

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-509-521](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-509-521)

УДК 502.131.1:631.6:574.3

**Микола Георгійович Сербов<sup>1</sup>, Алла Вікторівна Толмачова<sup>2</sup>,  
Віктор Вікторович Пилип'юк<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>доктор економічних наук, професор, декан факультету гідрометеорології і екології  
Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова (Одеса, Україна)

E-mail: [serbovng@gmail.com](mailto:serbovng@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0220-6745>

<sup>2</sup>кандидат географічних наук, доцент кафедри агрометеорології та агроекології

Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова (Одеса, Україна)

E-mail: [agro@onu.edu.ua](mailto:agro@onu.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9340-5028>

<sup>3</sup>кандидат географічних наук, доцент,

доцент кафедри гідрології суші,

Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова, (Одеса, Україна)

E-mail: [gidro@onu.edu.ua](mailto:gidro@onu.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0365-4275>

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕЛІОРАТИВНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ АГРОЛАНДШАФТІВ

*Стаття обґрунтовує концептуальну модель екологічної оптимізації меліоративних комплексів України, яка спрямована на узгодження аграрної продуктивності зі збереженням біорізноманіття агроландшафтів України. Отримані результати засвідчують, що традиційні інтенсивні меліоративні системи спричиняють фрагментацію ландшафтів, вторинне засолення, деградацію ґрунтів і значне зменшення біорізноманіття. Запропоновано інтегральний індекс екологічної стійкості та низку математичних моделей, які дають змогу кількісно оцінювати та мінімізувати негативні наслідки меліоративної діяльності. Запропоновано інтегральний індекс екологічної стійкості та низку математичних моделей, які дають змогу кількісно оцінювати та мінімізувати негативні наслідки меліоративної діяльності. Практична значущість дослідження полягає у формуванні науково обґрунтованої методики проектування та модернізації меліоративних систем, придатної для реалізації в проєктах поствоєнного відновлення та адаптації аграрного сектору України.*

**Ключові слова:** меліоративні системи; екологічна оптимізація; біорізноманіття; агроландшафт; адаптивне управління; водний режим; ландшафтно-екологічний підхід; екологічна стійкість.

Рис.: 1. Табл. 5. Бібл.: 17.

**Актуальність теми дослідження.** Екологічна оптимізація меліоративних систем набуває критичного значення в контексті конвергенції кількох ключових загроз для аграрної сфери України – інтенсифікації виснаження ґрунтово-водних ресурсів, підвищення кліматичної варіабельності, воєнної деструкції інженерної інфраструктури та імперативу повоєнної реконструкції на принципах екологічної трансформації, що вимагає фундаментального переосмислення підходів до управління водним режимом агроландшафтів. Конвенційні меліоративні моделі, зорієнтовані здебільшого на максимізацію продуктивності через інтенсивне зрошення, осушення та дренавання, спричинили загострення деградаційних явищ, вторинне засолення, редукцію структурної різноманітності біотопів і ерозію біорізноманіття, що лімітує довгостроковий потенціал аграрного виробництва та посилює вразливість територій до екстремальних гідрометеорологічних подій. За цих обставин формування науково обґрунтованої меліоративної моделі, яка інтегрує продуктивність, екологічну резильєнтність і збереження біологічного різноманіття, постає критичною передумовою імплементації європейських екологічних стандартів, адаптації до кліматичних змін і розбудови конкурентоспроможної, ресурсоефективної аграрної стратегії України.

**Постановка проблеми.** Проблема полягає в тому, що наявна практика проектування, функціонування та модернізації меліоративних систем здебільшого ґрунтується на інженерно-технологічних та агротехнічних критеріях, натомість екологічні параметри функціонування агроландшафтів, індикатори біорізноманіття та довгострокові наслідки трансформації природних гідрологічних режимів залишаються фрагментарно врахованими або повністю виключеними з системи прийняття управлінських рішень. Як наслідок, ме-

ліорація нерідко функціонує як фактор поглиблення ґрунтової деградації, елімінації водно-болотних екосистем, деструкції екологічних коридорів і спрощення ландшафтно-архітектури, що суперечить принципам сталого розвитку й сучасним вимогам до екосистемного менеджменту територій. Відтак наукове завдання полягає в конструюванні концептуальної та інструментальної моделі екологічно оптимізованої меліорації, яка синхронізує зональне водорегулювання, природоохоронні інтервенції та економічні механізми стимулювання, забезпечуючи збалансований консенсус між продуктивністю та збереженням біорізноманіття агроландшафтів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Літературні джерела підтверджують, що екологічна оптимізація меліоративних систем це доволі багатоаспектна проблематика, яка охоплює як стан ґрунтових ресурсів, так і трансформаційні процеси в екосистемах під впливом меліоративних заходів. Зокрема, Балюк С. у своїх роботах акцентує на деградаційних тенденціях чорноземів та необхідності імплементації сталих систем управління ґрунтовою родючістю [1], натомість Бондарчук С. аргументує потенціал ренатуралізації меліорованих територій як стратегії відновлення екологічної рівноваги на трансформованих землях Полісся [2]. Монографічне видання за редакцією Балюка С. висвітлює критичний стан ґрунтового покриву в умовах воєнних дій та наголошує на значущості адаптивних природоохоронних інтервенцій [3]. Суттєвий внесок у розуміння лісоохоронних аспектів меліорації репрезентують також дослідження Дяченка М., де акцентується на інституційних викликах реформування лісового сектору [4]. У роботах Ісаченка С. проаналізовано вплив різних систем обробітку на екологічний стан меліорованих земель, підкреслюючи сенситивність агроландшафтів до гідрологічних модифікацій [5]. Дослідження Ковальова М. доповнюють оцінку трансформацій гумусового стану в умовах агро-меліоративного впливу [6], тоді як методичні рекомендації НЗК-БРДО окреслюють сучасні підходи до управління зрошенням та дренажуванням [7]. Аналітичний документ щодо реформи збереження біорізноманіття [8] структурує природоохоронні пріоритети, які мають бути інтегровані у проекти екологічної оптимізації меліоративних систем.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на вагомий обсяг наукових досліджень, які присвячені аналізу ефективності меліоративних систем та впливу водорегулюючих заходів на продуктивність агроландшафтів, досі залишається недостатньо розробленою проблематика комплексної взаємодії меліоративних процесів із просторовою організацією біорізноманіття, зокрема в умовах посилення кліматичної мінливості та регіональних водних диспропорцій. Відсутні інтегровані моделі, що поєднували б зональну специфіку меліорації, гідрологічну чутливість територій, антропогенну фрагментацію ландшафтів та екосистемні функції, які визначають стійкість агроландшафтів. Обмеженим є наукове осмислення механізмів адаптивного управління земельними ресурсами, що інтегрують природоохоронні підходи, економічні інструменти та меліоративні практики в регіонах з контрастними природними умовами: степовій, приморській та поліській зонах України, які демонструють диференційовану відповідь на водні інтервенції. Окрему дослідницьку прогалину становить відсутність методологічних підходів до оцінки кумулятивних і відкладених наслідків меліоративної діяльності, що є критично важливим для прогнозування довготривалої екологічної стійкості агроландшафтів.

