

ISSN 2077–4893 (Print)
ISSN 2077–4915 (Online)

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ



1 • 2026

Виходить чотири рази на рік

ЗАСНОВНИКИ

**Інститут агроекології і природокористування
Національної академії аграрних наук України**

Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України»

**Всеукраїнська громадська організація
«Асоціація агроекологів України»**

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

вул. Метрологічна, 12, Київ-143, 03143
тел. (044) 522-60-62; e-mail: agroecojournal@ukr.net
<https://journalagroeco.org.ua>

*Журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»)
згідно з Наказом МОН України від 17.03.2020 № 409
для публікації основних результатів дисертаційних робіт та матеріалів
досліджень вчених теоретичного і практичного характеру з актуальних питань
за спеціальностями: 101 – Екологія; 201 – Агронімія;
091 – Біологія; 051 – Економіка; 205 – Лісове господарство;
204 – Технологія виробництва та переробки продукції тваринництва.*

*Журнал включено до міжнародних інформаційних та наукометричних баз:
Research Bib Journal Database (Японія)
Index Copernicus (Республіка Польща)
Google Scholar (США)
Ulrich's Periodicals Directory (США)*

Відповідальність за зміст і достовірність поданих матеріалів та точність
наведених даних несуть автори наукових статей.
Редколегія не завжди поділяє думки авторів статей

**Журнал друкується і поширюється через мережу Інтернет
за рішенням вченої ради Інституту агроекології і природокористування НААН
(протокол № 1 від 17 лютого 2026 р.)
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 23578-13418 ПР від 27.09.2018.**

Підписано до друку 27.02.2026 р. Формат 70×100/16. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 17,42. Наклад 250 прим. Зам. № АЕ-01–26.
Оригінал-макет та друк ТОВ «ДІА». 03022, Київ-22, вул. Васильківська, 45

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ

1 • 2026



КИЇВ • 2026

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ

1 • 2026

AGROECOLOGICAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

DEMYANYUK O., Doctor of Agricultural Sciences, Prof., Corresponding member of NAAS

Executive Secretary

SHUMYHAI I., Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher

BUDZANIVSKA I., **TERTYCHNA O.**,

*Doctor of Biological Sciences,
Prof. (Ukraine)*

*Doctor of Biological Sciences,
Prof. (Ukraine)*

GONCHARENKO I.,

*Doctor of Biological Sciences,
Prof. (Ukraine)*

TKACH Ye.,

*Doctor of Biological Sciences,
Senior Researcher (Ukraine)*

DREBOT O.,

*Doctor of Economic Sciences, Prof.,
Academician of NAAS (Ukraine)*

CHOBOTKO G.,

*Doctor of Biological Sciences,
Prof. (Ukraine)*

KLEPKO A.,

*Doctor of Biological Sciences,
Prof. (Ukraine)*

KHOMIAK I.,

*Doctor of Biological Sciences,
Docent (Ukraine)*

LISOVYY M.,

*Doctor of Agricultural Sciences,
Prof. (Ukraine)*

SHEVCHUK L.,

*Doctor of Biological Sciences,
Prof. (Ukraine)*

MUDRAK O.,

*Doctor of Agricultural Sciences,
Prof. (Ukraine)*

SHERSTOBOEVA O.,

*Doctor of Agricultural Sciences,
Prof. (Ukraine)*

PALAPA N.,

*Doctor of Agricultural Sciences,
Prof. (Ukraine)*

YUKHNOVSKYI V.,

*Doctor of Agricultural Sciences,
Prof. (Ukraine)*

PARFENYUK A.,

*Doctor of Biological Sciences,
Prof. (Ukraine)*

SYMOCHKO L.,

*Candidate of Biological Sciences,
Docent (Ukraine; Portugal)*

DURSUN S.,

PhD, Prof. (Turkey)

SKYBA V.,

*Doctor of Agricultural Sciences,
Docent (Ukraine)*

COELHO PINHEIRO M.,

*PhD,
Prof. (Portugal)*

TARARIKO O.,

*Doctor of Agricultural Sciences,
Prof., Academician of NAAS (Ukraine)*

SOBCZYK V.,

*Doctor of Agricultural Sciences,
Prof. (Poland)*

KYIV • 2026

НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ

1 • 2026

AGROECOLOGICAL JOURNAL

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

ДЕМ'ЯНЮК О.С., д-р с.-г. наук, проф., чл.-кор. НААН

Відповідальний секретар

ШУМИГАЙ І.В., канд. с.-г. наук, ст. досл.

БУДЗАНІВСЬКА І.Г.,

*д-р біол. наук,
проф. (Київ)*

ТЕРТИЧНА О.В.,

*д-р біол. наук,
проф. (Київ)*

ГОНЧАРЕНКО І.В.,

*д-р біол. наук,
проф. (Київ)*

ТКАЧ Є.Д.,

*д-р біол. наук,
ст. досл. (Київ)*

ДРЕБОТ О.І.,

*д-р екон. наук, проф.,
акад. НААН (Київ)*

ЧОБОТЬКО Г.М.,

*д-р біол. наук,
проф. (Київ)*

КЛЕПКО А.В.,

*д-р біол. наук,
проф. (Київ)*

ХОМ'ЯК І.В.,

*д-р біол. наук,
доцент (Житомир)*

ЛІСОВИЙ М.М.,

*д-р с.-г. наук,
проф. (Київ)*

ШЕВЧУК Л.М.,

*д-р біол. наук,
проф. (Житомир)*

МУДРАК О.В.,

*д-р с.-г. наук,
проф. (Вінниця)*

ШЕРСТОБОЄВА О.В.,

*д-р с.-г. наук,
проф. (Київ)*

ПАЛАПА Н.В.,

*д-р с.-г. наук,
проф. (Київ)*

ЮХНОВСЬКИЙ В.Ю.,

*д-р с.-г. наук,
проф. (Київ)*

ПАРФЕНЮК А.І.,

*д-р біол. наук,
проф. (Київ)*

ДУРСУН С.,

*д-р філософії,
проф. (Туреччина)*

СИМОЧКО Л.Ю.,

*канд. біол. наук,
доцент (Київ; Коїмбра, Португалія)*

КОЕЛЬО ПІНЕЙРО М.,

*д-р філософії,
проф. (Португалія)*

СКИБА В.В.,

*д-р с.-г. наук,
доцент (Біла Церква)*

СОБЧИК В.,

*д-р с.-г. наук,
проф. (Республіка Польща)*

ТАРАРІКО О.Г.,

*д-р с.-г. наук, проф.,
акад. НААН (Київ)*

- Дребот О.І., Палапа Н.В.**
Екологічна політика України в контексті розвитку культури та свідомості населення
- Стеценко А.Р., Орихівська О.М., Кононенко Н.О.**
Сучасний стан та потенціал розвитку органічного сектору України в умовах глобальних викликів
- Руденко С.В., Руденко В.П., Руденко С.С.**
Екосистеми України за цінністю водно-ресурсного потенціалу
- Конішчук В.В., Хом'як І.В., Шумигай І.В.**
Раритетна флора перелогів Центрального Полісся
- Калінський П.В., Гончаренко І.В.**
Фітоіндикаційна характеристика синтаксонів класу *Carpino-Fagetea sylvaticae* Лівобережного Лісостепу України
- Кузьменко І.С., Москаленко А.А., Заячківська Б.Б.**
Проектування бази геопросторових даних для інформаційного забезпечення систем органічного землеробства
- Стригіна О.А., Дирда В.О., Непочатенко В.А., Пенькова С.В., Комарова Н.В.**
Застосування фізико-математичних моделей у лісовому господарстві
- Мороз В.В., Житова О.П.**
Регіональні особливості динаміки лісових пожеж у північно-східній частині Житомирської обл.
- Кучма Т.Л., Швиденко І.К., Райчук Л.А., Ліщук А.М.**
Трансформація агроландшафтів півдня України після руйнування Каховської ГЕС за даними дистанційного зондування Землі
- Шерстюк Д.М., Ільєнко Т.В.**
Спеціалізовані індекси вмісту хлорофілу як інструмент моніторингу стану агроєкосистем за кліматичних змін
- 6 **Drebot O., Palapa N.**
Environmental policy in Ukraine in the context of the development of population's culture and awareness
- 22 **Stetsenko A., Orykivska O., Kononenko N.**
Current state and development potential of Ukraine's organic sector in the context of global challenges
- 33 **Rudenko S., Rudenko V., Rudenko S.**
Ecosystems of Ukraine with regard to value of water resource potential
- 40 **Konishchuk V., Khomiak I., Shumyhai I.**
Rare flora of the fallow lands of Central Polissia
- 51 **Kalinskyi P., Goncharenko I.**
Phytoindication characteristics of the syntaxa of the class *Carpino-Fagetea sylvaticae* in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine
- 59 **Kuzmenko I., Moskalenko A., Zaiachkivska B.**
Designing a geospatial database for information support of organic farming systems
- 70 **Strygina O., Dirda V., Nepchatenko V., Penkova S., Komarova N.**
Application of physical and mathematical models in forestry
- 77 **Moroz V., Zhytova O.**
Regional features of forest fire dynamics in the northeastern part of Zhytomyr region
- 87 **Kuchma T., Shvydenko I., Raichuk L., Lishchuk A.**
Transformation of agricultural landscapes in southern Ukraine after the destruction of the Kakhovka HPP according to remote sensing of the Earth
- 98 **Sherstyuk D., Iliencko T.**
Specialized chlorophyll content indices as a tool for monitoring the state of agroecosystems under climate change

Льєнко Т.О., Цимбал Я.С., Алексеєнко М.В., Коваль В.В., Брегєда С.Г. Гумусний стан ґрунтів Полтавської об- ласті	115	Iliencko T., Tsymbal Ya., Alekseienko M., Koval V., Breheda S. Humic state of soils in Poltava region
Рильський О.Ф., Петруша Ю.Ю., Пригула Н.М., Домбровський К.О., Безуглий М.Д. Особливості застосування технології доочистки стічних вод для зрошення сіль- ськогосподарських земель в умовах гло- бальних змін клімату	122	Rylskiy O., Petrusha Yu., Prytula N., Dombrovskiy K., Bezugly M. Peculiarities of the application of wastewater post-treatment technology for irrigation of agricultural lands under conditions of global climate change
Бунас А.А., Шерстобєєва О.В., Бондаренко К.І., Дворецький М.В. Інтегрований підхід до оцінки структури та функціональної активності мікробіому ґрунту	131	Bunas A., Sherstoboeva O., Bondarenko K., Dvoretzkiy M. Integrated approach to assessing the struc- ture and functional activity of soil micro- biomes
Кравченко Ю.В., Безноско І.В. Сукцесійна динаміка мікробних угруповань ґрунту за антропогенного впливу: підходи до математичного моделювання	140	Kravchenko Y., Beznosko I. Successional dynamics of soil microbial com- munities under anthropogenic impact: ap- proaches to mathematical modeling
Болоховська В.В., Нагорна О.В., Янє Л.А., Бородай В.В., Яковенко Д.О. Екологічні аспекти формування продук- тивності пшениці озимої за застосування мікробних препаратів	152	Bolokhovska V., Nahorna O., Jance L., Boroday V., Yakovenko D. Ecological aspects of the formation of winter wheat productivity under the use of micro- bial preparations
Сашко І.В., Приведенюк Н.В. Вплив біологічних препаратів на посівні якості насіння гісопу лікарського	163	Sashko I., Pryvedeniuk N. Effect of biological preparations on the sowing qualities of hyssop seeds
Кічигіна О.О., Цибро Ю.А., Михайлик С.М., Смульська І.В. Тенденції формування гібридного складу кукурудзи звичайної в Україні	171	Kichigina O., Tsybro Yu., Mykhailik S., Smulska I. Trends in formation of hybrid composition of common corn in Ukraine
Дутова Г.А., Ткачик С.О., Ляшенко С.О., Кирильчук А.М. Оцінювання впливу екологічних чинників на продуктивність і якість зерна нових сортів пшениці м'якої озимої	181	Dutova H., Tkachyk S., Liashenko S., Kyrylchuk A. Assessment of environmental factors influen- ce on productivity and quality of grain of new varieties of winter soft wheat
Давидюк Г.В., Шкарівська Л.І., Клименко І.І., Довбаш Н.І., Кушук М.А. Екологічні підходи до агротехнічних захо- дів за вирощування кукурудзи на зерно на ґрунті, забрудненому важкими металами	192	Davydiuk H., Shkarivska L., Klymenko I., Dovbash N., Kushchuk M. Ecological approaches to agrotechnical mea- sures for growing corn for grain on soil con- taminated with heavy metals
Реферати	200	Abstract
Відомості про авторів	211	Information about the authors
Правила для авторів	215	Rules for the authors

ЕКОЛОГІЧНА ПОЛІТИКА УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ КУЛЬТУРИ ТА СВІДОМОСТІ НАСЕЛЕННЯ

О.І. Дребот, Н.В. Палапа

*Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: drebotoksana@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2681-1074
e-mail: palapa60@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3748-6414*

У статті проаналізовано екологічну політику держави, екологічну культуру, а також свідомість громадян та виявлено їх зв'язок. Встановлено, що довкілля та екологічна політика, попри вимоги членства в ЄС та наявну масштабну шкоду, завдану війною, здебільшого залишаються поза пріоритетом для українського уряду; стратегічні цілі державної політики для профільного міністерства не є пріоритетними; охорона навколишнього середовища залишається найбільш недофінансованою галуззю українського бюджету; Україна має методи реалізації екологічної політики, але вони не дієві, або реалізуються не повною мірою та потребують адаптації до європейського законодавства і запозичення досвіду країн, з урахуванням українських особливостей, в яких ефективність реалізації екологічної політики вже доведена. Представлено принципи екологічної політики країн-членів ЄС, до яких слід адаптувати політичні, економічні та соціальні системи та ефективно реалізувати екологічну політику в контексті євроінтеграції. Наведено основні екологічні проблеми, які посилила війна (вплив на ліси, ґрунти, водні об'єкти, біорізноманіття), а також проблеми, які існують у державній екологічній політиці (державний моніторинг стану навколишнього середовища, державний екологічний контроль та юридична відповідальність за порушення екологічного законодавства). Крім того, наведено доступні міжнародно-правові механізми щодо захисту довкілля, які Україна може і повинна використати, щоб змусити Росію відшкодувати всі екологічні збитки, спричинені загарбницькою війною. Оскільки екологічна політика держави тісно пов'язана з екологічною культурою та екологічною свідомістю громадян України, у статті подано основні показники екологічної культури, що характерні для України, позитивні аспекти та екологічні виклики під час війни, представлено шляхи становлення екологічної свідомості та визначено елементи впливу екологічної культури на екологічну політику держави, якими є інтегрування вимог, підтримка сталого розвитку, запит на зміни, залучення громадськості та зниження екологічних ризиків.

Ключові слова: екологічне законодавство, міжнародне право, еколого-правова культура суспільства, екологічні проблеми, становлення свідомості, адаптація до європейського законодавства.

ВСТУП

Сучасні процеси екологізації світової економіки ґрунтуються на концепціях сталого розвитку, раціонального природокористування та «зеленої» економіки і вимагають результативної екологічної політики держав світового співтовариства, а бачення майбутніх державних змін згідно з принципами збалансованого розвитку закладаються у стратегічних законодавчо-нормативних документах.

Екологічна політика у суспільстві реалізується через формування та впровадження законодавства, створення систем екологічного контролю та управління, через соціально-еколого-економічні програми, які базуються на різних рівнях (міжнародному, державному, регіональному, місцевому) а також шляхом узгодження екологічних, соціальних та економічних процесів у рамках сталого розвитку. Важливу роль відіграють як державні органи, так і міжнародні організації, що сприяють захисту довкілля.

Основними завданнями в проведенні екологічної політики є досягнення безпечно-го стану довкілля, зменшення негативного впливу на нього, раціональне використання природних ресурсів та збереження біорізноманіття, що включає зниження екологічних ризиків, підвищення екологічної свідомості суспільства, удосконалення управління в галузі природокористування та моніторингу навколишнього середовища.

Для досягнення цілей і завдань екологічної політики необхідно дотримуватись реалізації цілей сталого розвитку, які полягають у забезпеченні захисту рівня життя, застосуванні різних форм компенсації від підвищення цін і проведення індексації; надання допомоги найбіднішим сім'ям, а також — у разі безробіття; здійснення політики соціального захисту і страхування, встановлення адекватної мінімальної заробітної плати для працюючих; розвитку освіти, охороні здоров'я та довкілля переважно за рахунок державного забезпечення, запровадження комплексної соціально-еколого-економічної політики, спрямованої на набуття громадянами знань та вмінь щодо природоохоронної діяльності на рівні територіальних громад та високої екологічної кваліфікації керівників на всіх рівнях.

У Стратегії Європейської економічної комісії ООН з освіти для сталого розвитку вказано, що ключовим елементом її реалізації мають бути національні плани дій з урахуванням фактичного стану справ країни та положень документів ООН відносно реалізації програм впровадження освіти для сталого розвитку. Відповідно до Концепції екологічної освіти України основним завданням мають бути формування екологічної культури засобами формальної та неформальної освіти в усіх верствах населення, і особливо — керівників різних рангів, менеджерів виробництв, бізнесменів.

Мета — з'ясувати стан екологічної політики у мирний довоєнний час та встановити її роль і функції під час війни, а також визначити особливості екологічної культури й свідомості та їхній зв'язок з політикою.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Оцінка екологічного стану, результати якої мають стати основою прийняття важливих управлінських рішень, має досить сумну статистику. Загалом екологічно безпечною в Україні вважається лише 6% її території [1]. У Законі України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року» відмічено, що *«антропогенне і техногенне навантаження на навколишнє природне середовище в Україні у кілька разів перевищує відповідні показники у розвинутих країнах світу»* [2]. Враховуючи наявні проблеми, пов'язані з війною, екологічна політика держави має бути спрямована на першочергове їх вирішення.

Державна екологічна політика — це діяльність державних органів, орієнтована на забезпечення конституційного права кожного на безпечне для життя і здоров'я довкілля та на відшкодування завданої порушенням цього права шкоди. Екологічну політику також можуть мати окремі підприємства чи організації [3].

Актуальність екологічної проблематики набуває особливого значення в умовах пошуку нових форм і засобів впливу держави на екологічну кризу та наближення глобальної катастрофи, що породжує демографічну небезпеку життєдіяльності людства. Водночас варто враховувати той факт, що в умовах розвитку людства у сучасному світі не існує національних екологічних проблем — наявні глобальні екологічні проблеми, зокрема: зміна клімату, втрата біологічного різноманіття, опустелювання, зростання екологічного збитку від стихійних лих і техногенних катастроф, забруднення атмосферного повітря, поверхневих та підземних вод, а також морських екосистем, що зачіпає національні інтереси. Одним із інструментів впливу держави на сферу природокористування та збереження стабільності природних ресурсів і життєдіяльності людини є екологічна політика, технологічна доцільність якої зумовлена ще й тим, що сучасний світ переживає екологічну ситуацію, яка доволі відрізняється

від того, з чим коли-небудь у своїй діяльності стикалось людство, адже небезпечні зміни навколишнього середовища набули глобального характеру [4].

Серйозним викликом для України, особливо в умовах війни Росії проти України, є екологічна політика. Навколишнє середовище і до цього було в критичному стані з серйозними наслідками як для здоров'я населення, так і для подальшої його деградації, особливо Східна Україна була високоіндустріалізованою частиною колишнього Радянського Союзу. І, як наслідок, незалежна Україна успадкувала цілу низку галузей важкої промисловості, що мали надзвичайно згубний вплив на якість повітря, питної води та ґрунтів на більшій території країни. Станом на 2022 р. за Індексом екологічної стабільності, опублікованим Всесвітнім економічним форумом, Україна посіла 137 місце із 142 країн світу, на початку 2020-х цей показник був на рівні 52-го місця, проте наразі ситуація погіршилася кратно [5].

Проблемами політики, планування, реалізації та механізмів її вдосконалення займалися й займаються як зарубіжні, так і вітчизняні вчені. Питанням реалізації державної екологічної політики та удосконалення системи державного управління екологічною безпекою присвячені наукові праці І. Самойлової [6], яка досліджувала потенціал системи державного управління в Україні та його застосування для забезпечення екологічної безпеки.

Особливості екологічної безпеки в контексті сталого розвитку та євроінтеграційних процесів із точки зору практики проаналізували Л. Демчук, Г. Кірейцева, І. Циганенко-Дзюбенко, В. Вовк. Розглянули стан екологічної безпеки в Україні та з'ясували, що запровадження міжнародних стандартів сприятиме розвитку систем екологічного менеджменту та реалізації в Україні міжнародних природоохоронних ініціатив [7].

Комплексне дослідження актуальних питань гарантування та реалізації екологічних прав у стратегіях державної екологічної політики й безпеки України під час

воєнного стану провели Р. Кірін і С. Грищак. Ними також обґрунтовано, що воєнні виклики зумовлюють формування відповідного правового інструментарію, який має допомогти вибудувати основу для прямих чи опосередкованих заходів із попередження, охорони захисту та відновлення порушених збройною агресією екологічних прав громадян, зокрема міжнародного механізму для реєстрації збитків [8].

Г. Трегубенко розглядає актуальні питання стратегічного планування у сфері реалізації державної екологічної політики, а також обґрунтовує необхідність узгодження екологічного законодавства з документами стратегічного планування, забезпечення кореляції чинних нормативно-правових актів із відповідними стратегічними напрямами та державними програмами, що дуже важливо в умовах повоєнного відновлення національної економіки та всіх складових національної безпеки країни на шляху до набуття членства України в ЄС [9].

Однак не слід забувати, що для створення ефективної екологічної політики має формуватись культура та свідомість населення. Екологічна культура визначає пріоритети сталого розвитку, підтримку суспільством жорсткіших екологічних норм та стимулює перехід до «зеленої» економіки, а високий рівень свідомості громадян спонукає державу до впровадження еко-системного підходу, зниження ризиків для довкілля та інтеграції екологічних вимог в усі галузі діяльності.

Проблеми екологічної культури та виховання досліджувалися багатьма відомими українськими вченими, зокрема такими, як М. Голубець, Н. Депенчук, В. Шинкарук, В. Крисаченко, М. Тарасенко, Л. Лукачова, О. Федоренко, В. Потапенко, Н. Єфіменко, С. Стойко, Ю. Злобін та багатьма іншими. На основі розроблених ними концептуальних положень сформовано певну систему понятійних уявлень про генезис, структуру й механізми функціонування екологічної свідомості та екологічної культури. Втім, недостатньо дослідженим залишається рівень реальної екологічної культури населення, розуміння ним важливості нового

мислення, своєї відповідальності за майбутнє навколишнього середовища [10].

Приблизно з 60-х років ХХ ст., коли перед людством гостро постала екологічна проблема внаслідок техногенного навантаження на навколишнє середовище, почала активно формуватися нова наука — екологія, і, як наслідок, виникло таке поняття як «екологічна культура» [11].

Як висловився М. Тарасенко «... *Культура — це не тільки показник універсальності і свободи людини, але і в рівній мірі показник її відповідальності перед світом... У тенденції закономірності така: чим більше людська діяльність стає універсальною і вільною щодо зовнішнього світу, тим більше зростає відповідальність людини перед природою як ойкуменою людської культури...*» [12]. А згідно з енциклопедії історії України «*Культура є тим проявом життя людей, який виражається в найрізноманітніших моделях їхньої поведінки та засобах і продуктах їхньої діяльності, у т. ч. в ідеях, ідеалах, нормах та цінностях*» [13]. У масовій свідомості така відповідальність не виникає сама собою, її необхідно виховувати.

Подолання екологічної кризи залежить не лише від нових форм господарсько-економічної діяльності людей, але, передусім, від морального удосконалення суспільства, правової культури його відносин із природою. Між екологічними проблемами та культурою існує органічний зв'язок: якість взаємодії людини з навколишнім середовищем завжди відображає рівень культури, носієм якої вона є. Відновленню втраченої рівноваги та гармонії у системі «людина — природа» у сучасному суспільстві сприятиме виховання екологічної культури.

Дуже влучно сказав про це філософ М. Реріх — «*життя може бути відтворене стверджувальним поняттям «культура»*» (Реріх М., 1997). Його вчення розглядає будь-яке земне явище із позиції взаємодії духу й матерії та енергетики цієї взаємодії. Філософом поставлена проблема культури як спосіб спасіння планети від майбутніх катаклізмів. Відновлення людства він убачав не у революційних трансформаціях, а в усвідомленні суспільством етичних

норм поведінки, у залученні його до істинних загальнолюдських цінностей. Отже, культура — це та сфера людського буття, в якій слід шукати відповіді на екологічні проблеми, оскільки вона базується на загальнолюдських цінностях.

Як говорив французький мислитель П. Гольбах, «*людина — це витвір природи, яка існує в природі, підкорюється її законам й не може визволитися від неї, навіть подумки не може вийти з неї*» (Гольбах П., 1963).

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У дослідженнях використано методичний інструментарій, що включає порівняльний аналіз, синтез, узагальнення та метод експертних оцінок.

На основі аналізу наукових джерел та нормативних українських і європейських документів щодо принципів екологічної політики країн-членів ЄС і їх адаптації до українського законодавства систематизовано сучасні погляди на культуру й свідомість громадян, як одну з глобальних проблем людства, та їх вплив на екологічну політику України.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На стратегічному рівні пріоритети екологічної політики визначені в Основних засадах (стратегії) державної політики України на період до 2030 р., які затверджені Законом України від 28 лютого 2019 р. № 2697-VIII [14]. Норми цієї стратегії визначають, що процеси глобалізації та суспільних трансформацій підвищили пріоритетність збереження довкілля, а отже, потребують від України вжиття термінових заходів. Окрім того, в документі зазначається, що протягом тривалого часу економічний розвиток держави супроводжувався незбалансованою експлуатацією природних ресурсів, незадовільним вирішенням питань захисту довкілля, що унеможливило досягнення збалансованого (сталого) розвитку. Серед першопричин екологічних проблем в Україні вказана

стратегія виділяє такі: підпорядкованість екологічних пріоритетів економічній доцільності; неврахування наслідків для довкілля у законодавчих та нормативно-правових актах; переважання ресурсо- та енергоємних галузей у структурі економіки з переважно негативним впливом на довкілля; фізичне та моральне зношення основних фондів у всіх галузях національної економіки; неефективна система державного управління у сфері охорони навколишнього природного середовища та регулювання використання природних ресурсів; незадовільний рівень дотримання природоохоронного законодавства та екологічних прав і обов'язків громадян; недостатній контроль за дотриманням природоохоронного законодавства та незабезпечення невідворотності відповідальності за його порушення; недостатнє фінансування з державного та місцевих бюджетів природоохоронних заходів тощо. В умовах воєнного стану зазначені екологічні проблеми не втрачають актуальності у зв'язку з їх не вирішеністю та поглибленням [15].

