення на Python адаптоване для використання на Google Colab, що впроваджено для використання у навчальному процесі студентів Вінницького національного технічного університету за спеціальностями E2 – Екологія та G2 – Технології захисту навколишнього середовища. Інтерфейс користувача програми розрахунку екологічних ризиків за моделлю DRASTIC наведено на рис. 1. Приклад результатів розрахунку екологічних ризиків за моделлю DRASTIC наведено у табл. 1. Отримано підсумковий індекс $DI = 105$, що відповідає помірному рівню екологічного ризику.

Сучасна парадигма екологічної безпеки аграрного сектору України зазнає фундаментальних трансформацій під впливом двох екзогенних трендів: глобальної зміни клімату та наслідків повномасштабної військової агресії. Ці фактори не лише посилюють традиційні екологічні ризики, а й генерують принципово нові загрози, що мають системний та довгостроковий характер.

За останні півстоліття середньорічна температура в Україні зросла на $1,4^\circ\text{C}$, що перевищує глобальні темпи потепління. Ця тенденція призводить до зміщення природно-кліматичних зон: степ перетворюється на посушливу зону з ознаками опустелювання, а лісостеп набуває характеристик степу.

Калькулятор екологічних ризиків DRASTIC

Тип моделі: Standard ▼

Глибина до води (м): 10.50

Поповнення (мм/рік): 120.00

Тип водоносу (A): Тріщинуваті кристалічні пс ▼

Тип ґрунту (S): Чорнозем (суглинковий) ▼

Нахил поверхні (%): 20.00

Зона аерації (I): Глина / Мул ▼

Гідравлічна провідність (м/добу): 5.00

Розрахувати ризик

Рис. 1. Інтерфейс користувача програми розрахунку екологічних ризиків за моделлю DRASTIC

Спостерігається зниження ефективності опадів через підвищене випаровування, що збільшує потребу сільськогосподарських культур у воді на 10–20%. У південних регіонах фіксується стає зменшення середньомісячної кількості опадів (на 10–25% залежно від області), що в поєднанні з виснаженням водних ресурсів створює загрозу дефіциту води для зрошення.

Застосування концепції «шарування ризиків» показує, що частота та інтенсивність екстремальних явищ (посухи, зливи, заморозки) зростає. У країнах Європи посуха вже є причиною близько 60% втрат у рослинництві. Прогнозується, що до 2050 року середньорічні

збитки від кліматичних ризиків можуть зрости на 42–66%.

Пом'якшення зим та підвищення температур вегетаційного періоду сприяють розширенню ареалів шкідників та хвороб рослин, а також появі нових інвазивних видів, що вимагає інтенсифікації хімічного захисту та створює додаткове пестицидне навантаження на довкілля.

Військова агресія стала безпрецедентним фактором руйнування екологічної безпеки, створивши специфічні бelligеративні ландшафти. Станом на 2024–2025 роки понад 30% оброблюваних земель України опинилися в зоні ризику або були виведені з обігу.

Таблиця 2. Результати розрахунку екологічних ризиків за моделлю DRASTIC

Параметр	Рейтинг (r)	Вага (w)	Добуток
D (Глибина)	5	5	25
R (Поповнення)	6	4	24
A (Водонос)	4	3	12
S (Ґрунт)	5	5	25
T (Топографія)	1	3	3
I (Зона аерації)	3	4	12
C (Провідність)	2	2	4
РАЗОМ	-	-	105

Основними складовими воєнного впливу є механічна та хімічна деградація ґрунтів. Бойові дії призводять до фізичного руйнування ґрунтового покриву (вирви, ущільнення важкою технікою) та його хімічного забруднення важкими металами (свинець, кадмій), сіркою та залишками вибухових речовин. За оцінками, шкода, завдана ґрунтам, оцінюється мільярдами доларів, а процеси рекультивативації можуть тривати десятиліттями. Близько 139–174 тис. км² території України є потенційно забрудненими вибухонебезпечними предметами. Це не лише унеможливорює сільськогосподарське використання земель, а й блокує проведення природоохоронних заходів (наприклад, створення лісосмуг чи догляд за наявними), що посилює ерозійні процеси. Знищення Каховської ГЕС та пошкодження зрошувальних систем на півдні України призвело до втрати джерел зрошення для сотень тисяч гектарів земель, що в умовах кліматичних змін прискорює процеси опустелювання. Удари по енергетичній інфраструктурі змушують аграріїв використовувати дизельні генератори, що підвищує викиди забруднюючих речовин та собівартість продукції. Порушення логістики та блокада портів призводять до накопичення відходів та неможливості збуту продукції, що порушує фінансову стійкість підприємств і обмежує їх здатність інвестувати в екологічні технології.