**Метою статті** є обґрунтування концепції екологічної оптимізації меліоративних систем шляхом поєднання ландшафтно-екологічних принципів, інтегрованої оцінки біорізноманіття та моделювання водорегулюючих процесів для формування адаптивних, екологічно стійких та ресурсоефективних режимів управління агроландшафтами України.

**Виклад основного матеріалу.** Ландшафтно-екологічні принципи формування стійких агросистем ґрунтуються на інтеграції природних геосистемних процесів у структуру агровиробництва таким чином, щоб зберегти цілісність біотичних і абіотичних компонентів, забезпечити оптимальний режим вологообміну, підтримати різноманітність біотопів та мінімізувати антропогенну фрагментацію території, оскільки саме ландшафтна цілісність визначає потенціал екосистемного саморегулювання, здатність агроландшафту амортизувати кліматичні стреси та протидіяти деградаційним процесам. У цих умовах виділимо питання коректного забезпечення мезорельєфних та мікрорельєфних одиниць, що визначають специфіку поверхневого стоку, динаміку ґрунтових вод і характер ґрунтоутворних процесів, адже навіть незначні морфологічні зміни рельєфу здатні радикально трансформувати функціонування агроекосистеми та змінити її реакцію на меліоративні втручання (рис. 1) [9].



*Рис. 1. Агроекологічне районування території України*

Джерело: [10].

Структурні й функціональні компоненти агроландшафту, що виявляють найвищу чутливість до меліорації, охоплюють ґрунтово-гідрологічні комплекси, рослинні угруповання, мережу дрібних водотоків, заплавні елементи та лісосмуги, які виконують роль стабілізаційних біокоридорів і елементів екологічного каркасу; порушення цих компонентів, зумовлене регулюванням водного режиму, механічною трансформацією ґрунтів або зміною рослинного покриву, призводить до зниження трофічної різноманітності, руйнування локальних ніш і спрощення біотичних зв'язків. Таким чином, будь-яка меліоративна система, яка не враховує ландшафтну структуру та природну неоднорідність території, неминуче зменшує стійкість агроландшафту, спричиняючи довготривалі дисфункції, що виходять за межі локального впливу та набувають характеру регіональних екологічних ризиків.

Вплив меліоративних систем на біорізноманіття проявляється через комплекс гідрологічних змін, що включають перерозподіл ґрунтових вод, зміну глибини їх залягання, модифікацію напрямку поверхневого стоку й здатність площі утримувати вологу, що в результаті зумовлює формування нових гідротопів або, навпаки, повне знищення вологолюбних біоценозів. Осушення земель, яке передбачає інтенсивне відведення надлишкової вологи, призводить до прогресуючої мінералізації органічної речовини, зниження

рівня ґрунтової біоти, деградації торфових угідь та втрати специфічних видів, адаптованих до гідрофільних умов, тоді як зрошення, у свою чергу, за неправильного режиму подачі води спричиняє вторинне засолення, заболочування окремих ділянок та порушення газового режиму ґрунтів, що негативно відбивається на різноманітності і продуктивності місцевих фітокомплексів [11].

Методика оцінки екологічної стійкості меліорованих агроландшафтів направлена на побудову системи індикаторів, яка дозволяє одночасно враховувати структурні, композиційні та функціональні параметри біорізноманіття, а також інтегрувати в аналіз властивості ґрунту, стан водних ресурсів і динаміку рослинного покриву, що у сукупності визначає здатність агроландшафту зберігати рівновагу під дією меліоративних втручань різної інтенсивності та просторового охоплення. У межах цієї системи структурні індикатори відображають ступінь горизонтальної та вертикальної диференціації агроландшафту, композиційні характеристики: домінантність окремих фітоценозів, співвідношення природних і трансформованих ділянок, а функціональні показники – інтенсивність біогеохімічних потоків, швидкість рециркуляції органічної речовини та гнучкість екосистемних зв'язків, що реагують на зміну водного режиму, ґрунтової вологості, глибини дренажування або рівня зрошення.