Інтеграція України до європейського співтовариства передбачає запровадження та реалізацію сучасних світових підходів до природного середовища, як частини життєвого простору людини. Одним із напрямів такої діяльності є розробка і здійснення цілеспрямованої екологічної політики, яка відповідала б світовим нормам імплементації державних комплексних цільових програм, зокрема наразі актуальності не втрачають процеси формування регіональних цільових екологічних програм згідно з природоохоронними пріоритетами та їх реалізації на місцевому рівні [16]. Втім, за реалізації програм на місцевому рівні виникають проблеми щодо їх виконання у повному обсязі.

Довкілля та екологічна політика, згідно з положеннями Аналітичного документу, що розроблений у рамках ініціативи «Оцінка впровадження екологічної політики в Україні», попри вимоги членства в ЄС та наочну масштабну шкоду, завдану довкіллю внаслідок агресії Росії (яка наразі не має адекватної оцінки), переважно залиша-

ються поза пріоритетом для українського уряду. Стратегічні цілі державної політики не є пріоритетними для профільного міністерства. Міжнародна технічна підтримка низки проєктів за такого управління стає малоефективною, а охорона довкілля залишається найбільш недофінансованою галуззю українського бюджету [17].

На принципах міжнародного права базується система екологічного законодавства, проте вона не передбачає прямих правових наслідків. Екологічне регулювання в Україні регламентується низкою нормативно-правових актів, проте в їх системі не вистачає працюючого механізму правового регулювання та єдиного узгодженого інституційного середовища реалізації державної екологічної політики і це одна з багатьох проблем, що призводить до різних тлумачень базового законодавства та нечіткого розподілу повноважень між національним, регіональним та галузевим рівнями [18].

В Україні існує підґрунтя й розвинені механізми реалізації екологічної політики, але вони не дієві, або втілюються не повною мірою та потребують адаптації до європейського законодавства і запозичення досвіду країн, з урахуванням особливостей властивих нашій країні, в яких ефективність реалізації екологічної політики вже доведена [19]. До того ж важливим у сучасних умовах є проведення постійного моніторингу та оцінки результатів реалізації державної екологічної політики з додержанням стратегічно визначених вимог щодо надання відповідних звітів, із метою отримання релевантної інформації.

Основні засади (стратегія) державної екологічної політики України на період до 2030 р., які передбачають досягнення сімнадцяти стратегічних цілей та ключових показників у трьох векторах — *розвитку* (зростання питомої частки продукції та послуг із високою часткою доданої вартості в експорті); *безпеки* (обмеження викидів парникових газів в усіх секторах економічної діяльності); *відповідальності* (підвищення рівня зайнятості населення). Крім того, у ракурсі даної статті найбільш характерні 5 цілей, які наведені у *табл. 1*.

Таблиця 1. Стратегічні цілі державної екологічної політики

Цілі	Складові цілей
Ціль № 1	<ul style="list-style-type: none"> • Екологічна свідомість • Екологічні цінності • Екологічна освіта
Ціль № 2	<ul style="list-style-type: none"> • Сталий розвиток • Збалансоване використання природних ресурсів
Ціль № 3	<ul style="list-style-type: none"> • Екологічні вимоги в усі сфери
Ціль № 4	<ul style="list-style-type: none"> • Зниження екологічних ризиків та безпечне довкілля
Ціль № 5	<ul style="list-style-type: none"> • Належне екологічне врядування

Військові дії внесли корективи в реалізацію даної Стратегії, зокрема пріоритетними в умовах війни стали збереження наявного економічного потенціалу, людського капіталу та забезпечення продовольчої безпеки країни.

Для досягнення стратегічних цілей необхідно визначитися з інструментами реалізації екологічної політики, що представлені на *рис. 1*.

У нашій державі відсутня комплексна політика у певних ключових секторах економіки, наприклад, поводження з радіоактивними відходами. Україна не має комплексної політики поводження з радіоактивними відходами, незважаючи на те, що вона є країною, що значною мірою залежить від виробництва ядерної енергії

та має проблеми з Чорнобильською АЕС і зоною відчуження. Це викликає занепокоєння, оскільки лише незначна частка українських радіоактивних відходів переробляється.

Сучасна система управління навколишнім середовищем є централізованою та недостатньо демократичною. Через те, що держава має привілей на екологічну відповідальність, це спричиняє послаблення відповідальності виробників із боку промисловості, сільського господарства та індивідуальних споживачів. Передбачається, що плата за забруднення стягуватиметься з промислових суб'єктів господарювання, що завдають шкоди навколишньому середовищу. Вони мають отримати чітко визначені норми в обсягах накопичення відходів,



Рис. 1. Інструменти здійснення екологічної політики в Україні

рівні забруднення повітря та стічних вод, користування енерго- та водними ресурсами для захисту навколишнього середовища, проте в сучасній національній системі принцип «забруднювач платить» не діє. І тому для підприємств-забруднювачів відсутня мотивація вживати заходів для зменшення впливу на довкілля.

Враховуючи європейський курс розвитку України, варто дослідити досвід реалізації екологічної політики в країнах ЄС,

оскільки національне законодавство потребує приведення його у відповідність до європейських норм.

Принципи, що є основою екологічної політики країн-членів ЄС представлені в *табл. 2*.

Національним інститутам доцільно адаптувати дані принципи до умов українських політичної, економічної та соціальної систем, і ефективно реалізувати екологічну політику в контексті євроінтеграції.

Таблиця 2. Принципи екологічної політики країн-членів Європейського Союзу

Принципи	Положення	Нормативні документи
Інтеграції екологічної політики	Охорона навколишнього природного середовища має бути інтегрованою в усі інші галузеві політики, що сприятиме сталому розвитку. Усі державні відомства враховують екологічний стан навколишнього середовища та мають обов'язок його захищати	<ul style="list-style-type: none"> • Директива Ради 92/43/ЄЕС від 21 травня 1992 р. про охорону природних середовищ існування та дикої флори і фауни; • Директива Ради 2008/56/ЄС, що встановлює рамки діяльності Співтовариства у сфері політики з морського середовища
Сталого розвитку	Передбачає необхідність врахування потреб нинішнього та майбутніх поколінь, встановлення обмежень на використання природних ресурсів, справедливий розподіл прав та обов'язків між нинішнім і майбутніми поколіннями, комплексний підхід до питань навколишнього середовища та соціально-економічного розвитку	<ul style="list-style-type: none"> • Сендайська рамкова програма зі зменшення ризику стихійних лих на 2015–2030 рр. (прийнята у березні 2015 р.); • Резолюція Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 р. (прийнята у вересні 2015 р.); • Паризька угода про зміну клімату (прийнята у грудні 2015 р.)
Залучення громадян	Передбачає залучення громадян до процесу прийняття рішень, ефективних консультацій, посилення соціальних діалогів, корпоративної соціальної відповідальності, забезпечення приватно-державного партнерства для сприяння сталому розвитку	<ul style="list-style-type: none"> • Орхуська конвенція 1998 р.
«Забруднювач платить»	Передбачає, що забруднювач навколишнього середовища має нести витрати на його відновлення, щоб стан навколишнього природного середовища не загрожував здоров'ю громадян і не погіршувався	<ul style="list-style-type: none"> • Ст. 191 (2) Договору про функціонування ЄС; • Директива про екологічну відповідальність за попередження та ліквідацію наслідків завданої навколишньому середовищу шкоди 2004 р.
Використання найкращих наявних знань	Полягає в тому, щоб забезпечити оцінку, розробку та реалізацію політики на основі найкращих наявних знань, які є економічно ефективними та екологічно обґрунтованими	<ul style="list-style-type: none"> • Директива 2010/75/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 24 листопада 2010 р. «Про промислові викиди»

Принципи	Положення	Нормативні документи
Обережності	Базується на тому, що певні галузі виробництва, наприклад, харчова, хімічна та медична продукція, біоциди та пестициди, потребують попереднього схвалення перед випуском їх на ринок	<ul style="list-style-type: none"> • Лондонська декларація 1987 р. • Маастрихтський договір 1992 р. • Повідомлення ЄК про принцип обережності 2000 р.
Превентивних дій	Передбачає дії спрямовані або на захист навколишнього середовища на ранній стадії заподіяння шкоди, або унеможливлення завдання цієї шкоди. Краще не заподіяти шкоду середовищу, ніж потім його відновлювати	<ul style="list-style-type: none"> • Стокгольмська декларація 1972 р. • Віденська конвенція про охорону озонового шару 1985 р.

Примітка: підготовлено авторами згідно [20–24].

Ціннісне ставлення до природи відображається у Конституції України, а тому серед найбільш важливих правових засад екологічної культури можна вважати конституційні положення про людину, її життя і здоров'я, честь і гідність, недоторканність і безпеку як найвищу соціальну цінність (ст. 3); обов'язок держави із забезпечення екологічної безпеки та підтримання екологічної рівноваги, подолання наслідків Чорнобильської аварії – катастрофи планетарного масштабу (ст. 16); забезпечення прав кожного на безпечне для життя і здоров'я довкілля, відшкодування заподіяної порушенням цього права шкоди та вільний доступ до інформації про якість харчових продуктів і предметів побуту (ст. 50); кожен зобов'язаний не заподіювати шкоду природі, культурній спадщині, відшкодувати завдані збитки (ст. 66).

Водночас, чинне екологічне законодавство недостатньою мірою приділяє увагу проблемі розвитку еколого-правової культури суспільства. Наприклад, Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» вказує на необхідність формування у населення екологічного світогляду, навіть не згадуючи про екологічну культуру та екологічну свідомість, що потребує подальшого правового удосконалення у цьому напрямі.

У контексті екологічної політики нашої держави слід розглядати й екологічну куль-

туру та екологічну свідомість суспільства, адже саме екологічна культура формує свідоме ставлення до природи, поєднуючи освіту, виховання та професійне мислення для збереження довкілля.

У структурі сучасної культури як такої виокремлюють екологічну культуру. З одного боку, культура загалом має екологічний характер, з іншого – екологічна культура визначається як певна програма, на базі якої суб'єкт природокористування буде власний процес взаємодії з природою.

Основною причиною виникнення екологічних проблем тривалий час вважались недосконалі промислові технології, проте деякі науковці доводять, що шлях до розв'язання більшості проблем – поширення екологічної культури в суспільстві (Крисаченко В., 1996; Хилько М., 2017). Важливими елементами водночас варто визнати не лише підвищення екологічної грамотності, формування бережливого використання природних ресурсів серед населення, а й активна громадянська позиція щодо збереження навколишнього природного середовища.

Термін «екологічна культура» з'явився у 20-х роках ХХ ст. та розширений пізніше у роботах представників американської школи «культурної екології» (J. Steward, 1928; L. White, 1929; M. Harris, 1989; R. Rappaport 1977). Сьогодні науковці про-

понують під екологічною культурою розуміти цілеспрямовану діяльність людини, що включає сукупність наслідків такої діяльності. Людина, яка оволоділа екологічною культурою, спрямовує сили своєї діяльності на раціональне природокористування, піклується про довкілля, не дозволяє його забруднення чи руйнування.

Ключовим моментом для розвитку екологічної культури стала Конференція ООН з навколишнього середовища і розвитку 1992 р. в Ріо-де-Жанейро («Саміт Землі») [25], яка наголосила на пріоритетності екологічної освіти, проголосила концепцію сталого розвитку та ухвалила «Декларацію Ріо», що містила 27 основоположних принципів взаємодії людства з довкіллям, які стали фундаментом міжнародного екологічного права, зокрема: право на здорове життя в гармонії з природою, відповідальність за майбутні покоління та навколишнє середовище, принцип «забруднювач заплатить». Це змінило підхід до стосунків людини і природи, підкресливши необхідність гармонізації культури з екологічними реаліями для виживання людства. Ця Конференція запустила три глобальні конвенції: про біорізноманіття (збереження та стале використання біорізноманіття), про зміну клімату (стабілізація концентрації парникових газів), про

боротьбу з опустелюванням (запобігання опустелюванню земель). Окрім цього, було зроблено наголос на екологічній освіті й підкреслено важливість екологічної освіти як інструменту для формування свідомості та поведінки, що відповідає екологічній кризі. Відбувся перехід від протиставлення «культури» та «природи» до розуміння їх взаємозв'язку та необхідності адаптації культури до природного середовища для виживання цивілізації.

У структурі культури виділяються три підсистеми [26]:

- *природно-екологічна* (відображає адаптацію суспільства до біофізичного оточення);
- *суспільно-екологічна* (відображає впорядкованість відносин між окремими елементами суспільства);
- *соціально-регулятивна* (спрямована на підтримання самої соціальної системи як єдиного цілого, що пояснює місце екологічної культури в структурі сучасної культури).

Нами визначені основні показники екологічної культури в Україні, якими є рівень забруднення довкілля, проблеми поводження з відходами, недостатній рівень екологічної свідомості населення та недосконалість законодавства у сфері охорони природи (рис. 2).

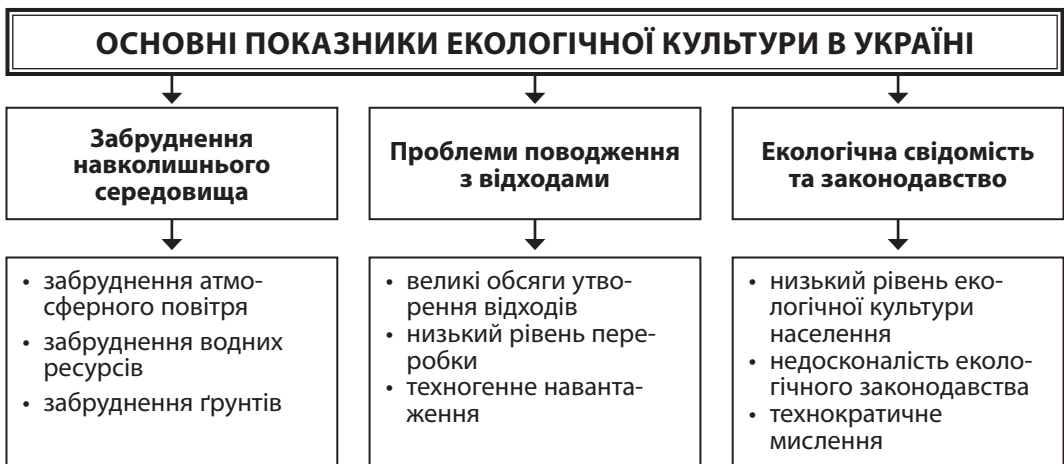


Рис. 2. Основні показники екологічної культури, характерні для України

Особливого значення набуває екологічна культура під час війни та у повоєнний час. Вона трансформується, з огляду на необхідність захисту довкілля та реагування на екологічні загрози, спричинені війною, а саме: запроваджуються державні та громадські ініціативи для документування екологічних злочинів, спричинених війною; зростає поширення повторного використання речей; незважаючи на війну, продовжується просвітницька робота щодо екологічної безпеки та відповідального ставлення до довкілля. Варто наголосити на тому, що війна лише посилила вже існуючі екологічні проблеми, такі як забруднення ґрунтів, водних ресурсів, повітря та накопичення відходів, особливо токсичних унаслідок розривів ворожих мін, ракет та іншої зброї (рис. 3).

Викиди від військової техніки та пожеж забруднюють атмосферу, спричиняючи парниковий ефект; руйнування об'єктів промисловості та інфраструктури зумовлюють забруднення водою хімічними речовинами; мінування, використання боеприпасів та руйнування можуть призводити до довготривалого забруднення земель; накопичуються великі обсяги побутового й будівельного сміття, з яким не можуть

впоратися зруйновані або перевантажені полігони; утилізація боеприпасів та уламків техніки стає складною проблемою; бойові дії руйнують природні середовища існування тварин і рослин тощо.

Після розмінування розпочнуться роботи з відновлення родючості ґрунтів, лісів, які ворог цілеспрямовано знищував, вирубував та вивозив на свою територію з окупованих українських територій, ліквідації наслідків руйнувань, що включатиме аналіз стану ґрунтів, водних об'єктів із використанням новітніх методів та технологій.

Екологічна культура безпосередньо впливає на формування свідомості суспільства. В ХХ ст. досить гостро стала проблема формування екологічної свідомості, відколи людство стало усвідомлювати згубні наслідки своєї діяльності, що призвели до екологічної кризи у світі, які ми спостерігаємо в різноманітних сферах життєдіяльності: забруднення навколишнього середовища, зникнення багатьох видів тварин та рослин, нераціональне використання природних ресурсів і т. ін.

Екологічна свідомість — це знання про взаємозв'язки людини і середовища, усвідомлення їх значущості з метою збереження стійкості балансу між ними; екологічна



Рис. 3. Основні складові екологічної культури під час війни

свідомість — це процес, що забезпечує розуміння та оцінку людиною своїх можливостей щодо використання цих зв'язків для задоволення власних потреб і визначення меж допустимого антропогенного впливу суб'єкта на навколишнє середовище [27].

Насправді єдиного визначення цього поняття немає і кожен може трактувати це по-різному. Зрозумілими простими словами можна стверджувати, що екологічна свідомість — це усвідомлення місця і ролі в природі людини. Остання не може жити, відмежувавшись від природи, а має розуміти, що є її частиною та має вплив на неї. Втім вплив людини на природу має бути такий, щоб мінімізувати шкоду та сприяти її збереженню. В світі розвитку технологій екологічну свідомість слід розглядати як усвідомлення наслідків технологічного прогресу та неконтрольованого споживання, яке почалось у ХХ ст. Вона включає екологічні знання, ставлення до природи та готовність до відповідальної поведінки і дії.

Наведемо основні елементи екологічної свідомості, зокрема:

- *знання* (розуміння екологічних проблем, впливу людини на довкілля, принципів роботи екосистем, шляхів збереження ресурсів);
- *ставлення* (формування переконань та цінностей щодо природи, особистого ставлення до навколишнього середовища);

- *поведінка* (готовність вчиняти дії, які допомагають зберегти природу, наприклад, сортування сміття, економне використання водних ресурсів, енергозбереження і т. ін. та утримуватися від дій, що їй можуть шкодити);
- *осмислення* (здатність аналізувати свій вплив на довкілля та самостійно регулювати свою поведінку для досягнення гармонії з природою) [28].

Розрізняють три типи екологічної свідомості:

- *антропоцентричний* (на перше місце ставиться людина та її потреби);
- *природоцентричний* (перевага надається природі та її збереженню, а людина знаходиться нижче в ієрархії);
- *екоцентричний* (прагнення до збалансованого та гармонійного співіснування людини і природи, враховуючи потреби обох) [29].

Опрацьовані нами наукові джерела дають змогу встановити напрями формування екологічної свідомості (рис. 4).

Не зайвим буде розглянути вплив екологічної культури на екологічну політику держави, адже вони тісно між собою пов'язані (табл. 3).

Провідне місце сьогодні посідає екологічна сфера, особливо в розрізі екологічної безпеки держави, яка, своєю чергою, є складовою національної безпеки. Згідно зі Стратегією національної безпеки України до ключових пріоритетів держави нале-



Рис. 4. Шляхи становлення екологічної свідомості громадян

Таблиця 3. Вплив екологічної культури на екологічну політику держави

Елементи впливу	Яким чином впливає
Інтегрування вимог	Екологічна культура забезпечує впровадження екологічних вимог у всі галузі економічної діяльності, перетворюючи екологію з окремої теми на частину державної стратегії
Підтримка сталого розвитку	Культура екологічної відповідальності сприяє переходу від технократичного мислення до екосистемного підходу, що є основою сучасної екологічної політики
Запит на зміни	Високий рівень екологічної культури (сортування сміття, свідоме споживання, екологічна активність) змушує органи влади ухвалювати суворіші екологічні закони та стандарти, оскільки суспільство вимагає захисту природи
Залучення громадськості	Екологічно освічене суспільство активно бере участь у прийнятті рішень, моніторингу екологічних ризиків та реалізації місцевих екологічних ініціатив
Зниження екологічних ризиків	Екологічна культура підвищує рівень здоров'я населення через зменшення забруднення повітря, водних ресурсів та вирішення проблем відходів, що є ключовими цілями екологічної політики. І, навпаки, низька екологічна культура стримує розвиток ефективної екологічної політики, що призводить до ігнорування природоохоронних норм та погіршення стану довкілля

жать забезпечення екологічно та техногенно безпечних умов життєдіяльності громадян і суспільства, збереження довкілля та раціональне використання природних ресурсів.

Через систему місцевого екологічного управління здійснюється політика охорони навколишнього природного середовища. На цьому рівні найщільніше межують екологічні інтереси населення та культурні й екологічні традиції. Місцевим органам влади, як управлінському механізму взаємодії суспільства і природи, саме через це необхідно надавати особливого значення і тому на локальному рівні варто починати формувати та надалі розвивати екологічну культуру, тобто культуру заощадливих екологічних потреб людини.

Війна Росії проти України на порядки збільшила екологічні проблеми, які існували й до цього, а саме:

- підлив дамби Каховської ГЕС та вплив на водні ресурси (отруєні води зруйнованих цвинтарів, скотомогильників, хімікатами від ракет, сільського господарства, паливно-мастильними матеріа-

лами з пошкоджених заправок, кораблів та іншої техніки, нерозірваними мінами потрапляють у Чорне море і поширюють свою смертоносну дію по всьому світу);

- вплив на ліси (потужні бомбардування та ракетні удари спричинили величезні лісові пожежі, якими за даними Рахункової палати України, станом на кінець 2022 р., знищено 3 млн га лісів, що сягає майже третину всіх українських лісів (до початку вторгнення офіційна площа лісів сягала 10,4 млн га). Спеціалісти-екологи вважають, що для відновлення пошкоджених лісів, загалом потрібно щонайменше 20 років. І це не лише тисячі гектарів спаленого лісу, а й знищення цілих екосистем, загибель флори та фауни, включно з червонокнижними видами, що безперечно означає величезний негативний вплив на глобальний клімат [30];
- глобальний вплив на навколишнє середовище та перспективи зеленого відновлення (навколишнє середовище не знає кордонів, а рух повітря, води, міграція видів живих організмів поширюють

вплив війни по всьому світу і тому дуже важливо подолати екологічні наслідки війни та справді зелене відновлення);

- вплив на ґрунт (~30% території або 176 тис. км² України забруднено вибухонебезпечними предметами та потребують розмінування. Відновлення та розмінування займе десятиліття, а деякі території настільки сильно зруйновані, що їх відновлення не можливе);
- вплив на біорізноманіття (враховуючи те, що в Україні зосереджено 35% біорізноманіття Європи, а сотні заповідних територій окуповані або були окуповані, включаючи 23 національні парки, природні і біосферні заповідники, наслідки завданої шкоди та токсичне забруднення внаслідок бойових дій, втрата біорізноманіття, спричинена війною, є безпрецедентною). Вчені стверджують, щонайменше два і максимум шість видів вимерли назавжди через війну [17; 31]. Остання зруйнувала шляхи міграції для багатьох видів птахів, бойові дії можуть спричинити глобальне скорочення їх чисельності на рівні Європи і навіть світу. Все це стосується також і видів, які знаходяться під загрозою зникнення;
- зелена відбудова (необхідний посилений потенціал екологічного управління. Україна мала величезні екологічні проблеми й до війни, але нечувані збитки довікллю, завдані війною, роблять екологічну сферу питанням виживання не лише для України, а й для всього світу. Щоб впоратися з проблемою такого катастрофічного масштабу інституційна спроможність відповідних органів влади та система екологічного врядування надто слабкі. Незавершені галузеві та ключові інституційні екологічні реформи роблять перспективи зеленого відновлення фікцією).

І це ще далеко не всі екологічні проблеми, спричинені військовою Росією проти України, адже війна триває, ворог продовжує мінувати наші території, знищувати ліси, ґрунти, біорізноманіття, забруднювати токсичними речовинами природні екосистеми.

У ракурсі теперішніх екологічних проблем необхідно навести проблеми, що існують у державній екологічній політиці. Насамперед, один із основних викликів — це державний моніторинг стану навколишнього середовища. Незважаючи на прийняття відповідного закону [32], в якому визначено основні засади щодо порядку здійснення державного моніторингу стану навколишнього середовища, система досі не працює належним чином через:

1) відсутність комплексного підходу до створення системи моніторингу навколишнього середовища в Україні;

2) брак підзаконних нормативно-правових актів, що детально визначали б умови та порядок проведення державного моніторингу стану навколишнього середовища в тій чи іншій сфері;

3) відсутність окремої інституції, яка б організовувала, узгоджувала та координувала роботу різних органів державної влади, що відповідальні за здійснення державного моніторингу стану навколишнього середовища;

4) відсутність системи дієвих заходів впливу (штрафів, покарань, обмежень) за недотримання чи порушення приписів законодавства стосовно моніторингу стану навколишнього середовища;

5) нестача відповідного технічного устаткування для системного моніторингу стану навколишнього середовища;

6) відкладення впровадження для нових джерел викидів на п'ять років із дати скасування воєнного стану, і взагалі не поширення на діючі об'єкти порядку запровадження обов'язкових автоматизованих систем контролю викидів забруднюючих речовин [33].

На другому місці за важливістю — державний екологічний контроль, фактичною метою якого з боку уповноважених органів Державної екологічної інспекції до цього часу здійснюється контроль за діяльністю суб'єкта господарювання, а не контроль за дотриманням екологічних норм та запобігання завданню шкоди навколишньому середовищу, причини якого полягають у такому:

1) органи державного екологічного контролю свою діяльність досі здійснюють не в попереджувальній, а у «каральній» парадигмі, за відсутності діалогу між органами контролю, суб'єктами господарювання та громадськістю;

2) відсутність налагодженого механізму здійснення контрольних заходів оперативно, без погодження з будь-якими органами, зловживання «мораторієм на заходи контролю»;

3) відсутність дієвих заходів впливу за недопущення уповноважених контролюючих осіб до здійснення заходів контролю та засобів у контролюючих осіб для протидії таким зловживанням з боку суб'єктів господарювання, що викликано високим рівнем корупції у контролюючих органах, низьким рівнем підготовки та мотивації кадрів, що здійснюють контроль, низьким рівнем забезпеченості органів контролю технічними та лабораторними можливостями.

І на третьому місці — юридична відповідальність за порушення екологічного законодавства, інститут якої не зазнав істотних змін з радянських часів. У сучасних умовах ринкової економіки та досягнення своєї мети — збереження чи відновлення довкілля, окремих його складових вона не забезпечує дотримання вимог екологічного законодавства, що зумовлено такими проблемами:

1) відсутність достатнього рівня екологічної культури;

2) дуже низький розмір штрафів за порушення екологічного законодавства;

3) складна економічна ситуація, прибутковість нелегальної діяльності з використання та збуту природних ресурсів;

4) у політичних колах ставлення щодо необхідності посилення юридичної відповідальності за порушення екологічного законодавства є непопулярним.

Наведені проблемні питання полягають у відсутності сучасної проєвропейської ефективної екологічної політики.