Критичною особливістю сучасного етапу є синергія кліматичних та воєнних факторів. Війна обмежує адаптаційний потенціал аграрного сектору до змін клімату: знищена іригаційна інфраструктура не дозволяє компенсувати дефіцит вологи, а фінансове виснаження виробників та дефіцит кадрів гальмують впровадження ґрунтозахисних технологій (no-till, точне землеробство). Крім того, вимушена інтенсифікація виробництва на вцілілих землях для компенсації втрат може призвести до прискореного виснаження ґрунтів та порушення сівозмін.

Таким чином, формування нових загроз екологічній безпеці відбувається за сценарієм накладання глобальних кліматичних трендів на катастрофічні наслідки війни, що вимагає розробки адаптивних стратегій управління ризиками, які б враховували необхідність одночасного відновлення порушених екосистем та адаптації до нових кліматичних реалій.

В умовах глобальних кліматичних змін та необхідності повоєнного відновлення аграрного сектору України традиційні екстенсивні методи господарювання вичерпали свій ресурс. Забезпечення екологічної безпеки та конкурентоспроможності галузі вимагає переходу до концепції «Сільське господарство 4.0» (Agriculture 4.0) та впровадження принципів циркулярної економіки. Комплексне поєднання технологічних інновацій з дієвими організаційно-економічними механізмами є безальтернативним шляхом до мінімізації екологічних ризиків та досягнення цілей сталого розвитку.

Впровадження точного землеробства (Precision Farming) є ключовим інструментом зниження антропогенного навантаження на агроландшафти.

Використання геоінформаційних систем (ГІС), супутникового моніторингу, дронів та сенсорів дозволяє перейти від суцільного до диференційованого обробітку полів. Доцільність цього підходу підтверджується такими факторами:

- технології змінного нормування (VRT) дозволяють вносити добрива та засоби захисту рослин (ЗЗР) виключно в зонах потреби, що скорочує витрати ресурсів на 15–30% та мінімізує хімічне забруднення ґрунтів і водних об'єктів.

- використання IoT-датчиків та систем дистанційного зондування забезпечує контроль вологості ґрунту та стану посівів, що дозволяє впроваджувати «смарт-іригацію» та економити до 50% води для поливу, запобігаючи вторинному засоленню ґрунтів.

- автоматизація процесів та використання автономної техніки оптимізують маршрути руху, зменшуючи витрати пального та викиди парникових газів, а також запобігають переущільненню ґрунту.

Паралельно з цифровізацією необхідна глибока біологізація виробничих процесів для відновлення природного капіталу. Наукові дослідження доводять, що перехід до агроекологічних методів підвищує стійкість агроекосистем до кліматичних стресів. Заміна хімічних пестицидів на біологічні препарати та використання ентомофагів дозволяє відновити біорізноманіття та знизити токсичне навантаження на довкілля. Впровадження науково обґрунтованих сівозмін, використання покривних культур та органічних добрив

(компосту, сидератів) сприяє секвестрації вуглецю та покращенню структури ґрунту. Переробка відходів тваринництва та рослинництва на біогаз та біодобрива вирішує проблему утилізації відходів та забезпечує господарства відновлюваною енергією, замикаючи цикл виробництва.

Масштабування технологічних інновацій неможливе без створення сприятливого економічного середовища та інституційної підтримки. Розвиток ринку зелених облігацій та впровадження банківських продуктів, прив'язаних до ESG-критеріїв (Environmental, Social, Governance), дозволить залучити інвестиції в екологічну модернізацію агропідприємств. Державна програма «Доступні кредити 5-7-9%» має бути розширена для підтримки проектів кліматичної адаптації. Адаптація до стратегії «Від ферми до виделки» (Farm to Fork) в рамках Європейського зеленого курсу відкриває доступ до європейських ринків для української продукції, виробленої за екологічними стандартами. Впровадження концепції «шарування ризиків» та інструментів агрострахування дозволить мінімізувати фінансові втрати виробників від екстремальних погодних явищ, частота яких зростає через зміни клімату. Розвиток державних сервісів, таких як «Державний аграрний реєстр», забезпечує прозорість земельних відносин та спрощує доступ фермерів до програм державної підтримки.

Впровадження розглянутих інноваційних технологій та економічних механізмів є не лише способом мінімізації екологічних ризиків, а й фундаментом для побудови нової моделі аграрної економіки. Це дозволить трансформувати екологічні виклики у можливості для підвищення ефективності виробництва, забезпечення продовольчої безпеки та інтеграції України у глобальні ланцюги доданої вартості на принципах сталого розвитку.