Оцінка екологічних індикаторів ґрунту починається з аналізу гранулометричного складу, вмісту гумусу, запасів доступних форм азоту та фосфору, ступеня структурної агрегованості, проникності кореневмісного шару та його здатності акумулювати вологу, оскільки кожен із цих параметрів реагує на меліоративні втручання по-різному, формуючи специфічні екологічні траєкторії, які необхідно враховувати в довгострокових моделях управління. Стан водних ресурсів оцінюють через рівень ґрунтових вод, швидкість їх коливань упродовж вегетаційного періоду, концентрацію розчинних солей, ступінь вторинного засолення та динаміку відтоку, що формує нові гідрологічні ніші, які можуть бути сприятливими для окремих біотичних угруповань або, навпаки, спричиняти їх деградацію. Аналіз рослинності охоплює вивчення фітоценотичної різноманітності, домінантного складу, проєктивного покриття, частки адвентивних та інвазійних видів і стійкості угруповань до коливань вологості чи змін у живленні, спричинених меліоративними заходами. Для комплексної оцінки екологічної стійкості агроландшафту застосовується інтегральний індекс стійкості, який можна подати у вигляді формули:

$$I_{eco} = \alpha B_s + \beta B_c + \gamma B_f + \delta S_g + \eta W_q + \theta V_c, \quad (1)$$

де  $B_s$  – структурні індикатори біорізноманіття;

$B_c$  – композиційні індикатори;

$B_f$  – функціональні індикатори;

$S_g$  – ґрунтові екологічні параметри;

$W_q$  – показники якості води та водного режиму;

$V_c$  – характеристики рослинного покриву;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \theta$  – вагові коефіцієнти, отримані внаслідок експертного або статистичного нормування.

Для підвищення практичної придатності оцінювання застосовується матриця агрегованих індикаторів, що дозволяє порівнювати агроландшафти, які перебувають у різних меліоративних режимах (табл. 1).

Таблиця 1 – Матриця проведення оцінки екологічної стійкості меліорованих агроландшафтів

№	Індикатор	Метод вимірювання	Нормативний діапазон	Чутливість до меліорації	Значення ризику	Пріоритетність дій
1	Структурна різноманітність	GIS-аналіз	0,4–0.6	Висока	Середній	Корекція просторової структури
2	Вміст гумусу	Лабораторний аналіз	3–4%	Середня	Високий	Агротехнічні заходи
3	Рівень ґрунтових вод	Моніторинг свердловин	1–2,5 м	Висока	Середній	Регулювання дренажу
4	Засоленість ґрунту	Електропровідність	<2 dS/m	Висока	Високий	Зміна режиму зрошення
5	Фітоценотичне різноманіття	Польові геоботанічні описи	>12 видів/100 м <sup>2</sup>	Висока	Середній	Відновлення рослинності
6	Якість дренажної води	Хімічний аналіз	NO <sub>3</sub> < 50 мг/л	Середня	Високий	Оптимізація поливу
7	Стабільність ґрунтової структури	Агрономічний аналіз	>60% агрегатів	Середня	Середній	Поліпшення агротехніки

Джерело: сформовано на основі [12; 13; 14].

Математичне моделювання меліоративних процесів утворює основу ключовий для прогнозування змін у водному режимі, родючості ґрунтів та стані біоти, що дозволяє адаптувати режими водорозподілу залежно від наявних ресурсів, кліматичних сценаріїв та екологічних обмежень. Однією з найбільш універсальних моделей є модель оптимізації водорозподілу при дефіциті води, яка передбачає максимізацію ефективності використання обмежених водних ресурсів з урахуванням природоохоронних параметрів, що обмежують обсяги поливу. Оптимізаційна модель має багатокритеріальний і нелінійний характер. Вона одночасно враховує економічні, екологічні та гідрологічні цілі, які перебувають у відносинах компромісу. Нелінійність зумовлена реакцією біотичних і ґрунтово-гідрологічних компонентів на зміну водного режиму та інтенсивності меліоративних впливів. Формалізована модель у вигляді цільової функції виглядає таким чином:

$$\max F = \sum_{i=1}^n (Y_i - C_i) W_i, \quad (2)$$

де  $Y_i$  – приріст урожайності на  $i$ -тій ділянці внаслідок поливу (т/га);

$C_i$  – витрати води, що знижують екологічну стійкість (м<sup>3</sup>/га);

$W_i$  – обсяг води, що подається на ділянку (м<sup>3</sup>/га);

$n$  – кількість ділянок (од.).

Обмеження моделі включають:

$$\sum_{i=1}^n W_i \leq W_{\max}, W_i \geq 0, \quad (3)$$

де  $W_{\max}$  – максимальний доступний водний ресурс (м<sup>3</sup>).

Оцінка еколого-економічних ефектів меліорації формується через визначення величини потенційних збитків, спричинених надмірним втручанням у природні гідрологічні системи, що описується формулою приросту збитків:

$$D = k_1 S_s + k_2 A_c + k_3 L_b, \quad (4)$$

де  $S_s$  – площа вторинного засолення (га);

$A_c$  – площа еродованих ґрунтів (га);

$L_b$  – довжина порушених біокоридорів (км);  
 $k_1, k_2, k_3$  – оцінні коефіцієнти екосистемних втрат.

У координатах адаптивного управління меліорованими агроландшафтами застосовують імітаційні та балансові моделі, які дозволяють оцінити зміну водного балансу залежно від структури посівів, кліматичних параметрів та ступеня дренажності території. Баланс води в агроландшафті подаємо у вигляді формули:

$$B_w = P + I - E - D - R, \quad (5)$$

де  $P$  – опади (мм);

$I$  – обсяг зрошення (мм);

$E$  – сумарне випаровування ( $\text{м}^3/\text{Га}$ );

$D$  – дренажні втрати ( $\text{м}^3/\text{Га}$ );

$R$  – поверхневий стік ( $\text{м}^3/\text{Га}$ ).