Для того, щоб Україна змогла відшкодувати екологічні збитки, їй необхідно задіяти всі доступні міжнародно-правові

механізми захисту навколишнього середовища, зокрема:

- Злочин проти навколишнього середовища на міжнародному рівні. Екоцид.
- Компенсаційні механізми (Міжнародний суд ООН, Окрема компенсаційна комісія, Спеціальний трибунал, реєстр збитків).
- Використання міжнародних екологічних угод (Конвенція про допомогу в разі ядерної аварії або радіаційної аварійної ситуації, 1986; Конвенція про ядерну безпеку, 1994; Конвенція ООН з морського права, 1982; Конвенція про захист Чорного моря від забруднення, 1992; Угода про збереження афро-євразійських мігруючих водно-болотних птахів, 1995; Угода про збереження китоподібних Чорного моря, Середземного моря та прилеглої акваторії Атлантичного океану, 1996; Протокол про воду і здоров'я до Конвенції про охорону і використання транскордонних водотоків і міжнародних озер, 1992; Конвенція про заборону військового або будь-якого іншого ворожого використання засобів впливу на природне середовище, 1976).

Не зважаючи на те, що Росія не є стороною договору багатьох міжнародних документів, Україна, як держава, має залучити всі міжнародні інституції для вироблення додаткових інструментів, щоб змусити агресорів відповісти за всі свої злочини, а повоєнна екологічна політика має бути спрямована на подолання глобальних наслідків воєнних дій, «зелене» відновлення України та впровадження сталих технологій, що передбачатиме науково обґрунтовану оцінку збитків, зниження екологічних ризиків, розвиток заповідного фонду, модернізацію промисловості, відбудову за принципами Європейського зеленого курсу.

ВИСНОВКИ

З'ясовано, що сучасна система управління навколишнім середовищем є централізованою та недостатньо демократичною; екологічні пріоритети підпорядковані економічній діяльності; у законодавчих та нормативно-правових актах не враховують-

ся наслідки для навколишнього середовища; система регулювання використання природних ресурсів та державного управління у сфері охорони довкілля є неефективною; незадовільний контроль за дотриманням природоохоронного законодавства; недостатнє фінансування з державного та місцевих бюджетів природоохоронних заходів та ін.

Встановлено, що екологічна освіта, екологічна культура, екологічна свідомість,

екологічні проблеми, екологічна політика доволі тісно взаємопов'язані між собою, залежать одне від одного, а в підсумку впливають на екологічний, соціальний та економічний стан країни, на умови проживання населення, на демографічний стан, а під час війни перетворюються на частину національної безпеки та стають невід'ємною складовою суспільного життя українців.

ЛІТЕРАТУРА

1. Екологічна складова національної безпеки: основні показники і шляхи їх досягнення. URL: https://www.niss.gov.ua/sites/default/files/2014-01/ekolog_nb-11461.pdf.
2. Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України. Закон України № 2818-VI. (2010). (Україна). URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2818-17>.
3. Державна екологічна політика. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/natsionalna-ekologichna-polityka/>.
4. Гаєвський, І. В. (2019). Екологічна політика держави: сутність, основні концепції та підходи. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Сер.: Державне управління*, 30(69), 4. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-6468/2019.4/08>.
5. Zharova, L., & Chechel, A. (2020). Historical Aspects of Sustainable Development and Economic Evolution Interconnection. *Інформаційно-аналітичний журнал «Схід»*. *Historical sciences*, 2(166). URL: <http://skhid.kubg.edu.ua/article/view/201399>.
6. Самойлова, І. І. (2018). Напрями вдосконалення системи державного управління екологічною безпекою в Україні. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2156-2018.11.23>. URL: http://www.dy.nauka.com.ua/pdf/11_2018/25.pdf.
7. Демчук, Л., Кірейцева, Г., Циганенко-Дзюбенко, І., & Вовк, В. (2023). Концепція екологічної безпеки держави в контексті сталого розвитку та євроінтеграції. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 3–11. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-1>.
8. Кірін, Р. С., & Гришак, С. В. (2023). Забезпечення і реалізація екологічних прав у стратегіях державної політики та безпеки: виклики воєнного періоду. *Juris Europensis Scientia*, 1, 65–71. DOI: <https://doi.org/10.32782/chern.v1.2023.12>.
9. Трегубенко, Г. П. (2023). Державна екологічна політика в сучасних умовах: стан та напрями удосконалення. *Право та інновації*, 4, 108–114. DOI: [https://doi.org/10.37772/2518-1718-2023-4\(44\)-16](https://doi.org/10.37772/2518-1718-2023-4(44)-16).
10. Папп, Д. Д. (2019). Сучасний стан екологічної свідомості та екологічної культури населення Закарпаття та напрямки їх формування. *Сталий розвиток економіки*, 1, 164–171.
11. Курняк, Л. М. (2015). *Екологічна культура: поняття та формування*. URL: Nd_2015_4_8.pdf.
12. Тарасенко, М. Ф. (1985). *Природа, технологія, культура*. Київ: Наукова думка.
13. *Енциклопедія історії України* (2021). *Додатковий том: А–Я* (Кн. 1).
14. Основні засади (стратегія) державної екологічної політики України на період до 2030 року. Закон України № 2697-VIII. (2019). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>.
15. Трегубенко, Г. П. (2023). Державна екологічна політика в сучасних умовах: стан та напрями удосконалення. *Право та інновації*, 4(44), 108–114. DOI: [https://doi.org/10.37772/2518-1718-2023-4\(44\)-16](https://doi.org/10.37772/2518-1718-2023-4(44)-16).
16. Скакальський, О. М. (2015). Державні цільові екологічні програми: сутність та шляхи формування на регіональному рівні. *Регіональне та муніципальне управління*, 7–8(21–22), 85–93.
17. Оцінка впровадження екологічної політики в Україні: п'ять системних проблем. URL: <https://necu.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/assessment-of-ua-environmental-policy-implementation.pdf>.
18. Резніков, В. В. (2020). Особливості формування та реалізації державної політики у сфері європейської інтеграції в різних країнах. *Науковий вісник: Державне управління*, 1(3), 153–162.
19. Андрієнко, М. В. (2017). Механізми реалізації державної екологічної політики на регіональному рівні. *Інвестиції: практика та досвід*, 18, 47–53.
20. Paris Agreement. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/frameworks/parisagreement>.
21. Declaration on Guiding Principles for Sustainable Development (2005). Council of the European Union, Presidency Conclusion, Doc. 10255/05, Brussels, European Council.
22. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/frameworks/sendaidframework>.
23. Preventive principle. URL: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/prevention-principle>.
24. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
25. Декларація Ріо-де-Жанейро щодо навколишнього середовища та розвитку. URL: https://iPLEX.com.ua/doc.php?code=995_455&from=360.

26. Ладиченко, В. В. (2019). *Екологічна політика і право ЄС*. Київ: НУБіП України.
27. Екологічна культура — необхідний фактор безпечної перспективи розвитку суспільства. URL: <https://social-science.uu.edu.ua/article/366>.
28. Набочук, О. Ю. (2015). Розвиток екологічної свідомості особистості: актуальність проблеми. URL: <https://journals.uran.ua/index.php/2227-6246/article/download/159769/159011/0>.
29. Шедловська, М. В. (2011). Означення та типи екологічної свідомості. URL: https://ukr-socium.org.ua/wp-content/uploads/2011/04/95-100_no-2_vol-37_2011_UKR.pdf.
30. Скільки лісів постраждало від війни і як швидко їх можна відновити. URL: <https://texty.org.ua/fragments/109583/skilky-lisiv-postrazhdalo-vid-vijny-i-yak-shvydko-yih-mozhna-vidnovyty/>.
31. 35% біорізноманіття Європи перебуває під загрозою знищення через дії Росії. URL: <https://ecology.od.gov.ua/2023/04/35-bioriznomanittya-uevropy-perebuyaye-pid-zagrozoju-znyshhennya-cherez-diyi-rosiyi/>.
32. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля. Закон України № 63. (2023). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text>.
33. Про затвердження порядку запровадження обов'язкових автоматизованих систем контролю викидів забруднюючих речовин. Постанова Кабінету Міністрів України № 272 (2023). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/272-2023-%D0%BF#Text>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 26.01.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.02.2026
 Дата публікації: 27.02.2026

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПОТЕНЦІАЛ РОЗВИТКУ ОРГАНІЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ВИКЛИКІВ

А.Р. Стеценко, О.М. Орихівська, Н.О. Кононенко

*Відокремлений структурний підрозділ «Аграрно-економічний фаховий коледж Полтавського державного аграрного університету» (м. Полтава, Україна)
e-mail: arsiarsi2009@gmail.com; ORCID: 0009-0003-6711-0247
e-mail: orekhovskaja.ok@ukr.net; ORCID: 0009-0008-5252-2018
e-mail: teacher.sg.04@agrokoledg.poltava.ua; ORCID: 0009-0004-5755-815X*

Дослідження присвячене комплексному аналізу стану та перспектив розвитку органічного виробництва в Україні як ключового чинника забезпечення продовольчої безпеки та екологічної стабільності. У роботі висвітлено теоретичні основи органічного землеробства, зокрема визначено його роль у збереженні біорізноманіття, відтворенні родючості ґрунтів та мінімізації негативного впливу на довкілля. На основі аналізу офіційних моніторингових звітів профільних відомств за 2023–2024 рр. виявлено критичне статистичне скорочення галузевих показників: загальної кількості операторів ринку на 45,95% та площ сільськогосподарських угідь з органічним статусом на 86,94%. Встановлено, що такі негативні тенденції зумовлені комплексною дією воєнних чинників (окупація, мінування) та перехідним періодом адаптації виробників до вимог нового національного законодавства. Проаналізовано світові тенденції зростання попиту на екологічно чисту продукцію та законодавче забезпечення галузі в Україні. Особливу увагу приділено науковій спадщині провідних вчених Полтавщини, чий досвід став фундаментом для розвитку сучасних екологічних агротехнологій. Методологія дослідження включає теоретичний аналіз, соціологічне опитування населення з використанням цифрових інструментів, а також результати власних польових експериментів. Підсумки опитування засвідчили високий рівень зацікавленості населення питаннями органічної продукції. У роботі детально розглянуто негативний вплив повномасштабного вторгнення на аграрний сектор, зокрема проблему замінованих полів та порушеної логістики, а також механізми міжнародної підтримки відновлення галузі. Обґрунтовано необхідність переходу фермерських господарств до моделі циклічної економіки, що передбачає інтеграцію виробництва біопалива з біомаси як інструменту енергетичної автономії та економічної диверсифікації. Вагомою складовою роботи є результати власних практичних досліджень в умовах Правобережного Лісо-stepу. Доведено ефективність органічних методів вирощування рослин, коли застосування природних стимуляторів росту забезпечує врожайність, ідентичну врожайності з використанням хімічних добрив. Обґрунтовано доцільність вирощування мікрозелені як швидкорослого суперфуду. Проведено порівняльний аналіз обробки ґрунту, який показав переваги глибокорихлення над традиційною оранкою у питаннях вологонакопичення та збереження структури гумусового шару. Зроблено висновки про необхідність посилення державної підтримки органічних виробників та впровадження інноваційних біотехнологій. Сфера застосування результатів охоплює діяльність фермерських господарств, навчальний процес аграрних закладів освіти та формування стратегій розвитку сільських територій.

Ключові слова: сталий розвиток, екологія, економіка, сільське господарство, здорове харчування, органічне землеробство, соціально-економічний аспект.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку світової економіки органічне виробництво перетворилося з нішевого сегмента на потужний глобальний тренд, поява якого зумовлена зростанням попиту на безпечні харчові

продукти та необхідністю збереження навколишнього середовища. Для України, яка володіє унікальним земельно-ресурсним потенціалом, розвиток органічного сектору є не лише питанням економічної вигоди, а й стратегічним інструментом забезпечення продовольчої безпеки держави та оздоров-

лення нації. В умовах повномасштабного вторгнення та екологічних викликів актуалізується потреба у впровадженні ресурсоощадних технологій, що мінімізують антропогенне навантаження на довкілля.

У світовій науковій літературі широко висвітлено питання сертифікації, маркетингу та загальних принципів органічного землеробства. Водночас, попри наявність ґрунтовних теоретичних розробок вітчизняних вчених, низка практичних аспектів залишається недостатньо вивченою. Зокрема, потребують детальнішого аналізу питання адаптації органічних технологій до умов воєнного часу, а також експериментальне підтвердження ефективності доступних біологічних методів стимуляції росту рослин порівняно з хімічними аналогами в умовах конкретних господарств. Саме необхідність поєднання теоретичного аналізу стану галузі з практичною перевіркою ефективності органічних методів зумовила вибір теми дослідження.

Метою роботи є охарактеризувати сучасний стан та перспективи розвитку органічного виробництва в Україні, проаналізувати вплив воєнних дій на галузь та на основі власних експериментальних досліджень виявити ефективність застосування біологічних методів у рослинництві.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Теоретико-методологічні засади розвитку органічного сектору та його роль у соціально-економічному відродженні сільських територій висвітлено в окремих публікаціях сучасних дослідників. Зокрема, питання правового регулювання та системного значення органічного виробництва розглядаються в наукових напрацюваннях: Є. Милованова [1], А. Гетьмана та ін. [2], а також у законодавчих актах [3]. Особливості державного регулювання розвитку фермерських господарств та механізми їх підтримки в умовах воєнного стану досліджують І. Фурман та В. Дмитрик [4]. Сучасні економічні виклики та трансформацію землекористування в сучасних умовах аналізують О. Будзак та В. Будзак [5], а

комплексне бачення проблем і перспектив розвитку органічного сільського господарства обґрунтовують В. Резніченко зі співавт. [6]. Статистичну оцінку експортного потенціалу галузі наводять експерти Дія. Бізнес [7]. Актуальний моніторинг земельного банку та динаміку сертифікації операторів ринку в умовах воєнного стану відображено у звітних матеріалах Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства України за 2023–2024 рр. [8; 9]. Глобальний екологічний контекст, зокрема вплив систем землеробства на довкілля та залишкові кількості пестицидів у ґрунтах, формує коло наукових інтересів закордонних вчених Е. Lichtenberg [10], D. Knuth та ін. [11]. Світові тенденції та статистичні дані галузі узагальнено у звітах Н. Willer та J. Lernoud [12]. Агротехнологічні аспекти підвищення продуктивності культур та мінімізації стресових чинників представлені в публікаціях М. Шевнікова, А. Стеценка, О. Орихівської та А. Худобея [13–16]. Дослідники зосереджують увагу на використанні біотехнологічних методів, сидератів та селекції адаптованих сортів. Регіональні особливості впровадження органічних технологій на Полтавщині та внесок видатних аграріїв у розвиток науки висвітлюються у роботах Т. Корост із співавт. [17], М. Опари [18], Д. Синицької [19], Я. Пругла [20]. Аналіз джерельної бази засвідчує необхідність подальшого вивчення практичного досвіду органічного господарювання для забезпечення продовольчої безпеки.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методологія була складена аналітично-синтетичними методами: систематизацією та абстракцією, порівнянням, узагальненням, для ідентифікації причинно-наслідкових зв'язків, визначення основних критеріїв і дефініцій, детермінантних чинників та передумов розвитку органічного сектору.

Матеріалами дослідження слугували нормативно-правові акти, результати наукових досліджень та публікацій, представ-

лених у провідних базах даних (Scopus, Web of Science), вибірка яких формувалась у 2016–2025 рр. Обмеження дослідження зумовлені відсутністю доступу до повних і актуальних статистичних даних в умовах воєнного стану та складністю експериментальної перевірки теоретичних висновків.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Органічне сільське господарство — це сертифікована система управління веденням аграрного виробництва з використанням енерго- та ресурсоощадних технологій та з мінімальним використанням синтетичних речовин і механічного обробітку ґрунту, передбачає повне виключення з процесу виробництва генетично модифікованих організмів. Також органічне виробництво констатується як метод ведення сільського господарства, що обмежує використання хімічно синтезованих добрив і засобів захисту рослин і тварин. До того ж усі стадії вирощування, транспортування й переробки сільськогосподарської продукції передбачають максимальний захист довкілля, охорону здоров'я працівників і підлягають обов'язковій інспекції й сертифікації [2]. Світовий органічний сектор демонструє стабільну тенденцію до зростання, що зумовлено підвищенням інтересом суспільства до здорового харчування, екологічного способу життя та сталого використання природних ресурсів. Нині органічна продукція — світовий тренд. Виробництво органічної сільськогосподарської продукції стрімко зростає. Сільгоспвиробники усвідомили, що споживачі готові платити більш високу ціну за продукти, вирощені

органічним способом [16]. Органічне виробництво в Україні регулюється Законом України «Про основні принципи та вимоги до органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції» [3].

Для об'єктивної оцінки сучасного стану галузі проаналізовано динаміку ключових показників органічного виробництва за 2023–2024 рр. Аналіз статистичних даних (табл.) свідчить про істотні трансформаційні процеси в секторі, зумовлені як безпековими чинниками, так і змінами в регуляторному полі.

У 2024 р. в Україні зафіксовано стрімке падіння всіх показників органічного сектору: загальна кількість операторів скоротилася на 45,95%, тоді як загальна площа земель та площа земель із підтвердженим органічним статусом обвалилися майже ідентично — на 87% і 86,94% відповідно. Така негативна динаміка зумовлена трьома критичними чинниками: по-перше, фізичною втратою доступу до угідь через окупацію та мінування територій; по-друге, переходом на національну систему сертифікації, що спричинило часовий розрив у статистиці Державного реєстру; по-третє, майже повною зупинкою нових проєктів у «перехідному періоді», оскільки виробники в умовах війни уникають довгострокових інвестицій у статус, що потребує тривалого підтвердження.

У межах дослідження за допомогою сервісу Google Forms було проведено опитування 86 респондентів віком від 25 років з числа спільноти ВСП «Аграрно-економічний фаховий коледж Полтавського державного аграрного університету». Аналіз відповідей продемонстрував значну обі-

Динаміка основних показників органічного виробництва в Україні (2023–2024 рр.)

Показник	2023 р.	2024 р.	Динаміка, %
Загальна кількість операторів, од.	481	260	-45,95
Загальна площа сільськогосподарських земель (органічних та перехідного періоду), га	471 176	61 267	-87,00
Площа сільськогосподарських земель із органічним статусом, га	390 923	51 064	-86,94

Примітка: складено авторами за даними [8; 9].

знаність населення (95% опитаних знайомі з поняттям), до того ж основним джерелом інформації постають соціальні мережі, а переважна більшість респондентів (92%) свідомо обирає органічні продукти, серед яких лідерами споживчих вподобань є плодоовочева продукція, м'ясо та яйця. Водночас ключовими бар'єрами розвитку галузі визначено високу вартість продукції, недостатню поінформованість про її переваги та недовіру до маркування, хоча загальні перспективи сектору більшість учасників оцінює як середні та високі; респонденти вбачають вирішення наявних проблем у посиленні державної підтримки та активізації просвітницької діяльності, про що вказує на готовність 80% опитаних долучитися до відповідних навчальних програм.

Органічне виробництво відіграє важливу роль у розвитку українського села, адже з'являються нові робочі місця (оскільки відбувається відмова від хімічних засобів захисту рослин, тому необхідна більша кількість рук; разом з органічним виробництвом розвивається і логістика, де також потрібні фахівці) і зберігаються природні ресурси. Органічне сільське господарство завдяки своєму холістичному підходу сприяє розвитку сільської місцевості у таких напрямках:

- 1) підвищення рівня управління та посилення ролі сільських громад у прийнятті управлінських рішень;
- 2) створення сприятливого економічного простору;
- 3) підтримка здорового довкілля;
- 4) збагачення соціального потенціалу сільських громад [3].

Вагомим рушієм становлення галузі є блок економічних чинників, що забезпечують її конкурентоспроможність. Ключовими серед них є підвищення рентабельності та фінансової стабільності господарюючих суб'єктів, а також стале зростання споживчого попиту на сертифіковану органічну продукцію. Важливим аспектом також є активізація інвестиційних процесів у сфері екоінновацій та поступова модернізація матеріально-технічної бази агровиробників

з орієнтацією на природоохоронні технології [6].

Отже, органічне виробництво є потужним драйвером для посилення економічного розвитку українського села. Завдяки створенню робочих місць, підвищенню рівня добробуту населення та підтримці екологічної рівноваги органічне виробництво сприяє стійкому розвитку громад, зменшенню безробіття та покращанню якості життя у сільській місцевості. Органічне харчування — ключовий чинник здорового населення, адже забезпечує організм натуральними, екологічно чистими продуктами без шкідливих хімічних речовин. Вживання органічної продукції зміцнює імунну систему, знижує ризики розвитку хронічних захворювань і покращує загальне самопочуття. Органічна продукція вирощується без пестицидів, гербіцидів, гормонів росту і антибіотиків, тому саме цей фактор знижує ризик накопичення в організмі людини токсичних речовин, що викликають алергічні реакції, порушують гормональний баланс тощо. Ситуація ускладнюється явищем так званого «ефекту коктейлю», виявленого моніторинговими дослідженнями ґрунтів. Йдеться про утворення стійких екологічних сумішей, що містять не лише сучасні засоби захисту рослин, а й залишки препаратів, заборонених понад десять років тому. Оскільки синергетичний вплив таких хімічних комбінацій на живі організми досі залишається майже не вивченим і створює зону невизначеності щодо безпеки, перехід на органічне виробництво стає єдиним дієвим запобіжником проти цих прихованих загроз [11].

Дослідження підтверджують, що органічні продукти містять більше вітамінів, антиоксидантів та корисних мікроелементів. Зокрема, органічні овочі та фрукти мають на 20–40% більше антиоксидантів, що сприяє боротьбі з передчасним старінням та знижує ризик онкологічних захворювань; органічне м'ясо та молочні продукти містять вищу концентрацію корисних омега-3 жирних кислот, що позитивно впливає на роботу серцево-судинної системи. Органічні продукти, багаті на кліт-

ковину (цільнозернові, овочі, фрукти), сприяють нормальному функціонуванню шлунково-кишкового каналу. Відсутність штучних добавок, консервантів та ГМО допомагає знизити ризик розвитку гастриту, виразкової хвороби, синдрому подразненого кишківника. Органіка забезпечує організм чистими природними речовинами та особливо корисна для дітей і майбутніх мам. Науковці доводять, що люди, які регулярно вживають органічну їжу, рідше страждають від ожиріння та метаболічного синдрому, серцево-судинних хвороб, цукрового діабету, алергічних реакцій та астми.

Органічне землеробство є не лише перспективним напрямом розвитку аграрного сектору України, а й важливою складовою збереження навколишнього середовища та здоров'я нації. Поширення екологічно безпечних технологій сприяють практичні розробки провідних науковців Полтавщини – С. Антонця, Т. Корост, В. Писаренка, М. Опари [17–19]. С. Антонєць (1935–2022 рр.) впроваджував унікальну систему органічного землеробства, пропагував природне відтворення родючості ґрунту та виробництво екологічно чистої сільськогосподарської продукції [19]. На ПП «Агроєкологія» науковці вивчають технології, процеси, що відбуваються в ґрунті понад 40 років, не знаючи оранки, пестицидів і мінеральних добрив [18]. Щороку майбутні агрономи, механіки, технологи, лікарі ветеринарної медицини проходять тут навчальну й виробничу практики. Так, Т. Корост вважає [17], важливо донести до свідомості людей, що навала хімії заради швидкої наживи є великою загрозою як землі, так і здоров'ю людей, та користується такими прийомами у роботі: науково обґрунтована структура посівних площ і спеціалізованих сівозмін із насиченням багаторічними бобовими травами близько 25–27%, мілкий обробіток ґрунту, використання сидератів, внесення органічних добрив. В. Писаренко активно працює над розвитком органічного землеробства в Україні, зосереджуючи свою наукову діяльність на впровадженні екологічно безпечних технологій у сільському господар-

стві. М. Опара (1940–2022 рр.) у своїх дослідженнях «Шляхи підвищення ефективності рослинництва», «Родючість ґрунтів і енергозбереження в землеробстві», «Оздоровлення з допомогою культурних рослин», «Органічне землеробство: з досвіду ПП «Агроєкологія» Шишацького району», «Культурні рослини у раціональному харчуванні та оздоровленні» особливу увагу приділяв питанням органічного удобрення, зменшенню використання хімічних засобів та підвищенню ефективності біологічних методів у землеробстві [18]. Завдяки його діяльності та науковим напрацюванням в Україні формується потужна основа для розширення органічного землеробства, що допомагає покращити екологічну ситуацію та підвищити якість сільськогосподарської продукції. Важливою умовою успішного функціонування таких систем є підтримання родючості ґрунтів за допомогою біологічних методів: мінімізації обробітку, внесення органічних добрив та використання сидеральних культур. Традиційні органічні добрива (гній) можуть бути замінені альтернативними – соломою, торфом, пташиним послідом, а також сидератами (люпином, еспарцетом, горохом). Сидерація є одним із найбільш доступних і водночас ефективних способів збагачення ґрунту органічною речовиною. Вона передбачає використання спеціально вирощених культур для покращання родючості ґрунтів, боротьби з ерозією та бур'янами, зменшення втрат елементів живлення й відновлення ґрунтів у господарствах, де відчувається дефіцит органічних добрив. Досвід показує, що використання сидератів поліпшує якість сільськогосподарської продукції, знижує собівартість її виробництва та сприяє підвищенню рентабельності. Особливо високий врожай зеленої маси (25–30 т/га) забезпечують швидкоростучі капустані культури – редька олійна, гірчиця біла, суріпиця, ріпак ярий та озимий. Згадані вище вітчизняні науковці зробили вагомий внесок у вивчення ролі зелених добрив, розглядаючи їх як екологічно безпечну альтернативу традиційним методам. Однею з найважливіших переваг

сидератів є їхня здатність знижувати рівень забур'яненості посівів, що особливо актуально для просапних культур. Використання сидератів у поєднанні з кормовими та проміжними культурами дає ефект алелопатії — зменшення кількості бур'янів на 40–50% завдяки злаково-хрестоцвітним (редька олійна, тифон) чи злаково-бобовим (вика яра). У поєднанні з іншими елементами органічної системи землеробства сидерація забезпечує формування стійких агроєкосистем. Тому, застосування сидератів є дієвим інструментом відновлення родючості ґрунтів та підвищення екологічної безпеки агросфери [14].