Висновки. Встановлено, що сучасна модель аграрного виробництва в Україні, яка характеризується високим рівнем розораності земель (понад 70%) та домінуванням екстенсивних методів господарювання, генерує системні екологічні ризики. Ідентифіковано, що ключовими дестабілізуючими факторами є порушення науково обґрунтованих сівозмін, хімічне забруднення ґрунтів та водних ресурсів

агрохімікатами, а також деградація фізичної структури ґрунтів. Сільське господарство трансформувалося з гаранта продовольчої безпеки у потужне джерело антропогенного тиску, що вимагає негайної зміни парадигми на засадах сталого розвитку. Доведено доцільність використання модифікованих індексних моделей, зокрема Pesticide DRASTIC та DRASTIC-LU, для просторової оцінки вразливості підземних вод в зонах інтенсивного землеробства. Розрахунки підтвердили, що включення параметрів землекористування (Land Use) та специфічних ваг для типу ґрунту дозволяє значно точніше ідентифікувати зони ризику нітратного та пестицидного забруднення порівняно зі стандартними методами. Це створює наукове підґрунтя для зонування територій та прийняття управлінських рішень щодо обмеження хімічного навантаження. Виявлено, що забезпечення екологічної безпеки ускладнюється накладанням двох трендів: глобальних змін клімату та наслідків військової агресії. Кліматичні зміни призводять до зростання середньорічних збитків (AAL) та зміщення природно-кліматичних зон, що вимагає адаптації технологій. Водночас, воєнні дії сформували специфічні бelligеративні ландшафти (понад 30% земель у зоні ризику), що характеризуються механічною деградацією, хімічним забрудненням важкими металами та замінуванням, що виводить значні площі з обігу на десятиліття. Обґрунтовано, що мінімізація екологічних ризиків можлива лише за умови переходу до концепції «Сільське господарство 4.0». Впровадження технологій точного землеробства (змінні норми внесення, дистанційний моніторинг), біологізація захисту рослин та розвиток циркулярної економіки (переробка відходів у біогаз) дозволяють розірвати зв'язок між зростанням врожайності та збільшенням екологічного сліду. Для реалізації стратегії екологічної безпеки необхідно гармонізувати національне законодавство з вимогами Європейського зеленого курсу (стратегія Farm to Fork). Критично важливим є запровадження дієвих фінансово-економічних інструментів: розвиток ринку зелених облігацій, екологічне страхування ризиків та державна підтримка фермерів, які впроваджують ґрунтозахисні технології. Лише комплексне поєднання технологічних інновацій, жорсткого екологічного моніторингу та

фінансових стимулів дозволить забезпечити сталий розвиток аграрного сектору в умовах повоєнного відновлення.

Список використаних джерел:

1. Тарасюк О. В. Теоретичні засади формування концепції сталого розвитку та її практична реалізація на сучасному етапі розвитку суспільства. *Економіка, управління та адміністрування*, 2025. Vol.111. P. 51–63. doi: 10.26642/ema-2025-1(111)-51-63.
2. Slessarev E.W., Nezgoduk A., Golla J.K., Faybishenko B., Dwivedi D., Nico P.S., Birkholzer J.T., O’Ryan D., Alvarez O., Kersting A.B., Zavarin M. Application of the DRASTIC Model to Assess the Vulnerability of Groundwater Contamination Near Zaporizhzhia Nuclear Power Plant, Ukraine. *ACS ES T Water*, 2024. Vol. 5. Issue 1. P. 366-376. doi: 10.1021/acsestwater.4c00891.
3. Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2025. Paris : OECD Publishing, 2025. URL: https://www.oecd.org/en/publications/agricultural-policy-monitoring-and-evaluation-2025_a80ac398-en/full-report/ukraine_0e71d61e.html
4. European Green Deal. Mission of Ukraine to the European Union. URL: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/en/2633-relations/galuzeve-spivrobotnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda>
5. Дребот О.І. , Бендасюк О.О., Палапа Н.В., Паляничко Н.І., Тараріко О.Г., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л., Дем’янюк О.С., Лазаренко В.І., Райчук Л.А. Продовольча та екологічна безпека України в умовах воєнного стану: колективна монографія /за ред. О.І. Дребот. Київ: Видавництво НУБІП України, 2022. 266 с.
6. Soller D. R. Applying the DRASTIC model: A review of county-scale maps. Reston, VA : U.S. Geological Survey, 1992. DOI: <https://doi.org/10.3133/ofr92297>.
7. Barbulescu A. Assessing Groundwater Vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like Methods: A Review. *Water* 2020, 12, 1356. <https://doi.org/10.3390/w12051356>.
8. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings / L. Aller, T. Bennett, J. H. Lehr et al. Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, 1987. 622 p. (EPA/600/2-87/035). URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=20007H0V.TXT>
9. Climate, Environment and Biodiversity Strategy 2025–2031 / International Fund for Agricultural Development. Rome : IFAD, 2025. 23 p. (EB 2025/145/R.14). URL: <https://webapps.ifad.org/members/eb/145/docs/EB-2025-145-R-14.pdf>
10. Graaff M.-A., Hornslein N., Throop H.L., Kardol P., van Diepen L.T.A. Chapter One - Effects of agricultural intensification on soil biodiversity and implications for ecosystem functioning: A meta-analysis. *Advances in Agronomy*, Academic Press, Volume 155, 2019, P.1-4. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.01.001>.