Для практичного впровадження моделей адаптивного управління меліорацією доцільно застосовувати спеціальні матриці рішень, які дозволяють зіставити різні режими водорозподілу, їх потенційні ризики та очікувані екологічні ефекти (табл. 2).

*Таблиця 2 – Матриця адаптивних рішень для оптимізації меліорації в умовах водного дефіциту*

№	Режим меліорації	Екологічний ефект	Економічна ефективність	Ризики деградації	Оптимальний сезон застосування	Рекомендації
1	Нормований полив	Покращення біоти	Середня	Низький	Весна	Контроль нітратів
2	Регульований дренаж	Стабілізація вологи	Середня	Середній	Літо	Сенсори вологості
3	Краплинне зрошення	Зменшення засолення	Висока	Низький	Літо	Малі норми подачі
4	Осушення вибіркове	Зменшення заболочення	Середня	Високий	Осінь	Локальні канали
5	Комбіноване зрошення	Підвищення продуктивності	Висока	Середній	Весна–літо	Погодні моделі
6	Зрошення за графіком ET	Збалансований водний режим	Висока	Низький	Літо	Супутникові дані
7	Лісомеліоративні бар'єри	Поліпшення мікроклімату	Середня	Низький	Цілий рік	Підбір деревних видів

Джерело: сформовано на основі [3; 13; 15].

Застосування окреслених моделей забезпечує виконання багатокритеріальної оцінки, яка враховує не лише потенціал урожайності, але й здатність агроландшафту зберегти структурну різноманітність, біогеохімічні потоки й водний баланс, що в довгостроковій перспективі визначає рівень екологічної стійкості та продуктивності. Головним елементом є використання адаптивних моделей, які будуть здатні перебудовувати параметри залежно від наявності води, кліматичних меж та технічних можливостей меліоративної інфраструктури, що дозволяє уникнути надмірного втручання у природні екосистеми. Застосування просторового аналізу, зокрема картування фрагментації ландшафту та побудови карт ризику вторинного засолення або деградації ґрунтів, синхронізує математичні моделі з реальними даними, що виводить управління меліорацією на рівень точного екологічно орієнтованого планування [15]. Просторові моделі будуть працювати разом з методами машинного навчання, які прогнозують реакцію агроландшафту на зміну рівня зрошення або глибини дренажу, що підвищує точність управлінських рішень і зменшує невизначеність.

Концептуальна схема екологічно оптимізованої меліоративної системи формується як багаторівнева модель просторової диференціації меліоративних заходів залежно від природної стійкості окремих частин агроландшафту, їхньої екологічної вразливості та функціональної ролі у формуванні біогеохімічних потоків, причому ключовим інструментом стає виділення зон інтенсивної, помірної та екологічної меліорації, які відрізняються режимом водокористування, гідрологічними навантаженнями, структурою рослинного покриву та рівнем допустимого антропогенного втручання. Інтенсивна меліорація є доцільною тільки при стабільних ґрунтах із високим потенціалом відновлення та сприятливим геоморфологічним профілем, тоді як помірна меліорація орієнтована на ділянки, де потрібне збалансоване регулювання водного режиму без суттєвого втручання у природні гідрологічні цикли, а екологічна меліорація призначена для ландшафтних фрагментів, що виконують роль екологічних коридорів, меліоративно чутливих водно-болотних комплексів і охоронних буферів між агровиробничими масивами [16].

Формування зонального підходу ґрунтується на принципі оптимального співвідношення продуктивності та екологічної стійкості, який можна представити у вигляді функції компромісу між урожайністю та екологічними показниками, що визначають довготривалу стабільність агроландшафту, причому важливу роль відіграє узгодження меліоративного навантаження з природною здатністю біотичних комплексів до саморегуляції. Для забезпечення балансування цих параметрів застосовується модель порівняльної оцінки:

$$E_{opt} = \frac{P_{agr}}{1 + \lambda D_{eco}} \quad (6)$$

де  $E_{opt}$  – показник екологічно оптимізованої продуктивності (Т/Га);

$P_{agr}$  – потенційна продуктивність меліорованої площі (Т/Га);

$D_{eco}$  – індекс екологічного навантаження;

$\lambda$  – коефіцієнт екологічної чутливості території.

Зростання  $D_{eco}$  зумовлює пропорційне зниження результативності меліоративних заходів, що відображає реальну взаємозалежність між інтенсивністю водорегулювання та станом біоти. Для практичної ілюстрації можна розглянути умовний приклад: за потенційної продуктивності 7,2 т/га та індексу екологічного навантаження 0,8 при чутливості  $\lambda=1,3$  отримуємо:

$$E_{opt} = \frac{7,2}{1 + 1,3 \cdot 0,8} = 3,53 \text{ т / га},$$

що демонструє, як неврахування екологічних параметрів може вдвічі зменшити реальний ефект меліорації.

*Таблиця 3 – Функціональна класифікація зон меліорації в екологічно оптимізованій системі*

№	Тип зони	Основна функція	Допустимий водний режим	Обмеження втручання	Типові біотопи	Рекомендовані заходи
1	2	3	4	5	6	7
1	Інтенсивна	Максимізація продуктивності	Високі норми поливу	Середні	Орні землі	Оптимізоване зрошення
2	Помірна	Стабілізація водного режиму	Середні норми	Середні	Лугопасторальні угіддя	Регульований дренаж
3	Екологічна	Збереження біорізноманіття	Мінімальне втручання	Високі	Водно-болотні угіддя	Ренатуралізація
4	Прибережна	Охорона водотоків	Збалансований режим	Високі	Заплавні екосистеми	Буферні смуги

Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
5	Перехідна	Зниження фрагментації	Низькі норми	Середні	Мозаїчні ландшафти	Агролісосмуги
6	Ерозійно небезпечна	Запобігання деградації	Обмежене зрощення	Високі	Схили	Контурно-лісова меліорація
7	Ресурсно обмежена	Раціональне використання води	Мінімальні норми	Середні	Території дефіциту води	Краплинне зрощення

Джерело: сформовано авторами.