Органічне виробництво в Україні показує позитивну динаміку розвитку. З кожним роком зростає кількість сертифікованих органічних господарств, а також площа земель, що використовуються за органічними технологіями; загальна площа органічних угідь в Україні становить понад 400 тис. га. Господарства ведуть діяльність, орієнтуючись на внутрішній ринок та експорт. Згідно з аналітичними даними Громадської спілки «Органічна Україна» кількість переробників органічної продукції підвищилась на 33% — від 86 (2019 р.) до 114 (2020 р.), а кількість виробників готової органічної продукції збільшилась на 7% — від 60 (2019 р.) до 64 (2020 р.). Окрім того, український органічний ринок поповнився майже сотнею нових товарних позицій органічної продукції з вищою доданою вартістю. В 2021 р. значна кількість із них вперше з'явилася на українському ринку, наприклад, мед, амарант, сублімовані сушені фрукти, різноманітна консервована овочева продукція, пекарські суміші, яблучні чипси і батончики з сухофруктів. Найбільшими каналами збуту органічної продукції є супермаркети у різних містах по всій Україні. Незважаючи на те, що українці споживають набагато менше органічної продукції (менше, ніж 1 євро на душу населення), ніж жителі країн ЄС та Швейцарії, інтерес до натуральної та корисної їжі збільшився [7].

Як відомо, 24 лютого 2022 р. країна-агресор Росія розпочала повномасштабне

вторгнення на територію України. Цей день став переломним для всіх сфер економіки й для органічного виробництва зокрема. Основні наслідки для органічного сектору сільського господарства: знищення господарств; значне ускладнення виробництва та логістики через руйнування підприємств і господарств; неможливість безпечно вести сільськогосподарську діяльність через мінування полів; проблеми з експортом через закриття портів і логістичних маршрутів; зниження купівельної спроможності населення та падіння внутрішнього попиту, вибір людьми дешевшої продукції. Станом на березень 2022 р. майже третина органічних сільськогосподарських земель залишалася окупованою. Найбільше постраждали області, розташовані близько до кордонів із РФ і Білоруссю, а також південь України. Значна частина органічних сільськогосподарських земель в Київській, Сумській, Херсонській, Харківській, Запорізькій і Чернігівській обл. знаходилась на території бойових дій чи була окупована. Від початку повномасштабної війни в Україні близько 120 000 га сертифікованих органічних земель було втрачено, особливо у Херсонській і Запорізькій обл. За даними опитування українського органічного бізнесу (близько 50 компаній), проведеного ГС «Органічна Україна», в середині березня 2022 р. 30% українських органічних операторів призупинили свою діяльність, а 70% потребували фінансової підтримки. Для малих і середніх виробників найважчими були витрати на сертифікацію, виплату податків і заробітної плати, купівлю засобів захисту рослин та добрив, дозволених для використання в органічному виробництві. Велика частина виробників повністю або частково втратила бізнес, партії органічної продукції, обладнання і техніка були знищені; серед інших проблем — зруйнована інфраструктура і пошкоджені органічні поля, порушені ланцюги постачання і логістичні проблеми, а також брак робочої сили через мобілізацію чоловіків і евакуацію жінок [7]. Наразі український уряд активно працює над розвитком органічного сектору через фінансові стиму-

ли, законопроекти та програми розвитку. Прикладом є Закон України «Про основні принципи та вимоги до органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції», що набув чинності в 2019 р. і вже кілька разів доповнювався. Цей закон визначає вимоги до сертифікації, маркування та контролю за якістю органічної продукції. Також проводяться тренінги, уроки для фермерів із метою поширення органічного виробництва, існують державні програми, що покривають витрати на сертифікацію органічної продукції. Україна активно співпрацює з міжнародними організаціями, Європейським Союзом, США та іншими країнами у сфері органічного виробництва. Основними продуктами експорту в ЄС є органічне зерно, олія, ягоди, бобові та мед. Було підписано Угоду про асоціацію з ЄС, що дає можливість отримати сертифікації за стандартами ЄС. В Європі органічна продукція постачається в мережі магазинів органічних харчових продуктів. Найбільше точок у Німеччині, Франції та Італії (компанії Dennree, Bio-soor; супермаркети Rewe, Auchan тощо) [12]. Розвиток органічного сектору України також підтримують різні країни через міжнародні програми/проекти технічної допомоги. За останні кілька років органічний сектор України отримав підтримку за швейцарсько-українською програмою «Розвиток торгівлі з вищою доданою вартістю в органічному та молочному секторах України» (QFTP), що впроваджується Дослідним інститутом органічного сільського господарства (FiBL) у партнерстві із SAFOSO AG за підтримки Швейцарії; швейцарсько-українською програмою «Органічна торгівля заради розвитку в Східній Європі» (OT4D), що реалізується IFOAM-Organics International спільно з HELVETAS Swiss Intercooperation та Дослідним інститутом органічного сільського господарства (FiBL) за підтримки Швейцарії; завдяки проекту «Німецько-українська співпраця в галузі органічного сільського господарства» (COA – Фаза II), що впроваджується AFC/IAK та фінансується Федеральним Міністерством продо-

вольства та сільського господарства Німеччини (BMEL); проекту ЄС «Підтримка впровадження Угоди про асоціацію між Україною та ЄС» (Association4U), що впроваджується організацією «Corporate & Public Management Consulting International OU»; проекту «Східне партнерство: готовність до торгівлі»: дякуючи ініціативі EU4Business, що впроваджувалась Міжнародним торговим центром (ІТС) за фінансової підтримки Європейської Комісії; через німецький Центр сприяння імпорту (ІРД), що впроваджується Федерацією оптової і зовнішньої торгівлі і послуг Німеччини (BDG) і sequa gGmbH за фінансової підтримки Федерального міністерства економічного співробітництва та розвитку Німеччини (BMZ); завдяки проекту EU4SmallFarms (Інституційна та політична реформа дрібномасштабного сільського господарства в Україні (IPRSA); проекту ПРООН «Підтримка зеленого відновлення в Україні»; через програму USAID з аграрного і сільського розвитку (АГРО) та проект «Конкурентоспроможна економіка України» (КЕУ); проект «Зміцнення членських бізнес-об'єднань ММСП в Україні», Фаза II, що впроваджується Програмою розвитку ООН (ПРООН) за підтримки Швейцарії; через швейцарсько-український проект «Децентралізація для розвитку демократичної освіти» (DECIDE), що реалізується ГО «DOCCU» у партнерстві з Цюрихським педагогічним університетом (PHZH) за підтримки Швейцарії; канадсько-український проект підтримки торгівлі та інвестицій (проект CUTIS), що впроваджувався за фінансової підтримки Міністерства міжнародних справ Канади; українського проект бізнес-розвитку плодоовочівництва (UHBPD), що впроваджувався і співфінансувався Менонітською Асоціацією Економічного Розвитку (MEDA) та фінансувався Міністерством закордонних справ Канади (Global Affairs Canada) [7]. Успішне використання міжнародних програм та державна підтримка допоможуть Україні стати лідером органічного виробництва. Особливої уваги потребує впровадження стратегії «сталого

органічного зонування», оскільки сусідство з традиційними господарствами несе ризики забруднення пестицидами, доцільно створювати цілісні територіальні кластери, вільні від агрохімікатів. Це дасть можливість уникнути конфліктів землекористування та гарантувати чистоту продукції [5]. Важливим аргументом на користь такого розмежування є чинник мобільності шкідників. Дослідження, проведені в окрузі Керн (Каліфорнія), доводять, що навіть за бажання фермерів координувати дії, відмінності у дозволених регламентах традиційного та органічного землеробства роблять колективну боротьбу зі шкідниками на суміжних полях фактично неможливою. Це створює умови для неконтрольованої міграції шкідників між ділянками, що нівелює зусилля обох сторін [10].

Узагальнення теоретичних засад та аналіз світового досвіду дають можливість стверджувати, що органічне виробництво має значний потенціал, однак його реалізація потребує адаптації технологій до конкретних ґрунтово-кліматичних умов. Логічним продовженням роботи стала експериментальна перевірка ефективності дії біологічних методів в умовах Правобережного Листоєсту України.

Яскравим прикладом реалізації генетичного потенціалу в органічному землеробстві є соя (*Glycine max* (L.) Merrill). Вона постає стратегічною культурою завдяки унікальній здатності до симбіотичної азотфіксації, що покращує родючість ґрунту та фітосанітарний стан агроєкосистем. Вітчизняна селекційна школа досягла значних успіхів, створивши адаптовані сорти сої з урожайністю 4–5 т/га. Однак в умовах глобальних кліматичних змін реалізація цього потенціалу обмежується абіотичними стресами. Якщо в інтенсивному землеробстві для вирішення цих проблем часто застосовують генетичну модифікацію організмів (ГМО), що несе потенційні екологічні ризики та заборонена органічними стандартами, то альтернативним екологічно безпечним шляхом є використання сучасних біотехнологічних методів. Йдеться про застосування мікробних препаратів

(ендофітів, бактерій PGPR-групи), що покращують доступність елементів живлення, та біостимуляторів на основі амінокислот. Такий підхід дає змогу нівелювати вплив стресових чинників та оптимізувати живлення без застосування синтетичних агрохімікатів [13]. Практична частина дослідження охоплює комплекс агротехнічних заходів: від вибору насіння та вирощування розсади до обробітку ґрунту, що допомагає оцінити переваги органічних технологій на всіх етапах виробничого циклу. Дослідження фокусується на органічній розсаді як основі сталого землеробства. Виробництво садивного матеріалу без синтетичних добрив та стимуляторів росту забезпечує збереження родючості землі й екологічну рівновагу. У цьому розділі висвітлено технології підготовки розсади з дотриманням органічних стандартів та порівняно їх із результатами традиційного обробітку (з використанням хімікатів). Одним із найважливіших і найскладніших завдань, що стоять перед агрономом, є вибір якісного посівного матеріалу. Критично важливими є такі ознаки: генетична стійкість до патогенів, конкурентність щодо бур'янів (завдяки швидкому стартовому росту та щільному листку) та потужна коренева система для ефективного засвоєння елементів живлення з ґрунту [15]. Використання сертифікованого за органічними стандартами насіння гарантує його чистоту і відсутність генетичних модифікацій (до речі, відсутність генетичних модифікацій дає змогу проводити власну селекцію насіння і формувати посівний матеріал на власному підприємстві, а генетично-модифіковане насіння не дає плодів у другому поколінні). За можливості, радимо обирати регіональні сорти, що мають підвищену стійкість до місцевих кліматичних умов та шкідників. Окрім того, для підвищення і прискорення схожості насіння можна застосувати передпосівну підготовку — замочування насіння у розчинах природних біологічних стимуляторів, як-от настій верби та сік алое. Для вирощування здорової розсади також важливим є використання органічних ґрунтових сумішей. Зазначимо, що

найкращими компонентами органічного субстрату є перегній та компост — джерело поживних речовин; але важливо не перенаситити ґрунт цими компонентами, щоб уникнути «згорання» розсади через надлишок корисних речовин; кокосовий торф, він покращує структуру ґрунту; вермикуліт і перліт — компоненти для запобігання пересихання ґрунту та доставки достатньої кількості повітря. Ще застосовують біогумус, що сприяє активному розвитку кореневої системи. Правильне приготування субстрату має велике значення, перед використанням його слід знезаразити: найпростіший метод — полити кип'ятком. За розвитку рослини необхідно підживлювати стимуляторами росту. В органічному господарстві синтетичні стимулятори замінюють природними розчинами: настій кропиви формує зав'яз і стимулює збільшення зеленої маси, відвар цибулиння зміцнює імунітет рослин, біопрепарати на основі ефективних мікроорганізмів покращують поглинання рослинами поживних речовин. Важливо пам'ятати, що передозування навіть натуральними препаратами може спричинити надмірний ріст зеленої маси та нанести шкоду розвитку кореневої системи. Вирощування органічної розсади передбачає також і природні засоби захисту рослин. Рослини обприскують біофунгіцидами: настій часнику допомагає проти попелиць і гусениць, в іншій пропорції з марганцівкою бореться з фітофторою на помідорах; деревний попіл застосовують як добриво і як засіб для зміни балансу складу ґрунту; посів супутніх рослин, що відлякують шкідників (квітів календули бояться колорадський жук, попелиця, кліщі; оксамитців — довгоносик, попелиця, совка; базиліку — клопи). Вагомим методом профілактики захворювань рослин є сівозмінна та дотримання просторової ізоляції рослин. Органічна розсада потребує збалансованого поливу, наприклад, використання талої або дощової води; поливу теплою водою для запобігання стресу; застосування мульчі для збереження вологості. Завдяки цьому підтримуються оптимальний температурний режим, рівень вологості та світла. Пе-

ред висадкою у відкритий ґрунт розсаду необхідно загартувати від різких перепадів температури. Саме цей процес адаптує рослин до змін, до умов відкритого ґрунту та зменшує ризик шоку після пересадки. Екологічно чисті методи допомагають отримати сильніші рослини, здатні самостійно протистояти несприятливим чинникам. У вегетаційний період 2024 р. було проаналізовано вибірку з 200 одиниць овочевих культур (*Solanaceae* та *Cucurbitaceae*). Показник збереженості насаджень становив 75%; втрати в обсязі 25% були зумовлені комплексною дією абіотичних (посуха) та біотичних чинників. Фенологічні спостереження виявили найвищу скоростиглість у перцю солодкого сорту «Леся Жовта» (українська селекція), що характеризувався надраннім початком плодоношення. Окремим етапом роботи став порівняльний експеримент щодо впливу типу удобрення на продуктивність *Capsicum annuum*. В ідентичних умовах інсоляції та агротехніки порівнювалися дві групи рослин: Група А, де застосовувалося комплексне мінеральне добриво (NPK 20:20:20), та Група Б, яку обробляли органічним біостимулятором (екстракт лушпиння *Allium cepa*). Результати дослідження засвідчили, що обидві групи продемонстрували тотожні біометричні показники розвитку вегетативної маси та ідентичну врожайність (2–3 плоди/росл.). Це експериментально підтверджує гіпотезу, що застосування органічних стимуляторів забезпечує виробничу ефективність на рівні синтетичних аналогів, гарантуючи при цьому екологічну чистоту продукції. В 2025 р. експериментальну базу було розширено до 300 од. Ключовою особливістю цього етапу став перехід на замкнений цикл відтворення: 100% посівного матеріалу солодкого перцю становить насіння власної репродукції, що успішно пройшло етапи стратифікації та пікірування. Органічне землеробство також ідеально поєднується з вирощуванням корисної і смачної мікрозелені, що є чудовою інвестицією в майбутнє здоров'я та екологію. Підхід до вирощування мікрозелені такий: відсутнє використання пести-

цидів, мінеральних добрив і стимуляторів росту. Мікрозелень не вимагає великих площ і швидко росте, ідеально підходить для локального виробництва, включно з домашнім і лабораторним середовищем, це і робить її справжнім суперфудом сучасного органічного землеробства.

Органічне землеробство передбачає максимальне збереження природної структури ґрунту, його біологічної активності та родючості. Одним із ключових елементів сталого і успішного ведення сільського господарства є застосування глибокорихлення — агротехнічного заходу, що допомагає досягти глибокого розпушення без порушення верхнього родючого шару. Глибокорихлювач, який використовувався у дослідженні, має конструкцію плоскоріза, його основним робочими органами є стійки з лапами, розміщені під кутом до поверхні ґрунту, що і дає змогу проводити обробіток ґрунту на 25–30 см. Така конструкція зменшує тяговий опір, економить паливе і знижує навантаження на трактор. Агрегат не перевертає пласт, а зберігає поверхневу структуру та вологість ґрунту. Дослідження проводились в умовах Правобережного Лісостепу України на фермерських угіддях. Ґрунти в цій зоні мають значний вміст гумусу у верхньому шарі, який у звичайних умовах легко пошкоджується під час традиційної оранки. Було порівняно ефективність глибокорихлення з класичною оранкою за показниками вологонакопичення, щільності ґрунту, активності мікроорганізмів і загальної біологічної активності. Агронічними перевагами глибокорихлення є збереження гумусового шару (традиційна оранка перевертає шар ґрунту і гумус опиняється внизу, цим втрачає контакт з біологічно активними умовами, водночас, глибокорихлення цього не допускає); покращання вологонакопичення — безвідвальний обробіток ґрунту утримує капілярну вологу у верхньому горизонті; розпушування плужної підшови — щорічне використання плуга тягне за собою створення ущільненого шару на глибині 20–25 см, через який не може пробитися корінь рослини; поліпшення аерації та дренаж — до ко-

реневої системи краще надходить повітря; підвищення продуктивності — вже після першого року використання безвідвального обробітку зафіксовано стабільне зростання врожайності, причому без додаткових хімічних стимуляторів. Глибокорихлення є не просто ефективною агротехнікою, а стратегічним підходом до відновлення родючості та збереження природного балансу ґрунтів. В органічному землеробстві, де використання агрохімікатів обмежене, саме оптимізація структури ґрунту та підтримка його біоактивності стають фундаментом сталого господарювання. Раціональне використання ґрунтових ресурсів логічно доповнюється концепцією безвідходного виробництва та замкнутого циклу енергозабезпечення. У цьому контексті перспективним вектором розвитку фермерських господарств стає виробництво біопалива з різних видів біомаси (рослинних решток, відходів тваринництва тощо). Такий інтегрований підхід не лише сприяє екологізації агросектору через декарбонізацію, але й виконує критично важливу економічну функцію. Зокрема, переробка відходів (соломи, гною) допомагає ефективно вирішити проблему їх утилізації, забезпечуючи енергетичну автономію господарства та нівелюючи ризики волатильності цін на енергоносії. Крім того, перехід до енергетичної диверсифікації створює додаткові джерела доходу для фермерів та стимулює соціальний розвиток сільських територій через створення нових робочих місць [4].

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження з'ясовано, що органічне виробництво є перспективним стратегічним інструментом повоєнного відновлення аграрного сектору України. На основі соціологічного опитування та власних польових експериментів в умовах Правобережного Лісостепу доведено, що перехід на органічні технології є економічно обґрунтованим. Однак статистичний аналіз динаміки галузі за 2023–2024 рр. вказує на гостру потребу в антикризовому управлінні через різке скорочення сертифікованих площ (на 87%) та

кількості діючих операторів. Порівняльне вирощування *Capsicum annuum* засвідчило, що застосування біологічних стимуляторів (зокрема екстракту *Allium cepa*) забезпечує продуктивність на рівні з комплексною мінералізацією (NPK 20:20:20), а використання адаптованих сортів вітчизняної селекції у поєднанні з технологією безвідвального глибокорихлення гарантує збереження структури ґрунту та стабільність врожаїв. Доведено, що запорукою фінансової стійкості фермерських господарств в умовах

воєнного стану є впровадження технологій замкнутого циклу, зокрема виробництва біопалива з аграрних відходів, що дає змогу мінімізувати залежність від енергоринку та створити додаткові робочі місця на селі. Перспективи подальшого розвитку галузі полягають у впровадженні стратегії «сталого органічного зонування» для створення безпечних агрокластерів та розширенні використання сучасних біотехнологічних рішень замість синтетичних агрохімікатів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Милованов, Є. (2018). Значення органічного сільського господарства у системі розвитку сільських територій. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер.: Економіка АПК*, (25), 87–98. DOI: <https://doi.org/10.31734/economics.2018.25.087>.
2. Гетьман, А. П., Ігнатенко, І. В., & Корнієнко, В. М. (2016). *Проблеми правового забезпечення сталого розвитку сільських територій в Україні* (А. П. Гетьман & М. В. Шульга, Ред.). Харків: Право.
3. Про основні принципи та вимоги до органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції. Закон України № 36 ст. 275. (2018). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2496-19#Text>.
4. Фурман, І. В., & Дмитрик, В. О. (2024). Державне регулювання розвитку фермерських господарств в умовах воєнного стану. *Економіка та суспільство*, 63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-63-25>.
5. Будзяк, О., & Будзяк, В. (2025). Сучасні виклики та комплікації органічного виробництва й землекористування в Україні. *Agricultural and Resource Economics*, 11(1), 5–45. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2025.11.01.01>.
6. Резніченко, В. П., Коломієць, Л. В., & Стефанюк, С. В. (2024). Органічне сільське господарство: виклики та перспективи розвитку. *Аграрні інновації*, 23, 134–140. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.23.20>.
7. Дія.Бізнес. (2022). Аналіз українського органічного сектору за 8 місяців від початку повномасштабної війни в Україні. URL: <https://surl.li/wmqzug>.
8. OrganicInfo. (2023). Органічна карта України 2023 (ЄС, NOP). URL: <https://surl.li/uuivkr>.
9. OrganicInfo. (2024). Органічна карта України 2024 (за законодавством України). URL: <https://surl.li/tiipxn>.
10. Lichtenberg, E. (2024). Collateral impacts of organic farming. *Science*, 383(6689), 1293–1294. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.ado4083>.
11. Knuth, D., Gai, L., Silva, V., Harkes, P., Hofman, J., Sudoma, M., ... Geissen, V. (2024). Pesticide Residues in Organic and Conventional Agricultural Soils across Europe: Measured and Predicted Concentrations. *Environmental Science & Technology*, 58(15), 6744–6752. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09059>.
12. Willer, H., & Lernoud, J. (Eds.). (2017). *The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2017*. Frick: Research Institute of Organic Agriculture (FiBL); Bonn: IFOAM – Organics International.
13. Шевніков, М. Я., & Стеценко, А. Р. (2025). Вплив абіотичних стресів на продуктивність сої та шляхи їхньої мінімізації за допомогою сучасних біотехнологій. *Молекулярна генетика, селекція та біотехнологія агрокультур: досягнення та виклики: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конфер.* (с. 71–72). Одеса.
14. Стеценко, А. Р., & Орихівська, О. М. (2025). Використання сидератів у технологіях органічного землеробства. *Науково-інноваційний розвиток агровиробництва як запорука продовольчої безпеки України: вчора, сьогодні, завтра: матеріали VIII наук.-практ. конфер.* (с. 355–357). Київ.
15. Стеценко, А. Р., & Орихівська, О. М. (2025). Селекція адаптованих до умов органічного землеробства сортів рослин. *Чаргафські читання: матеріали ХХ Міжнар. наук. конф., присвяченої 150-річчю Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича та 120-річчю від дня народження Ервіна Чаргаффа* (с. 75–76). Чернівці.
16. Худобей, А. А. (2018). *Розвиток органічного виробництва як основа забезпечення екологічної безпеки АПК України* [Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти: спец. 073 «Менеджмент»]. Тернопіль. нац. екон. ун-т, Тернопіль.
17. Корост, Т., Балюк, І., & Гопей, І. (2024, Листопад 6). Органічне землеробство — запорука здоров'я нації. *Вечірня Полтава*, с. 4.
18. Опара, М. (2021, Квітень 21). Відновлюють баланс у відноснах з природою. *Урядовий кур'єр*, с. 5.
19. Синицька, Д. (2022, Березень 4). *Пішов з життя відомий полтавський аграрій Семен Антонієв*. Інтернет-видання «Полтавщина». URL: <https://surl.li/kxdf1l>.
20. Пругло, Я. (2024, Жовтень 17). *Голова Котелевської громади Тетяна Корост зняла з себе повноваження*. Інтернет-видання «Полтавщина». URL: <https://surl.li/lzobjb>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 09.12.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026
 Дата публікації: 27.02.2026

ЕКОСИСТЕМИ УКРАЇНИ ЗА ЦІННІСТЮ ВОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

С.В. Руденко¹, В.П. Руденко¹, С.С. Руденко²

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (м. Чернівці, Україна)

e-mail: rudenkostepan@gmail.com; ORCID: 0009-0003-8072-2862

e-mail: v.rudenko@chnu.edu.ua; ORCID: 0000-0002-7542-4399

²Донецький національний університет імені Василя Стуса (м. Вінниця, Україна)

e-mail: rudenko.prof.eco@gmail.com; ORCID: 0009-0004-7248-016X

Повідомлено, що проведена на єдиній методологічній основі за осередненими за п'ять-сім років показниками продуктивності природних ресурсів у вартісному виразі переоцінка природно-ресурсного потенціалу (ПРП) екосистем України станом на 01.01.2022 р., є вихідним джерелом для визначення тих екосистем (від рівня природних районів до рівня біомів — природних зон і країн), у яких водні багатства є першими чи другими видами природних ресурсів у структурі потенціалу. Доведено, що таке ранжування природних ресурсів є вкрай важливим не тільки для типології екосистем, їх класифікації, але й для наукового обґрунтування перспектив їх подальшого збалансованого розвитку у регіональній і загальнонаціональній економіці. Дослідженню місця і ролі водних ресурсів присвячено чимало праць різних іноземних та українських вчених. Серед 360 екосистем України 28 є домінуючими видами, а 181 — субдомінантними видами природних ресурсів за абсолютною величиною оцінки їх потенціалу в сумарному ПРП. Виявлено, що у майже 3/5 екосистем України потенціал водних ресурсів займає провідні позиції у структурі природних продуктивних сил. Саме у цих екосистемах потенціал водних ресурсів є визначальним або ж істотним чинником за обґрунтування перспектив збалансованого соціально-еколого-економічного розвитку природокористування. Частина водних ресурсів як домінуючого виду ПРП є найменшою серед екосистем обласного рівня — у Зовнішньо-Карпатській (37,5%) та Полонинсько-Чорногірській (37,5%) обл. Найбільша роль потенціалу водних ресурсів — у Вододільно-Верховинській (46,1%) та Мармароській (45,8%) обласних екосистемах. Встановлено, що серед субдомінантних за роллю водних ресурсів у сумарному ПРП екосистем виокремлюються: на рівні біомів-природних зон; на рівні підзон; на рівні екосистем обласних: Присєвасько-Кримська низовинна (35,9%), Нижньобузько-Дніпровська низовинна (34,6%), Центральнокримська височинна (29,6%), Дніпровсько-Молочанська низовинна (26,7%). Найнижчі показники частки субдомінантних водних ресурсів ПРП спостерігаються у трьох обласних екосистемах біому лісостепової зони.

Ключові слова: домінуютні і субдомінантні водні ресурси, сукупні ресурси, природні райони, біоми.

ВСТУП

Водні ресурси, водне господарство України, їх збалансоване функціонування — одна з основ стратегії сталого розвитку держави. В Україні реалізація європейських Директив та міжнародного досвіду регулюється насамперед «Водним кодексом України» [1] та «Водною стратегією України на період до 2050 року», відповідними методичними рекомендаціями [2; 3]. У названих документах відзначається, що водні ресурси є важливою складовою

природно-ресурсного потенціалу (ПРП) екосистем, що охоплює мінеральні, водні, земельні, лісові, фауністичні та природно-рекреаційні компоненти. Крім того, водні ресурси, що входять до єдиної системи природно-ресурсних кадастрів екосистем, можуть бути відповідно оцінені лише через еколого-економічний вимір продуктивності усього ПРП держави.

Здійснена нами на єдиній методологічній основі за осередненими за п'ять-сім років показниками продуктивності природних ресурсів у вартісному виразі пере-

оцінка ПРП України станом на 01.01.2022 р. [4], дає змогу виявляти ті екосистеми (від рівня природних районів до рівня біомів-природних зон і країн), у яких водні багатства є першими (домінантними) чи другими (субдомінантними) видами природних ресурсів у структурі потенціалу. Таке ранжування природних ресурсів є вкрай важливим не тільки для типології екосистем, їх класифікації, але й для наукового обґрунтування перспектив їх подальшого збалансованого розвитку у регіональній і загальнонаціональній економіці. Треба з'ясувати роль, значення водних ресурсів у тих екосистемах України, де вони займають провідні позиції у компонентній структурі ПРП, тобто де вони є доміантними (першими) або субдомінантними (другими) видами природних ресурсів за абсолютною величиною їх потенціалу — головна **мета нашої публікації**.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідженню місця і ролі окремих видів природних ресурсів у розвитку екосистем на різних ієрархічних рівнях, зокрема і водних ресурсів, присвячено чимало праць як окремих науковців, так і їх колективів. Так, зокрема, М.А. Голубець [5], у т. ч. і зі співавт. [6], в екологічному потенціалі наземних екосистем чітко виокремлюють його водну складову, підкреслюють, що екологічний потенціал залежить від структури ландшафту, особливостей його розвитку, від його антропогенної трансформації. М.Д. Гродзинський у «Пізнанні ландшафту: місце і простір», де розроблена концепція типів ландшафтних територіальних структур, у стійкості геосистем до антропогенних навантажень значну роль відводив саме водним ресурсам [7]. Г.І. Денисюк із колегами здійснив системні дослідження з виявлення просторово-часових особливостей трансформації натуральної гідросфери України в антропогенну та сучасного стану цих антропогенних геосистем [8]. О.М. Маринич [9], В.М. Петлін [10] наголошують на необхідності гармонійного, урівноваженого розвитку природних сис-

тем, взаємозв'язку виробничих сил із ПРП. В.І. Вишневський [11] значну увагу приділяє гідрологічному і гідрохімічному режиму водосховищ, зокрема Дніпровських. І.В. Тимченко зі співавт. [12] аналізують процеси зміни русла в річкових екосистемах Південного Бугу за впливу антропогенних чинників на підставі даних супутникового моніторингу. Є.І. Наседкін із Р.Б. Гаврилюком [13] у контексті впровадження Водної рамкової директиви Європейського Союзу розглядають проблеми стану та розвитку моніторингу річкових седиментів на прикладі екосистем басейну Дунаю, пропонують шляхи створення необхідних умов для його поліпшення і гармонізації з відповідними європейськими мережами. Такі зарубіжні вчені, як М.К. Джарія, Т.С. Кіннаман, Л. Кртічка, А.Е. Мартін зі співавт. [14-17], а також Світовий банк [18] акцентують увагу сучасних дослідників та практиків на проблемах збалансованого освоєння, охорони та відтворення природних, зокрема, водних ресурсів, необхідності їх сталого розвитку, водно-ресурсному менеджменті. Втім, звернемо увагу на те, що в оприлюднених розробках учених ще недостатньо висвітлені результати наукових пошуків, у яких би кількісно оцінювалась роль водних ресурсів у структурі ПРП на рівні екосистем обласного рівня, провінційних екосистем, підзон, біомів — природних зон і природних країн України.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Абсолютна величина потенціалу водних ресурсів у тих екосистемах, де вони за вартісною оцінкою знаходяться на першій чи другій позиції у сумарному ПРП природної області, провінції, підзони, біомів — природних зон чи країн України, стала основою для розроблення *таблиці*. Матеріали для її складання почерпнуті з [4].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Серед 360 екосистем України (від рівня 278 природних районів, 57 екосистем

обласного рівня, 14 провінційних екосистем, 3 підзон, 4-х біомів — природних зон до 3 природних країн) у 28 водних ресурсів є домінантними (першими), а в 181 екосистемі — субдомінантними (другими) видами природних ресурсів за абсолютною величиною оцінки їх потенціалу в сумарному ПРП. Це сягає відповідно 7,8% і 50,3% від загальної кількості екосистем України. Тобто, у майже 3/5 екосистем України по-

тенціал водних ресурсів займає провідні позиції у структурі природних продуктивних сил — перше або друге місце. Отже, саме у цих екосистемах потенціал водних ресурсів є визначальним або ж істотним чинником за обґрунтування перспектив збалансованого соціально-еколого-економічного розвитку природокористування.

Як видно з *табл.*, частка водних ресурсів як домінантного виду ПРП є найменшою

Водні ресурси як домінантна та субдомінантна складові ПРП екосистем України

Водні ресурси як:			
домінантний вид ПРП (назва екосистеми)	частка у структурі ПРП, %	субдомінантний вид ПРП (назва екосистеми)	частка у структурі ПРП, %
		Зона мішаних лісів — біом	20,2
		<i>Поліська провінційна екосистема</i>	20,2
		I. Область Волинського Полісся	20,0
		II. Область Малеого Полісся	14,5
		III. Область Житомирського Полісся	20,1
		IV. Область Київського Полісся	20,1
		V. Область Чернігівського Полісся	23,4
		VI. Область Новгород-Сіверського Полісся	19,0
		Зона широколистяних лісів — біом	14,7
		<i>Західно-Українська провінційна екосистема</i>	14,7
		VII. Волинська височинна обл.	12,4
		VIII. Розтоцько-Опільська горбогірна обл.	18,3
		IX. Західно-Подільська височинна обл.	17,3
		X. Середньоподільська височинна обл.	14,2
		Лісостепова зона — біом	11,7
		<i>Подільсько-Придніпровська провінційна екосистема</i>	10,6
		XII. Північно-Західна Придніпровська височинна обл.	14,6
		XIII. Північно-Східна Придніпровська височинна обл.	9,2
		XV. Придністровсько-Східно-Подільська височинна обл.	6,9
		XVI. Середньобузька височинна обл.	13,1

Водні ресурси як:			
домінантний вид ПРП (назва екосистеми)	частка у структурі ПРП, %	субдомінантний вид ПРП (назва екосистеми)	частка у структурі ПРП, %
		XVII. Центральнопридніпровська височинна обл.	13,2
		<i>Лівобережно-Дніпровська провінційна екосистема</i>	12,8
		XX. Північно-Придніпровська терасова низовинна обл.	12,3
		XXI. Північно-Полтавська височинна обл.	10,9
		XXII. Східно-Полтавська височинна обл.	20,6
<i>Східно-Українська провінційна екосистема</i>			
		XXIV. Сумська схилово-височинна обл.	14,4
Степова зона – біом			
<i>Північностепова підзона</i>			
<i>Дністровсько-Дніпровська провінційна екосистема</i>			
		XXVII. Південно-Подільська схилово-височинна обл.	12,1
		<i>Середньостепова підзона</i>	17,3
		<i>Причорноморська провінційна екосистема</i>	17,3
		XXXVI. Задністровсько-Причорноморська низовинна обл.	19,0
		XXXVIII. Бузько-Дніпровська низовинна обл.	20,7
		XXXIX. Дніпровсько-Молочанська низовинна обл.	26,7
		<i>Південностепова (сухостепова) підзона</i>	25,7
		<i>Причорноморсько-Приазовська провінційна екосистема</i>	25,0
		XLI. Нижньобузько-Дніпровська низовинна обл.	34,6
		XLII. Нижньодніпровська терасово-дельтова низовинна обл.	18,3
		XLIII. Присивасько-Приазовська низовинна обл.	23,0
		<i>Кримська степова провінційна екосистема</i>	26,2

Водні ресурси як:			
домінантний вид ПРП (назва екосистеми)	частка у структурі ПРП, %	субдомінантний вид ПРП (назва екосистеми)	частка у структурі ПРП, %
		XLIV. Присивасько-Кримська низовинна обл.	35,9
		XLV. Тарханкутська височинна обл.	19,8
		XLVI. Центральнокримська височинна обл.	29,6
Українські Карпати – гірська провінційна екосистема	30,3		
		I. Передкарпатська височинна обл.	23,8
II. Зовнішньо- Карпатська обл.	37,5		
III. Вододільно- Верховинська обл.	46,1		
IV. Полонинсько- Чорногірська обл.	37,5		
V. Мармароська обл.	45,8		
		VI. Вулканічно-міжгірно-улоговинна обл.	26,1

Примітка: розроблена авторами на основі [4].

у гірській провінційній екосистемі Українських Карпат (30,3%), а серед екосистем обласного рівня – у Зовнішньо-Карпатській (37,5%) та Полонинсько-Чорногірській (37,5%). Найбільша роль потенціалу водних ресурсів – у Вододільно-Верховинській (46,1%) та Мармароській (45,8%) обласних екосистемах.

Серед 43 екосистем обласного рівня, провінційних екосистем, підзон та екосистем біомного рівня – природних зон України, де потенціал водних ресурсів є субдомінантним (другим за значенням) у компонентній структурі ПРП (див. *табл.*), простежуються такі особливості. Перша – роль водних ресурсів у ПРП біомів – природних зон послідовно зростає від Лісостепової зони (11,7%) до Зони широколистяних лісів (14,7%) та Зони мішаних лісів (20,2%), а серед підзон – від Середньостепової (17,3%) до Південнестепової – 25,7%. Це пов'язано (в останньому випад-

ку) з використанням води у зрошуваному землеробстві, в якому досягається найвища економічна ефективність освоєння даного ресурсу.

Друга особливість – на рівні провінційних екосистем України частка субдомінантних водних ресурсів послідовно падає від Кримської степової – 26,2%, Поліської – 20,2, Причорноморської – 17,3 до Західно-Української – 14,7 та Подільсько-Придніпровської – 10,6%.

І, нарешті, субдомінантна роль потенціалу водних ресурсів в екосистемах обласного рівня України найвищою є в: Присивасько-Кримській низовинній (35,9%), Нижньобузько-Дніпровській низовинній (34,6), Центральнокримській височинній (29,6), Дніпровсько-Молочанській низовинній (26,7%) (в усіх чотирьох областях – інтенсивне зрошуване землеробство), а також у Вулканічно-міжгірно-улоговинній (26,1%) та Передкарпатській височинній (23,8%)

областях Українських Карпат. Найнижчі показники частки субдомінантних водних ресурсів у ПРП спостерігаються (в порядку спадання) у: Волинській височинній області біому Зони мішаних лісів (12,4%), Північно-Придніпровській терасовій низовинній області (12,3) Лісостепу, Південно-Подільській схилово-височинній області (12,1) Північностепової підзони та у трьох обласних екосистемах біому Лісостепової зони — Північно-Полтавській височинній (10,9%), Північно-Східній Придніпровській височинній (9,2) і Придністровсько-Східно-Подільській височинній (6,9%).

ВИСНОВКИ

Визначено, що за абсолютною величиною потенціалу водні ресурси у структурі сумарного ПРП України є першим (домінантним) або другим (субдомінантним) видом природних багатств у 209 (із 360) екосистем держави різного ієрархічного

рівня, починаючи від рівня природних районів, областей і закінчуючи біомами — природними країнами. Визначальна роль водно-ресурсного потенціалу відзначається, у такий спосіб, у майже 3/5 екосистем України. Найбільшою частка водних ресурсів є у Вододільно-Верховинській (46,1%) та Мармароській (45,8%) обласних екосистемах. Субдомінантними у сумарному ПРП водні ресурси серед біомів — природних зон є у Зоні мішаних лісів (20,2%), Зоні широколистяних лісів (14,7), Лісостеповій зоні (11,7%); серед підзон — у Південностеповій (25,7%) та Середньостеповій (17,3%). Найнижчі показники частки субдомінантних водних ресурсів ПРП спостерігаються у трьох обласних екосистемах біому Лісостепової зони — Північно-Полтавській височинній (10,9%), Північно-Східній Придніпровській височинній (9,2) і Придністровсько-Східно-Подільській височинній (6,9%).

ЛІТЕРАТУРА

1. Водний кодекс України. Постанова Верховної Ради України № 214/95-ВР. (1995). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>.
2. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 1134-р (2022). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>.
3. *Методичні рекомендації з гідроморфологічного моніторингу масивів поверхневих вод категорії «Річка»*. (2019). Київ.
4. Rudenko, S., & Rudenko, V. (2023). Nature-resource potential of natural regions of Ukraine in present-day figures. *Екологічні науки*, 6(51), 84–89. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.13>.
5. Голубець, М. А. (2000). *Екосистемологія*. Львів: Поллі.
6. Голубець, М. А., Марискевич, О. Г., Крок, Б. О., Козловський, М. П., Башта, А.-Т.В., Гнатів, П. С., ... Яворницький, В. І. (2003). *Екологічний потенціал наземних екосистем*. Львів: Поллі.
7. Гродзинський, М. Д. (2005). *Пізнання ландшафту: місце і простір: моногр.* (Т. 1). Київ: ВПЦ «Київський університет».
8. Денисик, Г. І., Яцентюк, Ю. В., Денисик, Б. Г., Чиж, О. П., & Война, І. М. (2024). Сучасна антропогенна гідросфера України. *Український географічний журнал*, 4(128), 12–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2024.04.012>.
9. Олександр Мефодійович Маринич — видатний український географ. До 100-річчя від дня народження. (2020). *Фізична географія та геоморфологія*, 43(3), 7–10. DOI: <https://doi.org/10.17721/>.
10. Петлін, В. М. (2019). *Гармонія організованості природних територіальних систем: моногр.* Луцьк: Вид. центр. СНУ ім. Лесі Українки, Проспект-М.
11. Вишневецький, В. І. (2020). Гідрологічний і гідрохімічний режим Дніпровських водосховищ. *Гідробіологічний журнал*, 2(332), 103–120. URL: https://www.researchgate.net/profile/Viktor-Vyshnevskiy/publication/343378766_Hydrological_and_Hydrochemical_Regime_of_the_Dnieper_Reservoirs/links/5f76f90f458515b7cf605ef1/Hydrological-and-Hydrochemical-Regime-of-the-Dnieper-Reservoirs.pdf.
12. Тимченко, І. В., Гаврилюк, Р. В., & Томченко, О. В. (2021). Аналіз зміни суслу річки Південний Буг під впливом антропогенних факторів за даними супутникового моніторингу. *Український географічний журнал*, 4(116), 65–71. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.04.065>.
13. Наседкін, Є. І., & Гаврилюк, Р. Б. (2025). Виклики у сфері моніторингу седиментів в Україні в контексті євроінтеграційних вимог (на прикладі басейну Дунаю). *Український географічний журнал*, 3(131), 41–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/UGZ2025.03.041>.
14. Jhariya, M. K., Meena, R. S., & Banerjee, A. (2021). *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture*. Springer Singapore. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3>.
15. Kinnaman, T. C. (2023). A New Perspective on the

- Natural Resource Curse. *World*, 4(4), 670. DOI: <https://doi.org/10.3390/world4040042>.
16. Kricka, L., Tomchikov, I., & Rakytova, I. (2018). Development versus conservation: evaluation of landscape structure changes in Demanovska Valley. Slovakia. *Journal of Mountain Science*, 15, 1153. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4870-0>.
17. Martin, A. E., Collins, S. J., Crowe, S., Girard, J., Naujokaitis-Lewis, I., Smith, A. C., ... Fahrig, L. (2020). Effects of farmland heterogeneity on biodiversity are similar to — or even larger than — the effects of farming practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 288, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106698>.
18. The World Bank: Overview of water resources management (2022). URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/waterresourcesmanagement>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 05.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.01.2026
Дата публікації: 27.02.2026

РАРИТЕТНА ФЛОРА ПЕРЕЛОГІВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПОЛІССЯ

В.В. Коніщук¹, І.В. Хом'як², І.В. Шумигай¹

¹Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: konishchuk_vasyl@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4115-5642

e-mail: innashum27@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0432-2651

²Житомирський державний університет імені Івана Франка (м. Житомир, Україна)

e-mail: khotyukivan@gmail.com; ORCID: 0000-0003-0080-0019

Стаття присвячена особливостям поширення раритетної флори перелогів Центрального Полісся. Метою дослідження є аналіз стану популяцій рідкісних видів рослин на території перелогів Центрального Полісся. Відповідно до мети поставлено такі завдання: встановити видовий склад та ценотичну приуроченість рідкісних видів рослин на перелогах Центрального Полісся; визначити екологічний спектр популяцій раритетних рослин на перелогах за показником природної динаміки та антропогенної трансформації; спрогнозувати зміну чисельності популяцій раритетних видів на перелогах за умов запровадження режиму суворої заповідності. На досліджуваній території нами було виявлено 13 рідкісних представників флори: *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, 1962, *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó, *Dactylorhiza majalis* (Reichenb.) P.F.Hunt et Summerhayes, *Epipactis helleborine* (L.) Crantz, *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *Jurinea cyanoides* (L.) Rehb., *Carlina cirsioides* Klokov, *Tragopogon ucrainicus* Artemcz., *Silene lithuanica* Zapal., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng., *Veratrum nigrum* L., *Hypericum humifusum* L., *Crataegus ucrainica* Pojark. Із них Червона книга України представлена 5 видами, Європейський червоний список — 3, Резолюція 6 Бернської конвенції — 2, CITES — 2 і Список регіонально рідкісних видів — 3. Раритетні види флори на перелогах входять до 10 класів, 13 порядків, 18 союзів, 24 асоціацій згідно із класифікацією Браун-Бланке. Найчастіше вони зустрічаються в асоціаціях *Agrostietum vinealis-tenuis* Shelyag et al. 1985 та *Roëtum angustifoliae* Shelyag-Sosonko et al. 1986. Раритетні види флори присутні на усіх стадіях заростання перелогів. Найвища їхня кількість спостерігається на кореневищно-пухкодерновій та щільнодерновій стадіях. Найменше видів трапляються на пізніх стадіях заростання перелогів. Більшість видів раритетної флори перелогів є вразливими до резерватогенних сукцесій. Більш стійкими до неї є *Epipactis helleborine*, *Platanthera bifolia* *Arctostaphylos uva-ursi*, *Veratrum nigrum* та *Crataegus ucrainica*, які можуть існувати на стадіях автогенної сукцесії до рівня природної динаміки 13,9 бала. Види раритетної флори перелогів витримують помірний антропогенний тиск до 7,9 бала. Однак, деякі види можуть бути під загрозою через їхній незаконний збір та перемищення, як потенційних декоративних видів.

Ключові слова: самовідновлення рослинності, антропогенна трансформація, резерватогенні сукцесії, охорона біорізноманіття.

ВСТУП

Загроза критичного скорочення біорізноманіття є одним із найгостріших викликів сучасності. Хоча подібні коливання чисельності видів спостерігалися впродовж усієї історії Землі, іноді вони набували масштабів глобальних катастроф. Зазвичай причиною таких явищ ставали радикальні й тривалі зміни довкілля, зумовлені геофізичними та астрофізичними чинниками. Втім за сучасної епохи домінантним чин-

ником деградації екосистем та зникнення видів стала антропогенна діяльність [1].

Численні випадки негативного впливу людської діяльності на біорізноманіття поширили ідею суворої заповідності. Здавалося, що достатньо ізолювати місце зростання рідкісного виду від людини і чисельність його популяції почне зростати. На практиці впровадження режиму суворого заповідника на певних територіях парадоксально призводить до зникнення низки рідкісних видів. Це зумовлено

тим, що в процесі еволюції людина стала невід'ємним компонентом біосфери, трансформували природні екосистеми в специфічні оселища, придатні для існування багатьох видів. У минулому подібні умови підтримувалися численними представниками плейстоценової мегафауни. Після вимирання цих великих тварин площа таких оселищ значно скоротилася, і наразі їхнє існування утримується переважно завдяки традиційній господарській діяльності людини. Відтак, усунення антропогенного впливу в таких екосистемах може спричинити їхню остаточну деградацію. Вагомим аргументом проти прихильників концепції «суворої заповідності» є те, що багато вразливих видів просто не здатні існувати поза межами цих напівприродних ландшафтів. Однак варто пам'ятати, що загрозу несе не лише пряма антропогенна трансформація, а й некеровані зміни в структурі екосистем [2–4].

Ціла низка раритетних видів, насамперед деякі представники орхідних, добре почувуються в помірно трансформованих людиною екотопах. Резерватогенні сукцесії щодо таких видів становлять загрозу для існування їхніх популяцій. Людина часто цікавиться такими рослинами, як об'єктами квітництва або як сировиною для традиційної медицини, тому за межами об'єктів природно-заповідного фонду (ПЗФ) вони знаходяться під загрозою знищення. Водночас режим суворої заповідності в межах об'єктів ПЗФ зумовлює послаблення їхніх популяцій. Збереження деяких їхніх представників вимагає більш різноманітних методів охорони як усередині заповідника, так і за його межами.

Деякі раритетні види з'являються на досить ранніх стадіях автогенних сукцесій із позитивним сценарієм, що супроводжують відновлення рослинності на порушених ґрунтах. Як показують польові дослідження, часто такі види зустрічаються навіть на пізніх стадіях формування перелогів [5].

Метою дослідження є аналіз стану популяцій рідкісних видів рослин на території перелогів Центрального Полісся. Відповідно до мети поставлено такі завдання:

- встановити видовий склад та ценотичну приуроченість рідкісних видів рослин на перелогах Центрального Полісся;
- визначити екологічний спектр популяцій раритетних рослин на перелогах за показником природної динаміки та антропогенної трансформації;
- спрогнозувати зміну чисельності популяцій раритетних видів на перелогах за умов запровадження режиму суворої заповідності.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Більшість вчених констатують факт, що динаміка екосистем перелогів розпочинається з трансформації агроекосистем через вторинну автогенну сукцесію одразу після припинення антропогенного впливу [6]. На початкових етапах формується стійке антропогенне навантаження угруповання *Convolvulo-Agropyretum repentis*, яке поступово проходить через бур'янову, кореневищну та дернинні стадії розвитку [7]. З часом ця рослинність замінюється лучною, проте під надмірним рекреаційним тиском вона схильна до дегресії з утворенням низькопродуктивних асоціацій. Якщо наявні необхідні едафічні умови, є необхідний банк насіння чи насіннева діаспора, а рівень антропогенного тиску відносно невисокий, то накопичення надземної фітомаси призводить до переходу в лісо-чагарникову стадію саморозвитку рослинності [8].

Ми можемо розділити вторинні автогенні сукцесії на перелогах на дві стадії.

Як вказують роботи Б.Є. Якубенко із співавт. [9] на ранніх етапах відбувається чергування кількох стадій: бур'янової, кореневищної, кореневищно-пухкодернової та щільнодернинної. На пізній стадії це чагарникова, лісо-чаганикова та лісова. Кожна із наведених вище стадій в ідентичних едафічних умовах та за константного рівня антропогенного тиску представлена певними екосистемами, яка має свій специфічний видовий склад. У них формуються упаковки еконіш для конкретного набору видів флори. Якщо умови середо-

вища у межах цієї ніші збігаються із екологічним спектром раритетного виду, то є ймовірність його існування на такій ділянці [7; 10].

Як зазначають такі дослідники, як V.E. Crisfield [11] в окремих випадках діяльність людини на перелогах може бути припинена або зведена до мінімуму, однак на них залишається достатньо високий рівень антропогенної трансформації. Часто види мають адаптаційні межі толерантності не стільки до прямого впливу людини, скільки до певних рівнів антропогенної трансформації екосистем. Існує хибна думка, що всі раритетні види є агемеробними або олігогемеробними. Причини зниження чисельності популяції можуть бути пов'язані й із іншими чинниками. В історії біосфери, крім великих вимирань, викликаних катастрофами космічного або всепланетарного масштабу був і процес поступового зникнення видів, як частина неперервної еволюції [12].

Види програвали конкуренцію своїм еволюційно новим опонентам, генетично вироджувалися, втрачали життєво важливих симбіонтів, страждали від популяційних спалахів фітофагів, тощо. Цей еволюційний процес не припинився і нині, тому є види для яких антропогенна трансформація екосистем не є основною загрозою. Антропотолерантні раритетні види знаходяться під більшою загрозою від резерватогенних сукцесій у межах об'єктів ПЗФ. Існує консолідована точка зору вчених світу, що дослідження їхньої присутності за межами природоохоронних територій в помірно антропогенно-трансформованих екосистемах, як-от перелоги, є актуальними [13].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Матеріалами дослідження є стандартні геоботанічні описи, створені у період із 2004 по 2025 рр. на території Центрального Полісся. Описи створювалися під час експедиційних досліджень, проведених за загальноприйнятими методами. Ділянки для описів мали прямокутну форму. Їхні

розміри залежали від типу рослинності. Лісо-чагарникові угруповання описувалися на квадратних ділянках площею 100 м², чагарникові – 25 м², лучні – 4 м² навколо місцезростання представника раритетної флори. Для стрічкоподібних угруповань місцями для описів були прямокутні ділянки завдовжки 10–20 м (для лісу та чагарнику) та 4–5 м (для лук) [14].

Описи використовувалися для класифікації рослинних угруповань за еколого-флористичними принципами шкали Брауна-Бланке за допомогою програми TURBOVEG FOR WINDOWS [15; 16]. Класифікаційні одиниці визначалися за продромусом рослинності України відповідно до вимог фітосоціологічної номенклатури [17].

Для характеристики чинників середовища поселення використовуються методи синфітоіндикації. Для цього також застосовувалася уніфікована шкала Дідуха-Плуті та бази даних «ECODID» та «ECODBASE 5C» [18] також 18-бальна шкала антропогенної трансформації та 21-бальна шкала показника природної динаміки.

Результати синфітоіндикаційного аналізу отримані за допомогою комп'ютерного програмного пакету «SIMAGR 1.12» [19].

Раритетність видів рослин визначалася за їхньою присутністю в міжнародних, національних та регіональних охоронних списках. Міжнародні списки бралися до уваги за умови ратифікації Україною пов'язаних із ними договорів.

Тому, списками раритетних видів міжнародного значення є Європейський червоний список та Резолюції 6 Бернської конвенції, Додаток II Конвенції про міжнародну торгівлю видами дикої фауни та флори, що перебувають під загрозою зникнення (CITES). Національним списком раритетних видів є Червона книга України. Вона нами взята в останній редакції відповідно до наказу Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України № 111 від 15 лютого 2021 р. Регіональним списком раритетних видів є перелік регіонально рідкісних видів рослин затвер-

джений рішеннями Житомирської обласної ради (рішення № 1162 від 08.09.2010) [20].

**РЕЗУЛЬТАТИ
ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ**

На різних стадіях заростання перелогів нами виявлено 13 рідкісних представників флори, що належать до списків рідкісних видів різного рівня (табл. 1; 2). Це *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, 1962, *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó, *Dactylorhiza majalis* (Reichenb.) P.F. Hunt et Summerhayes, *Epipactis helleborine* (L.) Crantz, *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *Jurinea cyanooides* (L.) Rehb., *Carlina cirsioides* Klokov, *Tragopogon ucrainicus*

Artemcz., *Silene lithuanica* Zapal., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng., *Veratrum nigrum* L., *Hypericum humifusum* L., *Crataegus ucrainica* Pojark. Вони відносяться до 11 родів, 7 родин та 7 порядків. Найбільше представництво у родин *Orchidaceae* (5 видів) та *Asteraceae* (3 види).