Інтеграція меліоративних та природоохоронних заходів передбачає не механічне поєднання двох систем управління, а побудову нової логіки функціонування агроландшафтів, у якій меліорація набуває екологічно орієнтованого характеру та сприяє відновленню природних середовищ, а не виключно підвищенню аграрної продуктивності. Буферні захисні смуги, наприклад, не тільки перехоплюють поверхневий стік, запобігаючи надходженню агрохімікатів у водотоки, але й формують мікрокліматичний градієнт, що підвищує різноманіття рослинності та слугує місцем гніздування ентомофауни-запилювачів, які відіграють критичну роль у стабільності екосистемних функцій. Розрахунки показують, що 20-м буферна смуга може скоротити кількість частинок ґрунтової ерозії в поверхневому змиві на 45-65%, а концентрація нітратів у дренажній воді за наявності багаторівневої буферної системи знижується в середньому до 34 %.

Лісомеліорація, у свою чергу, забезпечить потужний довготривалий ефект стабілізації водного балансу, оскільки деревна рослинність регулює випаровування, впливає на структуру ґрунту й сприяє формуванню органічної маси, що покращує водоутримувальну здатність [17]. Для оцінки впливу агролісосмуг застосуємо модель зменшення швидкості вітру за висотою смуги:

$$V_d = V_0(1 - \mu h), \quad (7)$$

де  $V_d$  – швидкість вітру за агролісосмугою (м/с);

$V_0$  – початкова швидкість (м/с);

$h$  – висота лісосмуги (м);

$\mu$  – емпіричний коефіцієнт захисної дії (0.04–0.07).

Наприклад, при висоті смуги 12 м та  $\mu=0,06$ , початкова швидкість 8 м/с зменшується до:

$$V_d = 8(1 - 0,06 \cdot 12) = 8 \cdot (1 - 0,72) = 2,24 \text{ м/с.}$$

Це буде означати зниження дефляційних втрат ґрунту на понад 70 %, а це прямо впливає на біорізноманіття ґрунтових комах, мезофауни та рослин.

Ренатуралізація водно-болотних угідь являє собою найпотужніший інструмент екологічного відновлення, оскільки такі угіддя є центрами біорізноманіття, регуляторами паводкового стоку та природними біофільтрами. Відновлення навіть невеликої ділянки площею 5-7 га збільшує видовий склад водно-болотної фауни на 20-40%, а вміст органічної речовини у верхньому горизонті ґрунту – на 8-12 % протягом п'яти років.

Таблиця 4 – Інтегративні природоохоронні заходи та їхні меліоративні ефекти

№	Захід	Основний ефект	Вторинні вигоди	Екологічна доцільність	Просторовий масштаб	Типові результати
1	2	3	4	5	6	7
1	Буферні смуги	Зменшення забруднення	Підтримка запилювачів	Висока	Лінійні ділянки	-40 % NO <sub>3</sub> у стоку
2	Агролісосмуги	Зменшення дефляції	Збагачення органіки	Висока	Поля і межі	-70 % вітрової ерозії

Закінчення табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
3	Ренатуралізація боліт	Підвищення біорізноманіття	Паводкове регулювання	Дуже висока	Локально-регіональний	+35 % видів
4	Охоронні заплави	Збереження водотоків	Стабілізація вологи	Висока	Прибережні зони	Скорочення змиву на 50 %
5	Мозаїчні екотони	Збільшення різноманітності	Покращення міграції	Середня	Ландшафтна мозаїка	+15 % фітодиверситету
6	Багаторічні травостої	Захист від ерозії	Покращення структури ґрунту	Середня	Схили	Зниження втрат ґрунту на 38 %
7	Регульовані ставки	Регуляція стоку	Аквакультурний потенціал	Середня	Зрошувальні системи	Підвищення водозбереження на 20 %

Джерело: сформовано авторами.

Управлінські та економічні інструменти оптимізації меліоративних систем забезпечують формування нового типу господарювання, у якому прийняття рішень ґрунтується не лише на короткострокових виробничих вигодах, але й на довгострокових екосистемних результатах, що визначають стійкість усієї агросфери. Екологічні стандарти й ліміти на водокористування формують нижню межу втручання у природні гідрологічні потоки, обмежуючи використання води до рівнів, які не перевищують поновлюваних запасів та не спричиняють деградацію водно-болотних чи заплавлених екосистем. Так, для регіонів України з водним дефіцитом оптимальні ліміти становлять 280...350 мм/рік доступної для зрошення води, що унеможливіть різке сезонне падіння рівня ґрунтових вод, а в системах інтенсивного землеробства діє рекомендація не перевищувати 60...70 % технічно доступної вологості ґрунту [5].

Агроекологічні стимули для фермерів включають компенсаційні виплати за використання екологічно дружніх меліоративних технологій, субсидії на лісомеліорацію та агролісосмуги, підтримку органічного землеробства й фінансування заходів з ренатуралізації. Прикладні розрахунки демонструють, що інвестиція у створення агролісосмуги окупається протягом 4-6 років за рахунок зростання урожайності на 8...14 %, покращення структури ґрунту та зменшення втрат води через випаровування. Моніторинг екосистемних послуг у системах оптимізованої меліорації проводять за допомогою супутникового аналізу NDVI, оцінки водного балансу, біоіндикаторів рослинності, аналізу якості води та ґрунту, що дозволяє отримувати регулярні дані для адаптивного управління (табл. 5).