До Червоної книги України належать 5 видів. Усі вони входять до родини *Orchidaceae* Juss. Із міжнародних списків найбільше представництво мають ті, які внесені в Європейський червоний список — *Carlina cirsioides* Klokov, *Tragopogon ucrainicus* Artemcz та *Silene lithuanica* Zapal. Лише до списків флори Резолюції 6 Бернської конвенції належить *Jurinea cyanooides* (L.)

Таблиця 1. Таксономічне положення раритетних видів рослин, яких було виявлено на перелогах Центрального Полісся

Вид	Рід	Родина	Порядок
<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó, 1962	<i>Dactylorhiza</i> Necker ex Nevski	<i>Orchidaceae</i> Juss.	<i>Asparagales</i> Bromhead
<i>Dactylorhiza maculata</i> (L.) Soó	<i>Dactylorhiza</i> Necker ex Nevski	<i>Orchidaceae</i> Juss.	<i>Asparagales</i> Bromhead
<i>Dactylorhiza majalis</i> (Reichenb.) P.F. Hunt et Summerhayes	<i>Dactylorhiza</i> Necker ex Nevski	<i>Orchidaceae</i> Juss.	<i>Asparagales</i> Bromhead
<i>Epipactis helleborine</i> (L.) Crantz	<i>Epipactis</i> Zinn.	<i>Orchidaceae</i> Juss.	<i>Asparagales</i> Bromhead
<i>Platanthera bifolia</i> (L.) Rich.	<i>Platanthera</i> Rich.	<i>Orchidaceae</i> Juss.	<i>Asparagales</i> Bromhead
<i>Jurinea cyanooides</i> (L.) Rehb	<i>Jurinea</i> Cass.	<i>Asteraceae</i> Bercht. & J.Presl	<i>Asterales</i> Lindl.
<i>Carlina cirsioides</i> Klokov	<i>Carlina</i> L.	<i>Asteraceae</i> Bercht. & J.Presl	<i>Asterales</i> Lindl.
<i>Tragopogon ucrainicus</i> Artemcz	<i>Tragopogon</i> L.	<i>Asteraceae</i> Bercht. & J.Presl	<i>Asterales</i> Lindl.
<i>Silene lithuanica</i> Zapal.	<i>Silene</i> L.	<i>Caryophyllaceae</i> Juss.	<i>Caryophyllales</i> Perleb.
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i> (L.) Spreng	<i>Arctostaphylos</i> Adanson	<i>Ericaceae</i> Juss.	<i>Ericales</i> Bercht. & J.Presl.
<i>Veratrum nigrum</i> L.	<i>Veratrum</i> L.	<i>Melanthiaceae</i> Batsch ex Borkh.	<i>Liliales</i> Perleb
<i>Hypericum humifusum</i> L.	<i>Hypericum</i> L.	<i>Hypericaceae</i> Juss.	<i>Malpighiales</i> Mart.
<i>Crataegus ucrainica</i> Pojark	<i>Crataegus</i> Tourn. ex L.	<i>Rosaceae</i> Juss.	<i>Rosales</i> Perleb

Таблиця 2. Належність флори, виявленої на перелогах Центрального Полісся, до природоохоронних списків різного рівня

Вид	Червона книга України	Європейський червоний список	Резолюція 6 Бергської конвенції	CITES	Список регіонально рідкісних видів
<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó, 1962	+				
<i>Dactylorhiza maculata</i> (L.) Soó	+				
<i>Dactylorhiza majalis</i> (Reichenb.) P.F. Hunt et Summerhayes	+				
<i>Epipactis helleborine</i> (L.) Crantz	+			+	
<i>Platanthera bifolia</i> (L.) Rich.	+			+	
<i>Jurinea cyanoides</i> (L.) Rchb			+		
<i>Carlina cirsioides</i> Klokov		+			
<i>Tragopogon ucrainicus</i> Artemcz		+			
<i>Silene lithuanica</i> Zapal.		+			
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i> (L.) Spreng					+
<i>Veratrum nigrum</i> L.					+
<i>Hypericum humifusum</i> L.					+
<i>Crataegus ucrainica</i> Pojark			+		

Rchb та *Crataegus ucrainica*, а до Додаток II CITES — *Epipactis helleborine* (L.) Crantz та *Platanthera bifolia* Pojark. Регіональний список рідкісних видів рослин представлений *Carlina cirsioides* Klokov, *Tragopogon ucrainicus* Artemcz та *Silene lithuanica* Zapal. Види із деяких міжнародних списків є досить поширеними на території України. Вони належать до родин, представники яких досить часто зустрічаються на порушених та помірно антропогенно трансформованих територіях.

Раритетні види флори на перелогах входять до 10 класів, 13 порядків, 18 союзів, 24 асоціацій згідно із класифікацією Браун-Бланке (табл. 3). Найчастіше раритетні види зустрічаються в асоціаціях *Agrostietum vinealis-tenuis* Shelyag et al. 1985 та *Poëtum angustifoliae* Shelyag-Sosonko et al. 1986 союзу *Agrostion vinealis* Sipaylova, Mirk., Shelyag et V.Sl. 1985 порядку *Galie-*

talia veri Mirk. et Naum. 1986 класу *Molinio-Arrhenatheretea* R.Tx 1937.

Найбільше видів раритетної флори зустрічаються на кореневищно-пухкодерновій та щільнодерновій стадіях заростання перелогів (табл. 4). Найменше видів трапляються на пізніх стадіях заростання перелогів. *Epipactis helleborine* (L.) Crantz зафіксовано практично на всіх стадіях, окрім найбільш ранніх (бур'янових або піонерних). *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, 1962 та *Jurinea cyanoides* (L.) Rchb — лише на одній стадії заростання перелогів. Частина раритетних видів віддають перевагу раннім стадіям відновлення рослинності: *Jurinea cyanoides* (L.) Rchb, *Carlina cirsioides* Klokov, *Tragopogon ucrainicus* Artemcz, *Silene lithuanica* Zapal, *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng та *Hypericum humifusum* L. Інші види переважно на пізніх стадіях: *Platanthera bifolia* (L.) Rich, *Veratrum nigrum* L.

Таблиця 3. Синтаксономічна приуроченість угруповань перелогів Центрального Полісся, до складу яких входять представники раритетної флори

Вид	Клас	Асоціація
<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó, 1962	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> R. Tx, 1937	<i>Trifolio-Festucetum rubrae</i> Oberdorfer, 1957
<i>Dactylorhiza maculata</i> (L.) Soó	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> R. Tx, 1937	<i>Agrostietum vinealis-tenuis</i> Shelyag et al., 1985 <i>Poëtum angustifoliae</i> Shelyag-Sosonko et al., 1986 <i>Trifolio-Festucetum rubrae</i> Oberdorfer, 1957
<i>Dactylorhiza majalis</i> P.F. Hunt et Summerhayes	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> R. Tx, 1937	<i>Agrostietum vinealis-tenuis</i> Shelyag et al., 1985 <i>Poëtum angustifoliae</i> Shelyag-Sosonko et al., 1986 <i>Trifolio-Festucetum rubrae</i> Oberdorfer, 1957 <i>Poëtum angustifoliae</i> Shelyag-Sosonko et al., 1986
<i>Epipactis helleborine</i> (L.) Crantz	<i>Trifolio-Geranietea</i> Th. Müll, 1962	<i>Agrimonia eupatoria-Vicietum cassubicae</i> (Passarge, 1967) Dengler et al., 2006 <i>Agrimonia eupatoria-Trifolietum medii</i> (T. Müller, 1962) Dengler et al., 2003
	<i>Epilobietea angustifolii</i> Tx. et Preising ex von Rochow, 1951	<i>Rubo-Chamaenerietum angustifolii</i> Hadač et al., 1969 <i>Rubetum idaei</i> Gams, 1927 <i>Calamagrostietum epigei</i> Juraszek, 1928
	<i>Robinietea</i> Jurco ex Hadac et Sofron, 1980	<i>Salicetum capreae</i> Schreier, 1955
<i>Platanthera bifolia</i> (L.) Rich.	<i>Calluno-Ulicetea</i> Br.-Bl. et Tüxen ex Klika et Hadač, 1944	<i>Calluno-Genistetum</i> R. Tx, 1937
	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> , R. Tx, 1937	<i>Agrostietum vinealis-tenuis</i> Shelyag et al., 1985 <i>Poëtum angustifoliae</i> Shelyag-Sosonko et al., 1986 <i>Trifolio-Festucetum rubrae</i> Oberdorfer, 1957
	<i>Trifolio-Geranietea</i> Th. Müll, 1962	<i>Agrimonia eupatoria-Vicietum cassubicae</i> (Passarge, 1967) Dengler et al., 2006 <i>Agrimonia eupatoria-Trifolietum medii</i> (T. Müller, 1962) Dengler et al., 2003 <i>Trifolio medii-Astragaletum ciceri</i> Reichhoff in Hilbig et al., 1982
	<i>Epilobietea angustifolii</i> Tx. et Preising ex von Rochow, 1951	<i>Rubetum idaei</i> Gams, 1927 <i>Calamagrostietum epigei</i> Juraszek, 1928
	<i>Salicetea purpurea</i> Moor, 1958	<i>Populetum nigro-albae</i> Slavnić, 1952
	<i>Robinietea</i> Jurco ex Hadac et Sofron, 1980	<i>Salicetum capreae</i> Schreier, 1955

Вид	Клас	Асоціація
<i>Jurinea cyanoides</i> (L.) Rchb	<i>Nardetea strictae</i> Rivas Goday et Borja Carbonell in Rivas Goday et Mayor López, 1966	<i>Calluno-Nardetum</i> Hrync, 1959
	<i>Koelerio-Corynepherea</i> <i>canescentis</i> Klika in Klika et Novak, 1941	<i>Corynephero-Silenetum tataricae</i> Libb., 1931
	<i>Sedo-Scleranthetea</i> BR.-BL., 1955	<i>Thymo pulegioidis-Sedetum sexangularis</i> Didukh et Kontar, 1998 <i>Sedo acri-Dianthetum hypanici</i> Solomakha et al., 2006
	<i>Vaccinio-Piceetea</i> Br.-Bl. in Br.-Bl. et al., 1939	<i>Cladonio-Pinetum</i> Juraszek, 1927
<i>Carlina cirsioides</i> Klokov	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> R. Tx, 1937	<i>Poëtum angustifoliae</i> Shelyag-Sosonko et al., 1986
<i>Tragopogon</i> <i>ucrainicus</i> Artemcz	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> R. Tx, 1937	<i>Agrostietum vinealis-tenuis</i> Shelyag et al., 1985 <i>Poëtum angustifoliae</i> Shelyag-Sosonko et al., 1986
	<i>Nardetea strictae</i> Rivas Goday et Borja Carbonell in Rivas Goday et Mayor López, 1966	<i>Calluno-Nardetum</i> Hrync, 1959
	<i>Sedo-Scleranthetea</i> BR.-BL., 1955	<i>Thymo pulegioidis-Sedetum sexangularis</i> Didukh et Kontar, 1998 <i>Sedo acri-Dianthetum hypanici</i> Solomakha et al., 2006
	<i>Epilobietea angustifolii</i> Tx. et Preising ex von Rochow, 1951	<i>Calamagrostietum epigei</i> Juraszek, 1928
	<i>Artemisietea vulgaris</i> Lohmeyer et al. ex von Rochow, 1951	<i>Potentillo argenteae-Artemisietum absinthii</i> Faliński, 1965
	<i>Vaccinio-Piceetea</i> Br.-Bl. in Br.-Bl. et al., 1939	<i>Cladonio-Pinetum</i> Juraszek, 1927 <i>Dicrano-Pinetum</i> Preising et Knapp ex Oberdorfer, 1957
<i>Silene lithuanica</i> Zapal.	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> R. Tx, 1937	<i>Agrostietum vinealis-tenuis</i> Shelyag et al., 1985 <i>Festuco pratensis-Deschampsietum cespitosae</i> Turubanova, 1986
	<i>Calluno-Ulicetea</i> Br.-Bl. et Tüxen ex Klika et Hadač, 1944	<i>Calluno-Genistetum</i> R. Tx, 1937
	<i>Epilobietea angustifolii</i> Tx. et Preising ex von Rochow, 1951	<i>Calamagrostietum epigei</i> Juraszek, 1928

Вид	Клас	Асоціація
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i> (L.) Spreng	<i>Calluno-Ulicetea</i> Br.-Bl. et Tüxen ex Klika et Hadač, 1944	<i>Euphorbio cyparissiae-Callunetum vulgaris</i> Schubert ex Passarge, 1964
	<i>Nardetea strictae</i> Rivas Goday et Borja Carbonell in Rivas Goday et Mayor López, 1966	<i>Calluno-Nardetum</i> Hrync, 1959
	<i>Sedo-Scleranthetea</i> BR.-BL., 1955	<i>Thymo pulegioidis-Sedetum sexangularis</i> Didukh et Kontar, 1998 <i>Sedo acri-Dianthetum hypanici</i> Solomakha et al., 2006
	<i>Vaccinio-Piceetea</i> Br.-Bl. in Br.-Bl. et al., 1939	<i>Cladonio-Pinetum</i> Juraszek, 1927 <i>Dicrano-Pinetum</i> Preising et Knapp ex Oberdorfer, 1957
<i>Veratrum nigrum</i> L.	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> R. Tx, 1937	<i>Agrostietum vinealis-tenuis</i> Shelyag et al., 1985 <i>Poëtum pratensis</i> Ravarut, Cazac et Turenschi, 1956
	<i>Trifolio-Geranietea</i> Th. Müll, 1962	<i>Agrimonio eupatoriae-Vicietum cassubicae</i> (Passarge 1967) Dengler et al., 2006
	<i>Robimietea</i> Jurco ex Hadac et Sofron, 1980	<i>Salicetum capreae</i> Schreier, 1955
<i>Hypericum humifusum</i> L.	<i>Calluno-Ulicetea</i> Br.-Bl. et Tüxen ex Klika et Hadač, 1944	<i>Calluno-Genistetum</i> R. Tx, 1937
	<i>Sedo-Scleranthetea</i> BR.-BL., 1955	<i>Sedo acri-Dianthetum hypanici</i> Solomakha et al., 2006
	<i>Nardetea strictae</i> Rivas Goday et Borja Carbonell in Rivas Goday et Mayor López, 1966	<i>Calluno-Nardetum</i> Hrync, 1959
<i>Crataegus ucrainica</i> Pojark	<i>Robimietea</i> Jurco ex Hadac et Sofron, 1980	<i>Salicetum capreae</i> Schreier, 1955 <i>Sambucetum racemosae</i> Noifalisse in Lebr. et al. ex Oberd., 1973
	<i>Rhamno-Prunetea</i> Rivas Goday et Borja Carbonell ex Tüxen, 1962	<i>Rubo fruticosi-Prunetum spinosae</i> Web 1974 n.inv. Witting, 1974 <i>Sambuco-Prunetum spinosae</i> Doing, 1962 <i>Prunetum spinosae</i> R. Tx, 1952

та *Crataegus ucrainica* Pojark. Види роду *Dactylorhiza* займають проміжне становище, заселяючи лучні ділянки на ранніх стадіях проникнення на них деревної рослинності.

Присутність відносно вологолюбних видів роду *Dactylorhiza* Necker ex Nevski на території зайнятих переважно сухими луками обумовлюється геологічною будовою Житомирського Полісся.

Таблиця 4. Розташування представників раритетної флори на різних стадіях відновлення природної рослинності на перелогах Центрального Полісся

Вид	Стадія відновлення природної рослинності на перелогах						
	бур'янова	кореневища	кореневищно-пухкодернова	щільно-дернова	чагарникова	лісо-чагарникова	лісова
<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó, 1962				+			
<i>Dactylorhiza maculata</i> (L.) Soó			+	+			
<i>Dactylorhiza majalis</i> (Reichenb.) P.F. Hunt et Summerhayes			+	+			
<i>Epipactis helleborine</i> (L.) Crantz		+	+	+	+	+	+
<i>Platanthera bifolia</i> (L.) Rich.				+	+	+	+
<i>Jurinea cyanoides</i> (L.) Rchb	+						
<i>Carlina cirsioides</i> Klokov	+	+	+				
<i>Tragopogon ucrainicus</i> Artemcz	+	+	+				
<i>Silene lithuanica</i> Zapal.	+	+	+	+			
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i> (L.) Spreng	+	+	+			+	+
<i>Veratrum nigrum</i> L.				+	+	+	+
<i>Hypericum humifusum</i> L.	+	+	+	+			
<i>Crataegus ucrainica</i> Pojark					+	+	+

Це відбувалося частіше за все на ділянках, де недалеко від поверхні ґрунту залягають граніти або водонепроникні осадові породи їхнього вивітрювання. Наприклад, ми можемо спостерігати за крупними популяціями *Dactylorhiza* Necker ex Nevski на північних та північно-західних околицях м. Коростень. Тут присутні великі площі землі, де припинено рільництво у зв'язку із скороченням населення та низькою продуктивністю цих ділянок, як сільськогосподарських угідь. Граніти тут залягають не глибше півтора метри від денної поверхні, а в багатьох місцях вони виходять на денну поверхню. Під дією тривалої засухи, пов'язаної із глобальними змінами клімату та ксерофітизацію Полісся тут сформувалися мезоксерофітні луки порядку *Galietales veri* Mirk. et Naum. 1986. Однак, на глибині від кількох сантиметрів до пів-

тора метра відбувається застій води в верхньому ґрунтовому водоносному горизонті. Ця волога дає змогу мезофільним та мезогігрофільним видам роду *Dactylorhiza* Mirk. et Naum. 1986 виживати в таких умовах.

Аналіз описаних місцезнаходжень допомагає визначити потенційні оселища для заселення на них раритетної флори, а також спрогнозувати ймовірний вплив резерватогенних сукцесій чи зміни антропогенного навантаження на них [21]. Більшість із таких видів зустрічаються в екосистемах перелогів із показниками природної динаміки від 4 до 7,5 бала та рівні антропогенної трансформації 7,9–10 балів. Для орхідних із роду *Dactylorhiza* Necker ex Nevski максимальні значення природної динаміки є лімітними, тому в цих місцях резерватогенні сукцесії призведуть до скорочення чисельності їхньої популяції

та її зникнення. Водночас, існує загроза для винищення їхніх популяцій у випадку їхнього незаконного викопування як декоративних квітів чи лікарську сировину. Всі види орхідних добре переносять помірне антропогенне навантаження і зустрічаються на узбіччях доріг, прокладених через перелоги. *Epipactis helleborine* (L.) Crantz та *Platanthera bifolia* (L.) Rich. менш стійкі щодо заповідання території перелогів і здатні витримувати зміну природного показника динаміки аж до 13,9 бала, що відповідає стиглим похідним (дрібнолистяним лісам).

Деяка інша ситуація щодо видів із Європейського червоного списку, Бернської конвенції та регіонально рідкісних видів. За винятком *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng, *Veratrum nigrum* L. та *Crataegus ucrainica* Pojark, вони пристосовані до нижчих показників природної динаміки (4–5 балів) та легко переносять добре виражену антропогенну трансформацію (8,2–9,7). Інколи, їх можна зустріти на порушених пісках із показниками антропогенної трансформації в 10 балів. *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng, *Veratrum nigrum* L. та *Crataegus ucrainica* Pojark можуть також траплятися в соснових або дрібно-листяних лісах, що формуються на перелозах, де показники динаміки досягають 14,1 бала. Однак, найбільш сприятливі умови для цих видів мають величини показника динаміки близько 11–12 балів та антропогенної трансформації 6–8 балів.

ВИСНОВКИ

На перелозах Центрального Полісся виявлено 13 рідкісних представників флори: *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, 1962, *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó, *Dactylorhiza*

majalis (Reichenb.) P.F. Hunt et Summerhayes, *Epipactis helleborine* (L.) Crantz, *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *Jurinea cyanoides* (L.) Rchb., *Carlina cirsioides* Klokov, *Tragopogon ucrainicus* Artemcz., *Silene lithuanica* Zapal., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng., *Veratrum nigrum* L., *Hypericum humifusum* L., *Crataegus ucrainica* Pojark.

Із них Червона книга України представлена 5 видами, Європейський червоний список – 3, Резолюція 6 Бернської конвенції – 2, CITES – 2 і Список регіонально рідкісних видів – 3.

Раритетні види флори на перелозах входять до 10 класів, 13 порядків, 18 союзів, 24 асоціацій згідно із класифікацією Браун-Бланке. Найчастіше вони зустрічаються в асоціаціях *Agrostietum vinealis-tenuis* Shelyag et al. 1985 та *Poëtum angustifoliae* Shelyag-Sosonko et al. 1986. Також присутні на усіх стадіях заростання перелогів. Найвища їхня кількість спостерігається на кореневищно-пухкодерновій та щільнодерновій стадіях заростання перелогів. Найменше видів трапляються на пізніх стадіях заростання перелогів.

Більшість видів раритетної флори перелогів є вразливими до резерватогенних сукцесій. Більш стійкими до неї є *Epipactis helleborine* (L.) Crantz, *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng., *Veratrum nigrum* L. та *Crataegus ucrainica* Pojark, які можуть існувати на стадіях автогенної сукцесії до рівня природної динаміки 13,9 бала.

Види раритетної флори перелогів витримують помірний антропогенний тиск до 7,9 бала. Втім, деякі види можуть бути під загрозою через їхній незаконний збір та переміщення, як потенційних декоративних видів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tilman, D., Clark, M., Williams, D. R., Kimmel, K., Polasky, S., & Packer, C. (2017). Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. *Nature*, 546, 73–81. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature22900>.
2. Costelloe, B., Collen, B., Milner-Gulland, E. J., Craigie, I. D., McRae, L., Rondinini, C., & Nicholson, E. (2016). Global biodiversity indicators reflect the modeled impacts of protected area policy change. *Conservation Letters*, 9(1), 14–20. DOI: <https://doi.org/10.1111/conl.12163>.
3. Бумар, Г. Й., & Попович, С. Ю. (2001). Сучасні проблеми збереження Поліського природного заповідника як наслідок резерватогенних сукцесій. *Заповідна справа в Україні*, 7(2), 59–61.
4. Malhi, Y., Doughty, C. E., Galetti, M., Smith, F. A., Svenning, J.-C., & Terborgh, J. W. (2016). Mega-

- fauna and ecosystem function from the Pleistocene to the Anthropocene. *PNAS*, 113(4), 838–846. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1502540113>.
5. Kotsiuba, I. Y., Khomiak, I. V., Bren, A., & Shamonina, M. (2023). Ecological strategies of plants in the process of restoration of disrupted natural ecosystems of Ukrainian Polissia. *Український журнал природничих наук*, (3), 186–198.
 6. Campos, J. L. A., Monteiro, F. T., Soldati, G. T., & Fávero, C. (2025). Implications of slash-and-burn agriculture with rotation and fallow lands in traditional agricultural systems: A review. *Acta Botanica Brasiliica*, 39, e20240204.
 7. Ustymenko, P. M., Dubyna, D. V., Popovych, S. Y., Baranovskyi, B. O., Larionov, M. S., Dziuba, T. P., ... Kozyr, M. S. (2025). Demutation of forests on fallow lands of Ukraine: The context of eoniche replacement in successions. *Biosystems Diversity*, 33(3), e2540–e2540.
 8. Sharma, S. B., Kumar, S., Rozar, K. P., & Nongrum, M. M. (2024). Effect of fallow period on soil seed bank runoff and regeneration of successional forests. *Vegetos*, 37(5), 1772–1780.
 9. Якубенко, Б. Є., Ярмоленко, А. К., Тертишний, А. П., & Чурілов, А. М. (2014). Біоморфологічний аналіз флори відновлювальної лучної рослинності Лісостепу України. *Інтродукція рослин*, (4), 31–38.
 10. Morimoto, J., & Shibata, M. (2018). Vegetation succession on fallow land. In *Biodiversity Conservation Using Umbrella Species: Blakiston's Fish Owl and the Red-crowned Crane* (pp. 197–206). Singapore: Springer Singapore.
 11. Crisfield, V. E., Guillaume Blanchet, F., Raudsepp-Hearne, C., & Gravel, D. (2024). How and why species are rare: towards an understanding of the ecological causes of rarity. *Ecography*, 2024(2), e07037.
 12. Algeo, T. J., & Xie, S. (2025). The four stages of the Sixth Mass Extinction. *Habitable Planet*, 1(1&2), 20–33.
 13. Liu, M., Yang, C., Miao, L., Xiao, Y., Wang, Q., & Wang, M. (2024). Rare and common species contribute disproportionately to alpine meadow community construction and functional variation. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(17), 24881–24893.
 14. Якубенко, Б. Є., Попович, С. Ю., & Устименко, П. М. (2019). *Геоботаніка: підруч.* (2-ге вид.). Вид-во: Ліра-К.
 15. Biurrun, I., Dengler, J., & Willner, W. (2025). Vegetation Classification and Survey: Five years and looking ahead. *Vegetation Classification and Survey*, 6, 1–11.
 16. Hennekens, S. (2009). *Turboveg for Windows*. 1998–2007. (Vers. 2). Inst. voor Bos en Natuur.
 17. Дубина, Д. В., Дзюба, Т. П., Ємельянова, С. М., Багрікова, Н. О., Борисова, О. В., Борсукевич, Л. М., ... Якушенко, Д. М. (2019). *Продромус рослинності України*. Наукова думка.
 18. Дідух, Я. П. (2012). *Основи біоіндикації*. Наукова думка.
 19. Khomiak, I., Harbar, O., Kostiuk, V., Demchuk, N., & Vasylenko, O. (2024). Synphytoindication models of the anthropogenic transformation of ecosystems. *Natura Croatica*, 33(1), 65–77. DOI: <https://doi.org/10.20302/NC.2024.33.5>.
 20. Орлов, О. О. (2005). *Рідкісні та зникаючі види судинних рослин Житомирської області*. Вид-во «Волинь», ПП «Рута».
 21. Poorter, L., van Der Sande, M. T., Amisshah, L., Bongers, F., Hordijk, I., Kok, J., ... Lohbeck, M. (2024). A comprehensive framework for vegetation succession. *Ecosphere*, 15(4), e4794.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 15.12.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.01.2026
 Дата публікації: 27.02.2026

ФІТОІНДИКАЦІЙНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИНТАКСОНІВ КЛАСУ *CARPINO-FAGETEA SYLVATICAE* ЛІВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

П.В. Калінський, І.В. Гончаренко

*Інститут еволюційної екології Національної академії наук України
(м. Київ, Україна)*

e-mail: kalinskyipavlo@gmail.com; ORCID: 0009-0000-9213-3772

e-mail: goncharenko.ihor@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5239-3270

У статті наведено результати комплексного фітоіндикаційного аналізу 50 синтаксонів класу *Carpino-Fagetea sylvaticae* (27 асоціацій та 23 субасоціацій і варіантів), які формують основу лісової рослинності Лівобережного Лісостепу України. Дослідження спрямовано на виявлення еколого-ценотичних закономірностей диференціації лісових угруповань регіону та кількісну оцінку амплітуд основних абіотичних чинників середовища, що визначають їхню структурну та флористичну специфіку. Методичною основою роботи слугувала фітоіндикаційна методика з використанням екологічних шкал Я.П. Дідуха (2011), яка допомагає здійснити інтегральну оцінку умов місцезростання за реакціями видів-індикаторів. Аналіз виконано за дев'ятьма провідними екологічними показниками: вологістю ґрунту, мінливістю зволоження, кислотністю, загальним сольовим режимом, умістом азоту в ґрунті, тепловим режимом, освітленістю, континентальністю клімату та карбонатністю ґрунту. Для цього використано узагальнені фітоценотичні таблиці з широкого кола літературних джерел, що охоплюють різні геоботанічні округи Лівобережного Лісостепу. У результаті встановлено, що синтаксони класу *Carpino-Fagetea* формуються в межах широкого спектра екологічних умов — від субмезофітних до гігрозомофітних екотонів, із субмікротермним-субмезотермним тепловим режимом, слабо кислими-нейтральними ґрунтами та мезо- до напівевтрофною трофністю. Провідними чинниками еколого-ценотичної диференціації лісових угруповань постають градієнти вологості ґрунту, азотного живлення, кислотності та стабільності зволоження, що тісно пов'язані з положенням екотонів у рельєфі, гідрологічними умовами та типом ґрунтоутворних процесів. Отримані результати дали змогу окреслити екологічні амплітуди синтаксонів класу *Carpino-Fagetea*, уточнити межі їхніх екологічних ніш та поглибити уявлення про еколого-ценотичну організацію лісової рослинності Лівобережного Лісостепу України. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання одержаних даних для фітоіндикаційної оцінки стану лісових екосистем, прогнозування їхньої стійкості до кліматичних змін, а також для обґрунтування заходів зі збереження, відновлення та довготривалого екологічного моніторингу лісової рослинності в умовах зростаючого антропогенного навантаження.

Ключові слова: фітоценози, екологічні амплітуди, едафічні чинники, біорізноманіття, еколого-ценотична оцінка, лісові угруповання.

ВСТУП

Клас *Carpino-Fagetea sylvaticae* об'єднує мезофільні широколистяні та мішані ліси, поширені в помірній зоні Європи та Середземномор'ї [1]. Ці угруповання є зональними для середніх широт, оптимально відповідаючи кліматичним та ґрунтовим умовам із достатнім зволоженням і помірним температурним режимом [2].

Екологічна роль лісів класу *Carpino-Fagetea* є визначальною для стабілізації ландшафтів. Вони регулюють гідрологічний режим, запобігають ерозії ґрунтів та формують специфічний мікроклімат. Завдяки значній біомасі ці екосистеми постають потужним акумулятором вуглецю та осередком біорізноманіття, забезпечуючи умови для існування типових неморальних видів.

Сучасний стан угруповань класу істотно порушений антропогенним впливом. Інтенсивне лісокористування, вирубки, пасовищне навантаження, меліорація та заміна корінних фітоценозів насадженнями інтродукованих або менш вибагливих видів призвели до порушення структури ярусності та зниження видового різноманіття. Ці процеси зумовлюють деградацію природних лісових біогеоценозів і втрату притаманних їм екологічних функцій.

Дослідження синтаксономії та екології *Carpino-Fagetea* має важливе значення для збереження біорізноманіття та адаптації лісового менеджменту до змін клімату, що дає змогу прогнозувати зміщення екотопів та розробляти ефективні стратегії охорони.

Метою дослідження є здійснення фітоіндикаційної характеристики синтаксонів класу *Carpino-Fagetea* Лівобережного Лісостепу України. Дослідження передбачає аналіз їхніх еколого-ценотичних особливостей, а також визначення амплітуди варіацій екологічних чинників, що формують структурну та флористичну специфіку угруповань.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Практичне застосування фітоіндикаційних методів для аналізу природних умов Лівобережного Лісостепу (ЛЛС) бере початок із 1990-х років. Основоположником фітоіндикаційної школи в Україні є Я.П. Дідух [3]. Зокрема, у роботі А.П. Вакала та Я.П. Дідуха [4] здійснено екологічну профільну оцінку лісової рослинності.

Початок 2000-х років відзначився збільшенням кількості робіт та інтенсифікацією досліджень у цьому напрямі. Зокрема, І.В. Гончаренко [2] провів аналіз рослинного покриву Північно-Східного Лісостепу України.

У роботі Т.В. Фіцайло [5], присвяченій синфітоіндикаційній характеристиці лісової рослинності Правобережного Київського Лісостепу, показано, що едафічні чинники відіграють провідну роль у диференціації синтаксонів лісової рослинності.

Сучасні дослідження значно розширили спектр об'єктів та методів, охоплюючи також антропогенно-трансформовані лісові угруповання. Це особливо важливо для Лісостепу, де значні площі займають штучні насадження. Вагомий внесок у вивчення цього питання на сучасному етапі зробили М.А. Бондарук, О.Г. Целіщев та І.Ф. Букша, що у 2018 р. [6] виконали ґрунтовну фітоіндикацію едафічних режимів екотопів лісових екосистем Лівобережного Дніпровського лісостепового округу. Їхні дослідження дали можливість деталізувати розуміння ґрунтових умов під різними типами лісових насаджень. Розвиваючи цей напрям, у 2020 р. колектив авторів зосередився на кліматичних чинниках [7]. Вони здійснили синфітоіндикаційне моделювання кліматопів лісових екосистем, використовуючи дані моніторингу лісів лісостепової частини України, що дало змогу оцінити стійкість насаджень до змін клімату.

Отже, аналіз останніх досліджень свідчить про значний науковий потенціал фітоіндикаційних методів у вивченні лісової рослинності ЛЛС. Водночас наявні праці здебільшого охоплюють окремі локальні території або окремі типи рослинних угруповань, що зумовлює потребу у проведенні комплексного еколого-ценотичного аналізу синтаксонів лісової рослинності регіону.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Характеристика умов регіону досліджень. Лівобережний Лісостеп України становить складне природне утворення, у межах якого поєднуються різноманітні геоморфологічні структури та геоботанічні округи. Формування цієї території зумовлено тривалим впливом тектонічних процесів, денудації та водно-ерозійної діяльності [8].

На рівнинних вододільних ділянках переважають типові чорноземи, тоді як у південній частині трапляються переважно вилугувані чорноземи та темно-сірі лісові ґрунти [9–11].

Клімат ЛЛС належить до помірно континентального типу, вирізняється чіт-

кою сезонністю температурного режиму та кількості опадів. Для нього характерні тепле літо й прохолодна зима, а локальні кліматичні відмінності викликані широтною зональністю, особливостями рельєфу [10; 12].

Матеріали дослідження. Для проведення дослідження було застосовано синоптичні та повні фітоценотичні таблиці описів, опубліковані у працях, що стосуються рослинності широколистяних лісів ЛЛС, зокрема О.М. Байрак [13; 14], І.В. Соломахи та ін. [15], В.Л. Шевчика та О.Д. Полішка [16], І.В. Гончаренка [2; 17], Є.О. Воробйова [18], Л.М. Гомлі [19], В.А. Онищенко [20], Д.А. Давидова [21], О.Ю. Смаглюка, В.А. Соломахи та співавт. [22–24].

Для аналізу з наведеного вище переліку джерел було залучено дані про повний видовий склад та екологічні особливості 50 синтаксонів класу *Carpino-Fagetea*, серед яких 27 належать до рівня асоціацій, а 23 — до рівня субасоціацій і варіантів. В об'єднаному списку видів проаналізованих синтаксонів налічується загалом 3115 видів.

Методика дослідження. На початковому етапі дослідження було агреговано

та уніфіковано дані щодо трапляння видів у межах окремих синтаксонів, а також отримано показники, які переведено у відсотковий формат для забезпечення їх порівнюваності та подальшого використання у підрахунках екологічних показників.

Подальший аналіз здійснювали із застосуванням фітоіндикаційної методики [25]. Ця методика базується на використанні екологічних шкал, які відображають реакцію видів на основні абіотичні чинники середовища: вологість ґрунту (Hd), варіативність зволоження (fH), загальний сольовий режим (Sl), кислотність (Rc), вміст азоту (Nt), термічний режим (Tm) та освітленість угруповань (Lc), показники континентальності клімату (Kn), та вмісту карбонатів у ґрунті (Ca). Загалом — 9 показників, що характеризують основні для рослин екологічні чинники середовища.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Отримані з використанням фітоіндикаційного підходу екологічні показники для 50 синтаксонів лісової рослинності ЛЛС подано в *табл.*

Фітоіндикаційна оцінка синтаксонів класу *Carpino-Fagetea* за результатами провідних екологічних показників

№	Назва синтаксону	Чинники середовища								
		Hd	fH	Rc	Sl	Ca	Nt	Tm	Kn	Lc
1	<i>Aegonychon-Quercetum roboris</i> [21]	10,1	4,8	7,4	5,9	6,2	5,9	7,8	7,3	4,7
2	<i>Melica picta-Quercetum roboris</i> [21]	10,3	4,7	7,2	6,0	5,9	6,0	7,7	7,3	4,5
3	<i>Aceri negundi-Alnetum glutinosae</i> [23]	13,3	5,3	8,0	7,1	6,1	7,3	8,9	8,0	5,7
4	<i>Rubo caesii-Alnetum</i> [14]	12,0	5,1	7,1	6,2	5,4	6,2	7,6	6,8	5,1
5	<i>Ficario-Ulmetum</i> [2]	12,5	5,2	7,6	6,5	6,2	7,1	8,1	7,2	5,0
6	<i>Luzulo-Quercetum</i> subass. <i>dryopteridetosum</i> [2]	11,5	5,0	7,7	6,1	6,4	7,0	7,9	7,1	4,3
7	<i>L.-Q.</i> subass. <i>alliarosum</i> [2]	11,6	5,1	7,6	6,2	6,2	7,2	8,0	7,0	4,5
8	<i>Ficario-Ulmetum</i> [16]	11,9	4,9	7,5	6,6	6,0	6,7	8,4	7,7	5,0
9	<i>F.-U.</i> subass. <i>typicum</i> [21]	11,6	5,2	7,5	6,6	6,0	6,8	8,1	7,5	5,2
10	<i>F.-U.</i> subass. <i>chrysosplenietosum</i> [21]	13,1	5,4	7,5	6,9	6,0	7,1	8,4	8,0	5,4
11	<i>Rubo caesii-Alnetum</i> [19]	13,1	5,5	7,7	6,8	6,1	6,7	8,6	7,4	5,4
12	<i>Melico nutantis-Quercetum roboris</i> [2]	11,4	5,4	7,4	6,3	6,3	6,2	8,1	7,9	5,4

№	Назва синтаксону	Чинники середовища								
		Hd	fH	Rc	Sl	Ca	Nt	Tm	Kn	Lc
13	<i>Ficario-Ulmetum</i> [17]	12,7	5,3	7,6	6,5	5,9	6,8	7,9	7,5	5,4
14	<i>Luzulo-Quercetum</i> subass. <i>dryopteridetosum</i> [17]	12,0	5,1	8,0	6,3	6,6	7,1	8,3	7,5	4,6
15	<i>L.-Q.</i> subass. <i>alliariosum</i> [17]	11,7	5,4	7,7	6,3	6,2	6,9	8,0	7,3	5,0
16	<i>Tulipo biebersteinianae-Carpinetum betuli</i> [22]	11,2	4,9	7,8	6,4	6,5	6,7	8,6	7,6	4,8
17	<i>Galeobdoloni luteae-Carpinetum betuli</i> subass. <i>sambucetosum nigrae</i> [22]	11,2	4,9	7,8	6,3	6,3	6,7	8,4	7,5	4,4
18	<i>G. l.-C. b</i> [13]	11,5	5,0	7,8	6,1	6,3	6,3	8,4	7,5	4,4
19	<i>Carici pilosae-Carpinetum</i> [13]	11,1	5,1	7,8	6,1	6,6	5,9	8,2	7,9	4,6
20	<i>C. p.-C.</i> [15]	11,3	5,1	7,5	6,4	6,4	6,3	8,5	7,7	5,0
21	<i>Galeobdoloni luteae-Carpinetum</i> subass. <i>typicum</i> var. <i>Violae reichenbachianae</i> [15]	11,5	5,3	7,7	6,4	6,5	6,3	8,7	7,8	5,0
22	<i>G. l.-C.</i> [15]	11,6	5,2	7,6	6,3	6,6	6,5	8,5	7,6	4,7
23	<i>Tilio-Carpinetum</i> [16]	11,6	4,9	7,6	6,4	6,4	6,5	8,4	7,7	4,7
24	<i>Galeobdoloni luteae-Carpinetum betuli</i> subass. <i>betuletosum pendulae</i> [20]	11,7	5,1	7,5	6,4	6,2	6,3	8,4	7,7	4,9
25	<i>G. l.-C. b.</i> subass. <i>sambucetosum nigrae</i> [20]	11,0	5,0	7,4	6,2	6,2	6,4	8,4	7,3	4,8
26	<i>G. l.-C. b.</i> subass. <i>typicum</i> [21]	11,6	5,1	7,7	6,4	6,4	6,8	8,4	7,7	4,7
27	<i>G. l.-C. b.</i> subass. <i>betuletosum pendulae</i> [21]	11,8	5,3	7,6	6,4	6,4	6,2	8,5	8,0	4,9
28	<i>G. l.-C. b.</i> subass. <i>melampyretosum nemorosi</i> [21]	11,3	5,0	7,8	6,4	6,6	6,3	8,4	7,8	4,9
29	<i>Galio-Carpinetum</i> subass. <i>poetosum nemoralis</i> [19]	10,0	4,7	7,2	5,9	6,2	5,5	7,7	7,4	4,5
30	<i>G.-C.</i> subass. <i>typicum</i> [19]	11,3	4,9	7,7	6,3	6,5	6,3	8,4	7,7	4,5
31	<i>Convallario-Pinetum</i> [18]	10,0	5,4	6,6	6,0	6,3	4,9	7,7	7,7	5,8
32	<i>Melico-Quercetum</i> [24]	11,1	4,9	7,5	6,3	6,2	6,5	8,2	7,3	4,8
33	<i>Melico nutantis-Quercetum</i> [16]	10,7	5,6	7,2	6,5	6,8	5,4	8,2	8,4	6,2
34	<i>Convallario majalis-Quercetum roboris</i> [16]	11,3	5,4	7,6	6,3	6,8	6,0	8,5	8,1	5,4
35	<i>Pteridio-Quercetum</i> [21]	10,5	5,5	6,1	5,6	5,9	4,5	7,6	7,9	5,7
36	<i>Melico nutantis-Quercetum roboris</i> subass. <i>typicum</i> [21]	10,8	5,6	7,1	6,4	6,5	5,5	7,9	8,0	5,9
37	<i>Stellario holosteaе-Aceretum platanoidis</i> subass. <i>typicum</i> [21]	10,9	4,9	7,4	6,2	6,1	6,4	7,9	7,3	4,7
38	<i>S. h.-A. p.</i> subass. <i>caricetosum pilosae</i> [21]	10,5	4,8	7,4	6,0	6,2	6,0	8,0	7,3	4,6
39	<i>S. h.-A. p.</i> subass. <i>parietosum quadrifoliae</i> [21]	11,3	4,9	7,6	6,3	6,2	6,8	8,2	7,4	4,7
40	<i>S. h.-A. p.</i> [2]	10,6	4,5	7,2	5,6	6,2	6,2	7,5	6,8	4,0
41	<i>S. h.-A. p.</i> [17]	11,4	5,1	7,6	6,2	6,4	6,4	8,0	7,6	4,8

Продовження таблиці

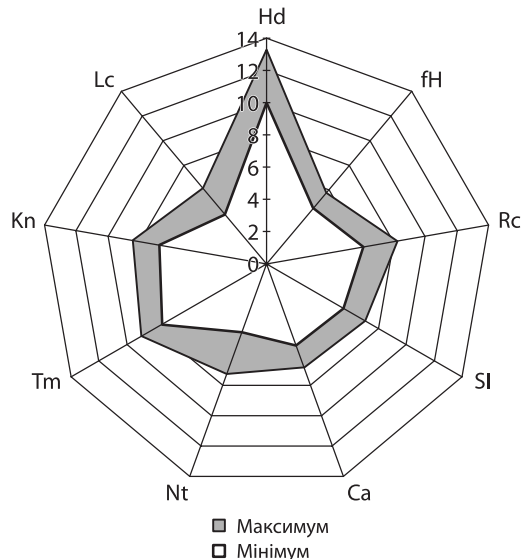
№	Назва синтаксону	Чинники середовища									
		Hd	fH	Rc	Sl	Ca	Nt	Tm	Kn	Lc	
42	<i>S. h.-A. p.</i> [24]	11,5	5,0	7,5	6,3	6,1	6,6	8,2	7,4	4,9	
43	<i>S. h.-A. p. subass. caricetosum pilosae</i> [20]	10,6	4,7	7,5	6,1	6,4	6,0	8,1	7,4	4,7	
44	<i>S. h.-A. p. subass. parietosum quadrifoliae</i> [20]	11,3	5,0	7,7	6,4	6,4	6,6	8,4	7,5	4,7	
45	<i>Aegonychon-Quercetum roboris</i> [13]	11,1	5,0	7,8	6,4	6,7	6,1	8,2	7,8	4,8	
46	<i>Mercuriali perennis-Fraxinetum excelsioris</i> [13]	11,8	5,0	8,1	6,4	6,7	6,7	8,3	7,7	4,8	
47	<i>Stellario holosteae-Aceretum platanoidis</i> [13]	12,0	5,1	8,1	6,4	6,6	6,8	8,3	7,6	4,8	
48	<i>Convallario-Padietum</i> [13]	12,3	5,6	8,0	6,3	6,7	6,8	8,4	7,6	5,2	
49	<i>C.-P. subass. equisetosum hyemali</i> [14]	12,4	5,8	8,3	7,0	6,7	7,2	8,9	8,4	5,6	
50	<i>Pteridio aquilini-Quercetum roboris</i> [13]	11,0	5,5	7,4	6,3	6,4	5,5	8,0	7,9	5,6	
	Min	10,0	4,5	6,1	5,6	5,4	4,5	7,5	6,8	4,0	
	Max	13,3	5,8	8,3	7,1	6,8	7,3	8,9	8,4	6,2	

Примітки: Hd – вологість ґрунту; fH – мінливість зволоження; Rc – кислотність ґрунту; Sl – загальний сольовий режим; Nt – вміст азоту в ґрунті; Tm – тепловий режим; Lc – освітленість; Kn – континентальність клімату; Ca – карбонатність ґрунту.

На рис. показано діапазон між мінімальними та максимальними значеннями кожного з чинників, зафіксованих у синтаксонах із території ЛЛС.

Аналіз екологічних амплітуд досліджених синтаксонів. Вологість ґрунту (Hd). За показником вологості ґрунту лісові угруповання варіюють у межах від субмезофітних (10,0 бала) до гігромезофітних (13,3 бала) умов [25]. Мінімальні значення характерні для асоціацій, поширених переважно на борових терасах та підвищених формах рельєфу з добре дренажними піщаними ґрунтами, зокрема для *Convallario-Pinetum* [18]. Максимальні показники вологості зазначено у заплавах лісах, де спостерігається сезонне перезволоження, зумовлено близьким заляганням ґрунтових вод, що характерно для асоціації *Aceri negundi-Alnetum glutinosae* [23].

Мінливість зволоження (fH). Мінливість зволоження в межах досліджуваної території становить 4,5–5,8 бала, що вказує на помірну або відносно стабільну варіабельність вологості протягом року [25]. Найнижчі показники зафіксовано на ділянках верхніх частин схилів і міжбалкових пла-



Профілі мінімальних та максимальних значень амплітуд синтаксонів класу *Carpino-Fagetea* за даними фітоіндикаційної оцінки

то, де переважають умови рівномірного та стабільного зволоження без істотних гідрологічних коливань. Такі умови характерні для угруповань *Stellario holosteeae-Aceretum platanoidis* [2]. Натомість найвищі значення спостерігаються на підвищеннях заплавл, зокрема в долинах р. Ворскла та Псел, де зволоження має нерівномірний характер через періодичні паводкові затоплення. Подібні умови властиві для *Convallario-Padietum equisetosum hyemali* [14].

Кислотність ґрунту (Rc). Кислотність ґрунту угруповань варіює від 6,1 до 8,3 бала, охоплюючи умови від слабокислих до кислих [25]. Мінімальна кислотність (6,1 бала) характерна для *Pteridio-Quercetum*, що свідчить про формування угруповань у субацидофільних умовах [21]. Такі показники притаманні для бідних, опідзолених супіщаних ґрунтах, тоді як максимальна (8,3 бала) зафіксована для *Convallario-Padietum* у заплавах, де переважають види, толерантні до нейтральних ґрунтів [14].

Загальний сольовий режим (Sl). Загальний сольовий режим досліджених угруповань коливається в межах 5,6–7,1 бала, що відповідає ґрунтам від мезотрофних до напівевтрофних типів [25]. Найнижчі показники (5,6 бала) властиві асоціації *Stellario holosteeae-Aceretum platanoidis*, приуроченій до сірих лісових і дерново-підзолистих ґрунтів, сформованих на вузьких міжбалкових плато та схилах [2]. Найвищі значення (7,1 бала) характерні для угруповань *Aceri negundi-Alnetum glutinosae*, поширених у низинних, періодично підтоплюваних заплавлних лісах, де формуються напівевтрофні ґрунти [23].

Карбонатність ґрунту (Ca). Карбонатність ґрунту перебуває в межах 5,4–6,8 бала, що відповідає гемікарбонатофобним — карбонатофільним умовам [25]. Найнижчі значення цього показника зафіксовано у заплавлних фітоценозах, де формування угруповань відбувається за умов підвищеної вологості. Промивний тип водного режиму сприяє вимиванню карбонатів у глибші шари ґрунту, що характерно, зокрема, для асоціації *Rubro caesii-Alnetum* [14]. Натомість максимальні показники (6,8 ба-

ла) притаманні асоціації *Convallario majalis-Quercetum roboris*, поширеній на сірих лісових ґрунтах із помірним вмістом карбонатів, що забезпечує вищу трофність субстрату [16].

Вміст азоту в ґрунті (Nt). Забезпеченість лісових угруповань азотом у межах Лівобережного Лісостепу варіює в діапазоні від помірної (4,5 бала — гемінітрофіли) до достатньої (7,3 бала — нітрофіли) [25]. Помірна азотна трофність властива угрупованням асоціації *Pteridio-Quercetum*, що формуються на опідзолених супіщаних ґрунтах річкових терас [21]. Такі субстрати характеризуються низьким вмістом гумусу та уповільненими процесами мінералізації органічних решток, що зумовлює дефіцит доступних форм азоту. Вищі показники забезпеченості (7,3 бала) відзначено для асоціації *Aceri negundi-Alnetum glutinosae*, яка поширена на знижених заплавлних ділянках із високим рівнем зволоження та підвищеним вмістом гумусу [23]. За таких умов переважають нітрофільні види, що вказує на активні процеси нагромадження мінеральних сполук азоту в ґрунті.

Тепловий режим (Tm). Чинник терморезиму в лісових угрупованнях Лівобережного Лісостепу охоплює діапазон значень 7,5–8,9 бала, що відповідає умовам від субмікротермних до субмезотермних територій [25]. Мінімальні значення, які характеризують прохолодний мікроклімат, властиві північним схилам і міжбалковим плато, де утворюються угруповання *Stellario holosteeae-Aceretum platanoidis*, притаманні умовам нижчих температур та обмеженого прогрівання ґрунту [2]. У тепліших субмезотермних умовах заплавл і прирічкових терас, навпаки, поширені угруповання *Convallario-Padietum equisetosum hyemali* та *Aceri negundi-Alnetum glutinosae*, для яких характерний підвищений тепловий режим і триваліший вегетаційний період [14; 23].

Континентальність клімату (Kn). За рівнем континентальності клімату досліджені лісові угруповання характеризуються значеннями в межах 6,8–8,4 бала, що відповідає геміокеанічному типу клімату з окремими переходами до субокеанічного та

геміконтинентального [25]. Найвищі показники континентальності (8,4 бала) відзначено для фітоценозів, поширених на підвищених терасах і заплавах річок, зокрема асоціації *Melico nutantis-Quercetum roboris* та *Convallario-Padietum* [14; 16]. Найнижчі значення відзначено в угрупованнях більш вологих, слабоконтинентальних ділянок із помірними сезонними температурними коливаннями, де зберігається підвищена вологість повітря та ґрунту, у фітоценозах *Stellario holosteae-Aceretum platanoidis* та *Rubo caesii-Alnetum* [2; 14].

Освітленість (Lc). Освітленість лісових угруповань Лівобережного Лісостепу варіює в межах від сціофітних до гемісціофітних умов (4,0–6,2 бала) [25]. Мінімальні показники (4,0 бала) характерні для асоціації *Stellario holosteae-Aceretum platanoidis*, які формуються у затінених листяних лісах із низьким рівнем інсоляції [2]. Такі фітоценози переважно зростають у великих лісових масивах, на глибоких схилах і в балкових системах, де спостерігається стабільний мікроклімат та обмежене проникнення світла до підліску.

Максимальні значення освітленості (6,2 бала) зафіксовані в асоціації *Melico nutantis-Quercetum roboris*, що приурочені до відкритих борових терас із частково зімкненим пологом дерев [16]. Тут рівень інсоляції підліску та травостою є підвищеним, що сприяє утворенню гемісціофітних видів із ширшою екологічною амплітудою щодо світла.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного фітоіндикаційного аналізу синтаксонів класу *Carpino-Fagetea sylvaticae* з території ЛЛС нами досліджені екологічні амплітуди синтаксонів, а також особливості едафічних і кліматичних умов, у межах яких формується лісова рослинність дослідженого регіону.

Зокрема, амплітуда показників вологості відображає значну екологічну варіабельність водного режиму в межах лісових угруповань ЛЛС, що зумовлює утворення широкого спектра фітоценозів — від стій-

ких до дефіциту вологи до адаптованих до її помірного надлишку. Досліджені синтаксони характеризуються помірною амплітудою гідроконтрастності, що відображає адаптацію до різного ступеня стабільності водного режиму — від умов рівномірного зволоження до екотопів із короткочасним надлишком вологи. За показником кислотності ґрунту лісові синтаксони ЛЛС демонструють поступовий перехід від кислих супіщаних суборових лісів до нейтральних заплавних деревостанів. Варіювання сольового режиму свідчить про градієнт від мезотрофних до напівевтрофних угруповань, що доводить зв'язок сольового режиму з ґрунтово-гідрологічними умовами й типологічною диференціацією рослинності.