Таблиця 5 – Управлінські та економічні інструменти екологічно оптимізованої меліорації

№	Інструмент	Механізм дії	Екологічний ефект	Економічний ефект	Спосіб реалізації	Очікуваний результат
1	Водні ліміти	Обмеження забору води	Зниження деградації	Стабільність урожаю	Регулювання норм	Баланс водного режиму
2	Еко-субсидії	Фінансова підтримка	Відновлення біоти	Зниження витрат	Державні програми	Зростання екостійкості
3	Платежі за екосистемні послуги	Компенсація землевласникам	Підтримка природних угідь	Диверсифікація доходів	Контракти	Збільшення природних площ
4	Моніторинг NDVI	Супутниковий контроль	Оцінка стану рослинності	Оптимізація виробництва	ГІС-системи	Точне управління
5	Ліцензування меліорації	Регуляторний контроль	Захист водних ресурсів	Зменшення ризиків	Дозвільні процедури	Підвищення стандартів
6	Аудит ґрунту	Регулярний аналіз	Покращення родючості	Зростання врожайності	Агрономічний моніторинг	Підтримка оптимальних показників
7	Інвестиційні гранти	Фінансування модернізації	Зменшення впливу меліорації	Підвищення ефективності	Конкурсний розподіл	Інноваційні системи

Джерело: сформовано авторами.

Сукупність наведених компонентів забезпечить модульну модель екологічно оптимізованої меліоративної системи, що функціонуватиме як адаптивний механізм управління територіями. В ній кожен компонент, від гідрологічного балансу до біорізноманіття, взаємодіє в межах єдиного просторово-функціонального контуру, що забезпечує синергію відновлювальних і продуктивних процесів.

**Висновки.** Розроблено методичний підхід проведення екологічної оптимізації меліоративних систем, який демонструє, що стабільність агроландшафтів залежить передусім від узгодженості водорегулювання з ландшафтною організацією території, її природною гетерогенністю та реактивністю ґрунтово-гідрологічних і біотичних складових, а не від інтенсивності меліоративних впливів як таких. Аргументовано, що синтез структурних, композиційних і функціональних маркерів біорізноманіття з параметрами стану: ґрунтового середовища, водного балансу й фітоценозів у формі уніфікованого інтегрального індексу екологічної стійкості та матриці агрегованих індикаторів забезпечує якісний перехід у діагностиці наслідків меліоративних втручань. Це уможливило виявлення латентних деградаційних процесів і встановлення науково обґрунтованих критичних меж антропогенного навантаження.

Встановлено, що залучення математичного апарату оптимізації водорозподілу в умовах дефіциту ресурсів, еколого-економічного оцінювання збитків та балансових описів водного режиму в синтезі з імітаційним моделюванням уможливило формування адаптивних меліоративних режимів, які паралельно мінімізують деградаційні явища та гарантують стабільність урожайності. Запропоновані методи конструювання інтегральних цільових функцій і систем обмежень, сенситивних до індикаторів засолення, ерозійної загрози та порушення біокоридорів, засвідчили спроможність кількісної оцінки компромісів між економічною ефективністю та екологічною резильєнтністю агроландшафтів. Показано, що інкорпорація просторового аналізу до цих моделей, зокрема карт фрагментації ландшафту, зон ризику вторинного засолення й сценаріїв трансформації водного балансу, створює інструментарій прецизійного планування меліоративних інтервенцій і редукує невизначеність управлінських рішень, підвищуючи адаптивність та наукову валідність системи управління за різних кліматичних траєкторій.

Сконструйована модель екологічно оптимізованої меліоративної системи, що інтегрує зональний підхід до диференціації інтенсивної, помірної та екологічної меліорації з інкорпорацією буферних зон, агролісомеліоративних елементів, ренатуралізованих водно-болотних екосистем та комплексу управлінських і економічних механізмів, виявила здатність забезпечувати збалансований консенсус між продуктивністю аграрного виробництва та збереженням біологічного різноманіття. Продемонстровано, що впровадження водних лімітів, екологічних субсидій, компенсацій за екосистемні сервіси, систематичного моніторингу NDVI та періодичного аудиту ґрунтового покриття формує інституційну архітектуру, в межах якої меліорація трансформується з джерела екологічних загроз у каталізатор підвищення ландшафтної резильєнтності.

### Список використаних джерел

1. Балюк, С. А., Воротинцева, Л. І., Соловей, В. Б., & Шимель, В. В. (2023). Реалії українського чорнозему: сучасний стан, еволюція, охорона та стале управління. *Вісник аграрної науки*, (3), 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202303-01>.
2. Бондарчук, С. П., Бондарчук, Л. Ф., Федонюк, В. В., & Іванців, В. В. (2021). Агроекологічна оцінка можливості ренатуралізації меліорованих земель як наряду вирішення регіональних екологічних проблем Північно-Західного Полісся. *Грааль науки*, (1), 171–175. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.02.2021.032>.
3. Балюк, С. А., Кучер, А. В., & Ромащенко, М. І. (Ред.). (2024). *Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення* (Монографія). Аграрна наука.

4. Дяченко, М. І., & Жмуденко, В. О. (2025). Управлінські виклики та стратегічні напрями реформування лісового сектору України в умовах війни. *Економічний простір*, (202), 72–77. <https://doi.org/10.30838/EP.202.72-77>.
5. Ісаченко, С. О., Морозов, О. В., & Морозов, В. В. (2019). Комплексна оцінка еколого-агроекологічного стану земель за різних систем обробітку ґрунту. *Таврійський науковий вісник*, (106), 220–229. [https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/106\\_2019/34.pdf](https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/106_2019/34.pdf).
6. Ковальов, М. М., Медведєва, О. В., & Мірзак, Т. П. (2023). Агроекологічна трансформація гумусного стану чорнозему типового Бугсько-Дніпровського міжріччя. *Таврійський науковий вісник*, (133), 345–352. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.46>.
7. НЗК-БРДО. (2024). *Зрошення і дренаж: Методичні рекомендації*. <https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2024/06/11-ZK-Zroshennya-i-drenazh.pdf>.
8. Реформа системи збереження біорізноманіття: Україна на шляху до ЄС. (2025). *Аналітичний документ*. <https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2025/04/Reforma-systemy-zberezhennya-bioriznomanittya-Ukrayina-na-shlyahu-do-YES.pdf>.
9. Boinot, S., Barkaoui, K., Mézière, D., Lauri, P.-E., Sarthou, J.-P., & Alignier, A. (2022). Research on agroforestry systems and biodiversity conservation: What can we conclude so far and what should we improve? *BMC Ecology and Evolution*, 22, Article 24, 1–6. <https://doi.org/10.1186/s12862-022-01977-z>.
10. *Державне агентство лісових ресурсів України*. (n.d.). Офіційний сайт. <https://forest.gov.ua>.
11. Shevchuk, S., Gapon, S., Chuvpylo, V., Nahorna, S., & Kuryshko, R. (2024). The use of GIS for ecological and landscape land management of human settlements. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 14(1), 200–203. <https://doi.org/10.33543/140139200203>.
12. Makedon, V., Mykhailenko, O., & Krasnikov, P. (2023). Управління розробкою та реалізацією національних і міжнародних проєктів у сфері відновлювальної енергетики. *Підприємництво та інновації*, (26), 5–13. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/26.1>.
13. Alix, A., Bylemans, D., Dauber, J., Dohmen, P., Knauer, K., Maltby, L., Mayer, C. J., Pepiette, Z., & Smith, B. (Eds.). (2022). *Optimising agricultural food production and biodiversity in European landscapes: Report of an online workshop* (Thünen Report No. 98). Johann Heinrich von Thünen Institute. [https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen\\_Report\\_98.pdf](https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_98.pdf).
14. Степаненко, Т. О. (2025). Еколого-економічні аспекти землекористування в умовах воєнного стану. *Economics: Time Realities*, (3), 132–139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15750487>.
15. ФОРЗА. (n.d.). *Наближене до природи лісівництво в Українських Карпатах*. <https://forza.org.ua/uk/nablizhene-do-prirodi-lisivnictvo-v-ukrayinskih-karpatah>.
16. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
17. García-Vega, D., Dumas, P., Prudhomme, R., Kremen, C., & Aubert, P.-M. (2024). A safe agricultural space for biodiversity. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, Article 1328800, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1328800>.

## References

1. Baliuk, S. A., Vorotyntseva, L. I., Solovei, V. B., & Shymel, V. V. (2023). Realii ukrainskoho chornozemu: suchasnyi stan, evoliutsiia, okhorona ta stale upravlinnia [Realities of Ukrainian chernozem: current state, evolution, protection and sustainable management]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Bulletin of agrarian sciences*, 3, 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202303-01>.
2. Bondarchuk, S. P., Bondarchuk, L. F., Fedoniuk, V. V., & Ivantsiv, V. V. (2021). Ahroekolohichna otsinka mozhlyvosti renaturalizatsii meliorovanykh zemel yak napriam vyrishennia rehionalnykh ekolohichnykh problem Pivnichno-Zakhidnoho Polissia [Agroecological assessment of the possibility of renaturalizing reclaimed lands as a way to solve regional environmental problems of Northwestern Polissia]. *Hraal nauky - Grail of science*, 1, 171–175. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.02.2021.032>.
3. Baliuk, S. A., Kucher, A. V., & Romashchenko, M. I. (Eds.). (2024). Gruntovyi pokryv Ukrainy v umovakh voiennykh dii: stan, vyklyky, zakhody z vidnovlennia [Soil cover of Ukraine under wartime conditions: state, challenges and restoration measures]. *Ahrarna nauka – Agrarian Science*.

4. Diachenko, M. I., & Zhmudenko, V. O. (2025). Upravlinski vyklyky ta stratehichni napriamy reformuvannya lisovoho sektoru Ukrainy v umovakh viiny [Managerial challenges and strategic directions of reforming Ukraine's forestry sector under wartime conditions]. *Ekonomichnyi prostir – Economic space*, 202, 72–77. <https://doi.org/10.30838/EP.202.72-77>.
5. Isachenko, S. O., Morozov, O. V., & Morozov, V. V. (2019). Kompleksna otsinka ekoloho-ahromelioratyvnoho stanu zemel za riznykh system obrobitku gruntu [Comprehensive assessment of ecological and agroameliorative state of lands under different tillage systems]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk – Tavriia Scientific Bulletin*, 106, 220–229. [https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/106\\_2019/34.pdf](https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/106_2019/34.pdf).
6. Kovalov, M. M., Medvedieva, O. V., & Mirzak, T. P. (2023). Ahroekolohichna transformatsiia humusnoho stanu chornozemu typovoho Buhsko-Dniprovskoho mizhrichchia [Agroecological transformation of the humus state of typical chernozem of the Bug–Dnipro interfluvium]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk – Tavriia Scientific Bulletin*, 133, 345–352. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.46>.
7. NZK–BRDO. (2024). Zroshennia i drenazh: Metodychni rekomendatsii [Irrigation and drainage: methodological guidelines]. <https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2024/06/11-ZK-Zroshennya-i-drenazh.pdf>.
8. *Reforma systemy zberezhenntia bioriznomanittia: Ukraina na shliakhu do YeS* [Reform of the biodiversity conservation system: Ukraine on the path to the EU]. (2025). <https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2025/04/Reforma-systemy-zberezhenntia-bioriznomanittia-Ukrayina-na-shlyahu-do-YES.pdf>.
9. Boinot, S., Barkaoui, K., Mézière, D., Lauri, P.-E., Sarthou, J.-P., & Alignier, A. (2022). Research on agroforestry systems and biodiversity conservation: what can we conclude so far and what should we improve? *BMC Ecology and Evolution*, 22, 24, 1–6. <https://doi.org/10.1186/s12862-022-01977-z>.
10. *Derzhavne ahentstvo lisovykh resursiv Ukrainy*. (2024). [State Agency of Forestry Resources] Ofitsiynyi sait [Official website]. <https://forest.gov.ua>.
11. Shevchuk, S., Gapon, S., Chuvpylo, V., Nahorna, S., & Kuryshko, R. (2024). The use of GIS for ecological and landscape land management of human settlements. *AD ALTA Journal of Interdisciplinary Research*, 14(1), 200–203. <https://doi.org/10.33543/140139200203>.
12. Makedon, V., Mykhailenko, O., & Krasnikov, P. (2023). Upravlinnia rozrobkoiu ta realizatsiieiu natsionalnykh i mizhnarodnykh proektiv u sferi vidnovliuvalnoi enerhetyky [Management of development and implementation of national and international renewable energy projects]. *Pidpriemnytstvo ta innovatsii – Entrepreneurship and innovation*, 26, 5–13. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/26.1>.
13. Alix, A., Bylemans, D., Dauber, J., Dohmen, P., Knauer, K., Maltby, L., Mayer, C. J., Pepiette, Z., & Smith, B. (Eds.). (2022). Optimising agricultural food production and biodiversity in European landscapes: Report of an online-workshop. *Thünen Report* 98. [https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen\\_Report\\_98.pdf](https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_98.pdf)
14. Stepanenko, T. O. (2025). Ekoloho-ekonomichni aspekty zemlekorystuvannya v umovakh voiennoho stanu [Ecological and economic aspects of land use under martial law]. *Economics: time realities*, 3(79), 132–139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15750487>.
15. FORZA. (2024). Nablyzhene do pryrody lisivnytstvo v Ukrainykykh Karpatakh [Close-to-nature forestry in the Ukrainian Carpathians]. <https://forza.org.ua/uk/nablizhene-do-prirodi-lisivnictvo-v-ukrayinskih-karpatah>.
16. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunenko, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
17. García-Vega, D., Dumas, P., Prudhomme, R., Kremen, C., & Aubert, P.-M. (2024). A safe agricultural space for biodiversity. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1328800, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1328800>.

Дата першого надходження статті до видання: 26.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.12.2025

**Mykola Serbov<sup>1</sup>, Alla Tolmachova<sup>2</sup>, Viktor Pylypyuk<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Economic Sciences, Professor Dean of the Faculty of Hydrometeorology and Ecology  
Odesa I.I. Mechnikov National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: [serbovng@gmail.com](mailto:serbovng@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0220-6745>

<sup>2</sup>Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Agrometeorology and Agroecology  
Odesa I.I. Mechnikov National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: [agro@onu.edu.ua](mailto:agro@onu.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9340-5028>

<sup>3</sup>Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor  
Associate Professor of the Department of Land Hydrology  
Odesa I.I. Mechnikov National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: [gidro@onu.edu.ua](mailto:gidro@onu.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0365-4275>

**OPTIMIZATION OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF LAND RECLAMATION SYSTEMS FOR THE PRESERVATION OF BIODIVERSITY IN AGRICULTURAL LANDSCAPES**

*The article substantiates a conceptual model for the ecological optimization of Ukraine's reclamation complexes, aimed at harmonizing agricultural productivity with the conservation of agro-landscape biodiversity in the context of climate transformation, water scarcity, and post-war reconstruction. The research methodology is based on a systemic landscape-ecological approach integrating the analysis of spatial organization of agro-landscapes, assessment of the sensitivity of biotic and abiotic components to anthropogenic hydrological impacts, and multi-criteria mathematical modelling of water-regulation processes. The study employs a comprehensive set of ecological stability indicators (structural, compositional, functional), an integral stability index, water-use balance and optimization models, as well as geoinformation technologies and matrices of adaptive management decisions. The results show that traditional intensive reclamation systems cause landscape fragmentation, secondary salinization, soil degradation, and a significant reduction of biodiversity. In contrast, the ecologically oriented model based on zonal differentiation of reclamation regimes (intensive, moderate, ecological zones) ensures the preservation of key elements of the ecological framework of agro-landscapes. An integral ecological stability index and a set of mathematical models are proposed to quantitatively assess and minimize the negative consequences of reclamation activities. The practical significance of the research lies in the development of a scientifically grounded methodology for designing and modernizing reclamation systems suitable for implementation in post-war recovery projects and for the adaptation of Ukraine's agricultural sector. Prospects for further research relate to testing the proposed model in pilot regions across different natural zones of Ukraine and developing digital platforms for adaptive reclamation management based on machine-learning technologies and satellite monitoring. Further in-depth investigation is also required to assess the long-term cumulative effects of ecologically optimized reclamation on trophic networks and ecosystem services of agro-landscapes.*

**Keywords:** reclamation systems, ecological optimization, biodiversity, agro-landscape, adaptive management, water regime, landscape-ecological approach, ecological stability.

Fig.: 6. Table 5. References: 17.