Варіювання показника азоту відображає градієнт трофності лісових угруповань від відносно бідних дубово-соснових до збагачених азотом вологих заплавних вільхово-дубових лісів, що вказує на високу різноманітність мінерального живлення в досліджених угрупованнях. За показником терморезиму лісові синтаксони ЛЛС охоплюють субмікротермний-субмезотермний діапазон, що відображає поступовий перехід від прохолодніших неморальних дібров до тепліших заплавних і вільшнякових угруповань. Варіювання показників освітленості відображає градієнт від сціофітних асоціацій, що розвиваються в умовах затінення та стабільного мікроклімату, до гемісціофітних угруповань, характерних для більш відкритих і добре освітлених ділянок.

Отримані результати дали змогу узагальнити дані про еколого-ценотичні амплітуди досліджених синтаксонів, здійснити їх порівняльну оцінку та уточнити межі екологічної ніші основних типів лісових угруповань, та мають важливе значення у контексті вивчення екологічної специфіки лісів регіону та розроблення ефективних заходів зі збереження лісової рослинності і здійснення екологічного моніторингу лісових екосистем, що особливо важливо в умовах глобальних змін клімату та зростання антропогенного навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фельбаба-Клушина, Л. М. (2019). *Продромус рослинності України: моногр.* Київ: Наукова думка.
2. Гончаренко, І. В. (2003). Аналіз рослинного покриву північно-східного Лісостепу України. *Український фітоценологічний збірник. Сер. А, 1(19)*, 1–23. Київ: Фітосоціоцентр.
3. Дідух, Я. П., & Плюта, П. Г. (1994). *Фітоіндикація екологічних факторів.* Київ: Інститут ботаніки НАН України.
4. Вакал, А. П., & Дідух, Я. П. (1991). Фітоіндикаційна характеристика природних умов околиць міста Суми. *Український ботанічний журнал, 48(5)*, 57–61.
5. Фіцайло, Т. В. (2003). Синфітоіндикаційна характеристика лісової рослинності Правобережного Київського Лісостепу. *Український фітоценологічний збірник, 1*, 74–81.
6. Бондарук, М. А., & Целішев, О. Г. (2018). Фітоіндикація едафічних режимів екотопів лісових екосистем Лівобережно-Дніпровського лісостепового округу України. *Лісівництво і агролісомеліорація, 132*, 94–104. DOI: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.132.2018.94>.
7. Бондарук, М. А., Букша, І. Ф., & Целішев, О. Г. (2020). Синфітоіндикаційне моделювання кліматопів лісових екосистем за даними моніторингу лісів лісостепової частини України. *Лісівництво і агролісомеліорація, 136*, 117–125. DOI: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.136.2020.117>.
8. Маринич, О. М. (Ред.). (1993). *Географічна енциклопедія України: Т. 3. П–Я.* Київ: Українська радянська енциклопедія ім. М. П. Бажана.
9. Маринич, О. М. (Ред.). (1989). *Географічна енциклопедія України: Т. 1. А–Ж.* Київ: Українська радянська енциклопедія ім. М. П. Бажана.
10. Маринич, О. М. (Ред.). (1990). *Географічна енциклопедія України: Т. 2. З–О.* Київ: Українська радянська енциклопедія ім. М. П. Бажана.
11. Канівець, С. В. (2014). Особливості сірих лісових ґрунтів лесових островів Полісся і Лівобережного Лісостепу України. *Ґрунтознавство, 15(3–4)*, 56–63.
12. Руденко, Л. Г., & Патон, Б. Є. (Ред.). (2007). *Національний Атлас України.* Київ: ДНВП «Картографія».
13. Байрак, О. М. (1996). Синтаксономія широколистяних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Український фітоценологічний збірник. Сер. А, 3(3)*, 51–63.
14. Байрак, О. М. (1997). Фітоценотична характеристика заплавних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Український фітоценологічний збірник, 45–51.*
15. Соломаха, І. В., Сенчило, О. О., Колот, О. М., & Войтюк, Б. Ю. (1997). Лісова рослинність Чорнухівщини (Полтавська область). *Український фітоценологічний збірник. Сер. А, 80–88.*
16. Шевчик, В. Л., & Полішко, О. Д. (2000). Синтаксономія рослинності ділянки борової тераси (Ліп'явське лісництво Черкаської області). *Український фітоценологічний збірник, 16(1)*, 67–89.
17. Гончаренко, І. В. (2001). Флористична класифікація лісів лісостепової Сумщини. *Український фітоценологічний збірник, 3–17.*
18. Воробійов, Є. О. (2003). Попередній продромус суходольних лісів та рідколісь природного та штучного походження з переважанням або помітною участю *Pinus sylvestris* L. sl рівнинної частини України. *Рослинність хвойних лісів України, 13–42.*
19. Гомля, Л. М. (2005). Рослинність долини річки Хорол. *Український фітоценологічний збірник, 3–16.*
20. Onyshchenko, V. A. (2009). *Forests of order Fagetalia sylvaticae in Ukraine.* Kyiv: Alterpress.
21. Давидов, Д. А. (2012). *Лісова рослинність Роменсько-Полтавського геоботанічного округу (Україна): синтаксономія, антропогенні зміни та охорона* [Дис. канд. біол. наук, Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного]. Київ: Інститут ботаніки НАН України.
22. Смаглюк, О. Ю., & Соломаха, В. А. (2015). Флористична класифікація мезофільних широколистяних лісів союзу *Carpinion betuli* Issl. em. Oberd. 1953 у басейні нижньої течії річки Сули. *Вісник Черкаського університету. Сер.: Біологічні науки, 19*, 98–109.
23. Solomakha, V., Smoliar, N., & Smagliuk, O. (2016). Floristic classification of the floodplain alder, willow and poplar forests in the basin of the lower Sula (Ukraine). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер.: Біологія, 2*, 33–44.
24. Смаглюк, О. Ю., Смоляр, Н. М., & Соломаха, В. А. (2017). Флористична класифікація мезофільних кленово-липово-дубових лісів у басейні нижньої Сули (Україна). *Вісник Львівського університету. Сер.: Біологія, 75*, 23–34.
25. Didukh, I. P. (2011). *The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication.* Kyiv: Phytosociocentre.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 23.10.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.12.2025
 Дата публікації: 27.02.2026

ПРОЄКТУВАННЯ БАЗИ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ОРГАНІЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

І.С. Кузьменко^{1,2}, А.А. Москаленко², Б.Б. Заячківська²

¹ДУ «Держгрунтохорона» (м. Київ, Україна)

e-mail: nessi_ku@ukr.net; ORCID: 0000-0002-7607-9435

²Національний університет біоресурсів і природокористування України
(м. Київ, Україна)

e-mail: moskalenko_a@nubip.edu.ua; ORCID: 0000-0001-7538-8044

e-mail: b_zayachkivska@nubip.edu.ua; ORCID: 0009-0003-0962-5998

Цифрова трансформація та впровадження геоінформаційних технологій є критично важливими для менеджменту органічного землеробства. Зважаючи на глобальні виклики, як-от зміна клімату, деградація ґрунтів, воєнні дії та потреби сертифікації органічної продукції, актуалізується необхідність у створенні автоматизованої геоінформаційної системи і бази даних земельних ресурсів, придатних до агрохімічних органічної продукції. Об'єктом дослідження є процес інформаційного забезпечення систем органічного землеробства. Предметом дослідження є проєктування бази геопросторових даних як інструменту для систематизації та аналізу інформації про якість ґрунтів. Методологія дослідження базувалася на комплексному підході до збору, структурування та аналізу просторових і атрибутивних даних, а також на розробці концептуальної та функціональної моделей бази геопросторових даних. Підхід передбачає інтеграцію нормативно-правових вимог (зокрема, щодо сертифікації та взаємодії з Держпродспоживслужбою та реєстрами) із даними польових замірів, агрохімічних аналізів та інформацією з державних кадастрів. Отримані результати демонструють розроблену структуровану модель бази геопросторових даних, яка передбачає автоматизовану перевірку заявок суб'єктів господарювання на відповідність відомостям ЄДР, Державного реєстру речових прав і Державного земельного кадастру (ДЗК), інтеграцію інформації про фізико-хімічні характеристики ґрунту, рівень забруднення (важкі метали, пестициди, радіонукліди) та обмеження, спричинені військовими діями й сусідством звичайних землекористувачів, а також функціональні можливості для формування тематичних шарів і карт, візуалізації зон моніторингу динаміки зміни показників у довгостроковій перспективі. Практична значущість роботи полягає у створенні ефективного цифрового інструменту, який підвищує достовірність агроекологічних оцінок, мінімізує вплив людського чинника, сприяє науково обґрунтованому управлінню земельними ресурсами для органічного землеробства та забезпечує прозорість процесу сертифікації для всіх учасників ринку.

Ключові слова: моніторинг ґрунтів, агроекологічна оцінка, ГІС-технології, база геоданих, концептуальна модель, інформаційне забезпечення.

ВСТУП

Продовольча та сільськогосподарська організація Об'єднаних Націй (FAO) на сучасному етапі активно реалізує стратегічну програму дій, спрямовану на адаптацію аграрного сектору до наслідків змін клімату. Ключовим елементом цієї стратегії є трансформація агропродовольчих систем у напрямі інноваційного, переважно

вуглецево-нейтрального та кліматично оптимізованого агровиробництва. Важливою складовою такої трансформації постає кліматично орієнтоване сільське господарство, яке передбачає впровадження сталих практик землекористування, зниження викидів парникових газів і підвищення адаптивного потенціалу аграрних екосистем, що просторово досліджується геоінформаційними технологіями [1].

У сучасних умовах розвитку сільського господарства особливої уваги набуває органічне землеробство як складова сталого агровиробництва, що спрямовано на екологічну безпеку, збереження природних ресурсів і біорізноманіття. Розвиток органічного землеробства є одним із пріоритетних векторів середньострокової стратегії «зеленої трансформації» сільського господарства, яке розглядається як важливий інструмент сталого аграрного розвитку. Органічне виробництво не лише сприяє збереженню природних ресурсів і підвищенню якості продукції, а й має вагомий потенціал у контексті адаптації аграрного сектору до змін клімату. Застосування екологічно безпечних технологій, скорочення викидів парникових газів та підтримка біорізноманіття в межах органічного господарювання здатні значною мірою пом'якшити негативні наслідки кліматичних змін і підвищити стійкість сільськогосподарських систем до зовнішніх екологічних викликів.

Ефективне довгострокове ведення принципів органічного господарювання неможливе без моніторингу стану ґрунтів, який вимагає комплексного підходу до збору, обробки та аналізу великого обсягу просторових і аналітичних даних. Водночас обґрунтоване визначення придатності земель для здійснення органічного виробництва потребує обробки значного масиву різнорідної інформації — від фізико-хімічних властивостей ґрунтів до показників техногенного навантаження. У цьому аспекті важливе значення має впровадження структурованих підходів до зберігання та аналізу даних, зокрема через використання баз геоданих.

Бази геоданих постають ефективним інструментом для накопичення, систематизації та просторового аналізу інформації про стан ґрунтового покриву. Їх використання дає змогу не лише зберігати численні параметри у структурованому форматі, а й забезпечує географічну прив'язку даних, що є критично важливим для ухвалення рішень на локальному та регіональному рівнях. Тому бази геопросторових даних

дають можливість інтегрувати та просто-риво координувати відповідну комплексну інформацію для подальшого її застосування в агроекологічному плануванні.

Мета роботи — проектування бази геопросторових даних для інформаційного забезпечення систем органічного землеробства з урахуванням особливостей воєнного стану в Україні. Дослідження спрямовано на оптимізацію процесів збору, зберігання та аналізу геопросторових даних, із метою підвищення точності оцінки якості ґрунтового покриву і підтримки ухвалення науково обґрунтованих управлінських рішень у сфері органічного агровиробництва.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Європейський Союз активно працює над гармонізацією та оприлюдненням геопросторових даних сільськогосподарських переписів (*Agricultural Census*). Ці експериментальні статистичні дані включають інформацію про органічне землеробство з високою просторовою роздільною здатністю, а саме до 1 км, згідно з Регламентом ЄС 2018/1091 про інтегровану статистику фермерських господарств [2].

У рамках Спільної аграрної політики (CAP) та ENVISION в ЄС розробляються інструменти системи моніторингу для ідентифікації органічних методів господарювання за допомогою даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). У рамках ініціатив, як-от ENVISION, створюються повністю автоматизовані системи для класифікації органічних посівів (наприклад, система «світлофора») на рівні полів. Ці системи безпосередньо підтримують органи сертифікації (*Certification Bodies*, CBs), застосовуючи принцип «розумного відбору проб» (*smart sampling*) для інспекцій. Це є прямим підтвердженням актуальності інтеграції ДЗЗ та геопросторових баз даних для сертифікаційного контролю [3]. Все це зумовлює необхідність дотримання Україною єдиного підходу до збору та картографування даних про органічне виробництво на рівні ЄС.

Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» визначає правові та організаційні засади створення, функціонування та розвитку національної інфраструктури геопросторових даних [4].

Серед іноземних науковців Йоганнес Шустер, Людвіг Хагн, Мартін Міттермаєр, Франц-Ксавер Майдль і Курт-Юрген Хюльсберген [5] досліджували питання інтеграції сенсорних даних та геостатистики для оцінки поживного балансу на органічних полях. Евеліна Сандстрем, Естер Бере, Тамаш Крістин, Петер Х. Вербург [6] продемонстрували, як дані реєстрів сертифікації використовуються для просторового аналізу чинників поширення органічного землеробства.

Питання необхідності та доцільності впровадження інформаційних технологій для моніторингу земель із метою підвищення ефективності їх використання широко висвітлено у наукових працях таких дослідників, як С.І. Бердін, В.В. Медведєв, М.М. Маренич, М.І. Кондратюк, О.П. Копішинська, Ю. Уткін, С.Р. Трускавецький, Т.Ю. Биндич, Т.Ю. Вяткін, К.І. Шерстюк, О.І. Коляда, С.Ю. Булигін, В.І. Зацерковний та ін. [7–12].

У межах сучасних наукових підходів до управління земельними ресурсами в агросекторі В.І. Зацерковним було розроблено функціональну схему аграрної геоінформаційної системи (АгроГІС), яка дає змогу ефективно застосовувати багатомірні та багатокритеріальні моделі для дослідження просторових аспектів землекористування. Запропонована модель дає змогу проводити комплексну оцінку стану земель, моделювати динаміку використання угідь та виявляти потенційні загрози, пов'язані з антропогенним впливом на агроландшафти, що є надзвичайно актуальним у контексті сталого розвитку сільськогосподарських угідь.

У сфері цифрової трансформації аграрного виробництва дедалі повсюдного поширення набувають мобільні додатки, створені спеціально для потреб сільськогосподарських виробників. Розробники

таких програмних рішень пропонують фермерам безкоштовні мобільні застосунки, функціональність яких орієнтована на оптимізацію щоденних виробничих процесів, підвищення ефективності управління фермерськими господарствами та оперативну підтримку прийняття управлінських рішень. Ці мобільні інструменти зазвичай поєднують у собі функції моніторингу агрономічних показників, обліку ресурсів, планування технологічних операцій та аналізу даних, що дає змогу аграріям швидко реагувати на зміну виробничих умов і посилювати загальну продуктивність господарської діяльності.

Хоча існує значна кількість наукових публікацій, присвячених загальним аспектам досліджуваної проблематики, застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС) для моніторингу земель для забезпечення ведення та розвитку органічного землеробства, досліджується значно рідше. Через це актуальність цієї проблеми залишається високою, а її комплексне розв'язання потребує подальших наукових розробок та досліджень.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Матеріали, які проаналізовані в рамках даного дослідження включають ґрунтові обстеження, а саме результати польових замірів та лабораторних аналізів, зокрема, такі агрохімічні показники, як вміст органічної речовини (гумусу), реакція ґрунтового розчину (рН), вміст макро- та мікроелементів, вміст азоту. Використані екологічні обмежувальні показники згідно з діючою Методикою агрохімічної паспортизації: рівень забруднення важкими металами (Pb, Cd, Hg, As), залишки пестицидів (ДДТ, ГХЦГ), радіонукліди (^{137}Cs , ^{90}Sr).

Атрибутивні дані стандартизуються у табличному форматі (.csv, .xlsx), точки відбору проби повинні мати чітку просторову прив'язку.

Дані Державного земельного кадастру (ДЗК) використовуватимуться для отримання геометрії земельних ділянок (меж

полів) суб'єктів господарювання та кадастрових номерів, а Державний реєстр речових прав (ДРРП) залучатиметься для перевірки правостановлювальних документів та права власності/користування на ділянку.

Для реалізації функціональної моделі та проектування бази геопросторових даних було обрано таку систему управління базами даних PostgreSQL з просторовим розширенням PostGIS. Вибір обумовлений його потужними можливостями для зберігання, індексації та аналізу векторних та растрових геопросторових даних, а також його відкритим кодом.

ГІС-програмне забезпечення QGIS (з відкритим кодом) або ArcGIS. Геоінформаційні інструменти здійснюють завантаження та обробку вхідних даних, гарантують виконання просторового аналізу (інтерполяцію, буферизацію, оверлей тощо), створюють тематичні карти і шари для візуалізації.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Органічне землеробство, яке передбачає використання безсинтетичних засобів захисту рослин і добрив, вимагає високого рівня контролю за станом ґрунтів. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні точних, системних та адаптивних методів збору й аналізу інформації про якість ґрунтів. Одним із перспективних підходів у цьому контексті є застосування структурованих моделей даних, що забезпечують інтегровану обробку та інтерпретацію великомасштабної екологічної інформації.

Структурована модель даних — це формалізована система представлення взаємозв'язаних параметрів, яка допомагає організовано накопичувати, обробляти й аналізувати дані з різних джерел: вже накопичених баз геопросторових даних, лабораторних аналізів, геодезичних вишукувань, даних про рельєф, інформацію про природні умови тощо. Така модель є ключовим елементом у створенні цифрового профілю ґрунту, що відображає його фізико-хімічні, біологічні та агрономічні характеристики

в динаміці та моделює умови, в яких вирощується органічна продукція.

У контексті органічного землеробства структуровані моделі дають змогу реалізувати системний моніторинг, орієнтований на виявлення змін родючості, органічного вуглецю, кислотності, вологості, біорізноманіття мікробіоти тощо. Це особливо актуально в умовах обмеженого використання агрохімії, коли підтримання природної рівноваги ґрунтового середовища є пріоритетним завданням. Наприклад, структурована модель може поєднувати в собі дані з агрохімічного аналізу, дані ДЗЗ та метеорологічні спостереження для прогнозування деградаційних процесів або оптимізації сівозмін. Геоінформаційне моделювання на основі багатокритеріального підходу і обмежень дає можливість здійснити зонування сільськогосподарських полів за допустимими нормами та економічною спроможністю до вирощування органічної сільськогосподарської продукції.

Використання таких моделей також сприяє підвищенню ефективності прийняття рішень на рівні аграрних господарств. Інтеграція структурованої інформації в геоінформаційні системи (ГІС) дає можливість візуалізувати просторові закономірності та здійснювати зонування земель за рівнем придатності до органічного обробітку. Крім того, моделі можуть включати історичні дані, що допомагає формувати дослідницькі тренди та виконувати порівняльний аналіз у ретроспективі.

Отже, модель даних у моніторингу ґрунтів постає не лише інструментом для поточного контролю, а й платформою для довгострокового екологічного планування в органічному землеробстві. Її впровадження зумовлює підвищення достовірності агроекологічних оцінок, зменшення ризиків втрати родючості, а також сприяє формуванню сталих виробничих практик. Серцем такої моделі є база геопросторових даних.

Запропонована база геопросторових даних ґрунтується на вимогах чинного законодавства, а саме взаємодію з органами сертифікації. Так, зацікавлені особи можуть стати операторами ринку та виробля-

ти, маркувати і вводити в обіг органічну продукцію лише за наявності сертифіката. Реалізація наміру працювати за стандартами органічного виробництва розпочинається з реєстрації в Державному реєстрі операторів органічного ринку України, який реалізовується через Держпродспоживслужбу. Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 1032 від 21 жовтня 2020 р. «Суб'єкт господарювання, що має намір перейти на органічне виробництво та/або здійснювати обіг органічної продукції, надсилає органу сертифікації поштою чи електронною формою зв'язку заяву довільної форми про проведення сертифікації, підписану уповноваженою особою.

Заява має містити такі відомості:

- повне найменування, адресу місцезнаходження, ідентифікаційний код — для юридичної особи або прізвище, ім'я, по батькові, місце проживання, реєстраційний номер облікової картки платника податків (серію та номер паспорта — для фізичних осіб, які через свої релігійні переконання відмовилися від прийняття реєстраційного номера облікової картки платника податків та офіційно повідомили про це відповідному податковому органу та мають відмітку в паспорті) — для фізичної особи — підприємця;
- адреси всіх потужностей, на яких суб'єкт господарювання планує здійснювати органічне виробництво та/або обіг органічної продукції;
- інформацію про землі, на яких планується провадження такої діяльності: площа угіддя, місце розташування;
- вид діяльності (виробництво у певній галузі органічного виробництва та/або обіг органічної продукції);
- контактну інформацію (номер телефону, поштову адресу, адресу електронної пошти).

Орган сертифікації у строк, що не перевищує десяти робочих днів, перевіряє подану заяву та надсилає суб'єкту господарювання пропозицію укласти договір на проведення сертифікації між органом сертифікації та суб'єктом господарювання, що має намір перейти на органічне вироб-

ництво та/або здійснювати обіг органічної продукції» [13].

У запропонованій моделі бази геопросторових даних передбачена автоматична перевірка поданої заявки суб'єкта господарювання (юридичної особи чи фізичної особи-підприємця) на відповідність поданих даних:

- відомостям Єдиного державного реєстру реєстр юридичних осіб, фізичних осіб-підприємців та громадських формувань через ідентифікаційні дані особи;
- відомостям Державного реєстру речових прав на нерухоме майно через правовстановлювальні документи;
- відомостям Державного земельного кадастру через кадастрові номери земельних ділянок [14–16].

Отже, розгляд заяви не обмежується людським чинником, усувається можливість допущення помилок та процес розгляду і перевірки заявки займає мінімум часу. За результатами перевірки на відповідність усіх необхідних даних, база геопросторових даних може також передбачати функціонал для автоматичного генерування договору та надсилання заявнику для цифрового підписання.

Після підписання договору спеціаліст органу сертифікації проводить планові щорічні та позапланові перевірки оператора. Матеріали перевірок та значення показників пропонуються автоматично прив'язувати до полів (земельних ділянок). Завдяки базі геопросторових даних у спеціаліста формується картографічний план виїзду з прогнозним маршрутом обстежень.

Для накопичення даних і ухвалення рішень уповноваженими органами щодо сертифікації, що засвідчує відповідність процесу виробництва продукції та її обігу вимогам законодавства у сфері органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції впливає низка таких чинників як: обмежувальні норми, суміжні землекористувачі та воєнні дії.

Інтеграція до Європейського Союзу передбачає дотримання єдиних підходів та стандартів, проте в найродючіших ґрунтах України можна знайти: важкі метали (сви-

нець (Pb), кадмій (Cd), ртуть (Hg), миш'як (As); залишки пестицидів ДДТ, гексахлорциклогексан (ГХЦГ), неонікотиніди (імідаклоприд, тіаметоксам); нафтопродукти та поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ); радіонукліди, зокрема цезій-137 (Cs-137), стронцій-90 (Sr-90).

Наслідки воєнних дій. Внаслідок воєнних дій у ґрунт разом із вибуховими засобами, воєнною технікою і різного роду зброєю потрапляють небезпечні речовини високої концентрації. Це питання наразі перебуває в процесі дослідження, оскільки для проведення робіт із забору проб ґрунту потрібен виїзд на земельні ділянки, які зазнали забруднення, проте є безпечними для обстеження фахівцями. Воєнні дії як і наслідки Чорнобильської катастрофи формують концептуальні відмінності підходів до органічного землеробства в Україні та до директив європейської спільноти. Ці чинники зумовлюють необхідність у формуванні зон обмежень у органічному землеробстві.

Суміжні землекористувачі. Суміжні землекористувачі, які застосовують традиційні підходи до землеробства у зв'язку з сусідством з суб'єктами господарювання, які хочуть займатися органічним землеробством безпосередньо впливають через обробіток ґрунту і культур досить на великих відстанях. Органічне землеробство передбачає відсутність застосування штучних засобів захисту ґрунту і рослин. Засоби захисту під час розпилення можуть переноситися з вітром на кілометри. Також системи захисту негативно впливають на бджіл, які необхідні для запилення рослин. Тому добросусідство є важливим чинником.

Агрохімічні обмеження. З метою стимулювання розвитку органічного виробництва в Україні держава здійснює формування відповідної інфраструктури та нормативно-правової бази. Паралельно впроваджуються заходи підтримки виробників органічної продукції, а також реалізуються інформаційно-просвітницькі ініціативи, спрямовані на підвищення обізнаності суспільства щодо переваг органічного виробництва.

Визначення агрофізичних та агрохімічних характеристик родючості ґрунтів, а також рівня їхнього забруднення, становить ключовий етап процедури сертифікації органічного виробництва. Оцінювання проводиться на основі зіставлення фактичних характеристик із еталонними значеннями. Як еталонні використовуються оптимальні показники родючості ґрунтів, визначені відповідно до їхнього типу та гранулометричного складу згідно з чинними нормативними документами. Дослідження ґрунтових зразків виконується відповідно до чинної нормативної бази. Зокрема, вміст гумусу визначається за ДСТУ 4289:2004 «Якість ґрунту. Метод визначання органічної речовини» [17], реакцію ґрунтового розчину (рН) — згідно з ДСТУ 4362:2004 «Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів» [18], вміст азоту — за методикою, описаною у посібнику «Агрохімічний аналіз» [19], а рівень забруднення важкими металами — відповідно до ДСТУ 4944:2008 «Встановлення допустимих концентрацій шкідливих речовин» [20], для оцінювання технологій виробництва органічної продукції використовується система НАССР за алгоритмом, узгодженим із ДСТУ 4161-2003 «Системи управління безпечністю харчових продуктів» [21].

Оцінку придатності ґрунтів для виробництва органічної продукції можна здійснити також на основі використання науково-методичних рекомендацій [22].

На основі накопичених даних формується база геопросторових даних (рис. 1). Завдяки різним критеріям відповідності нормам, створюються тематичні шари станом на певну дату, а також можна здійснювати моніторинг зміни показників, та моделювати прогрес наближення відповідно до вимог для вирощування продукції з маркування Organic Standart.

Структурований аналіз даних за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) і засобів цифрового моніторингу дасть можливість:

- Оптимізувати частоту та обсяг польових вимірювань. Завдяки наявності чіткої структури даних зменшиться потреба

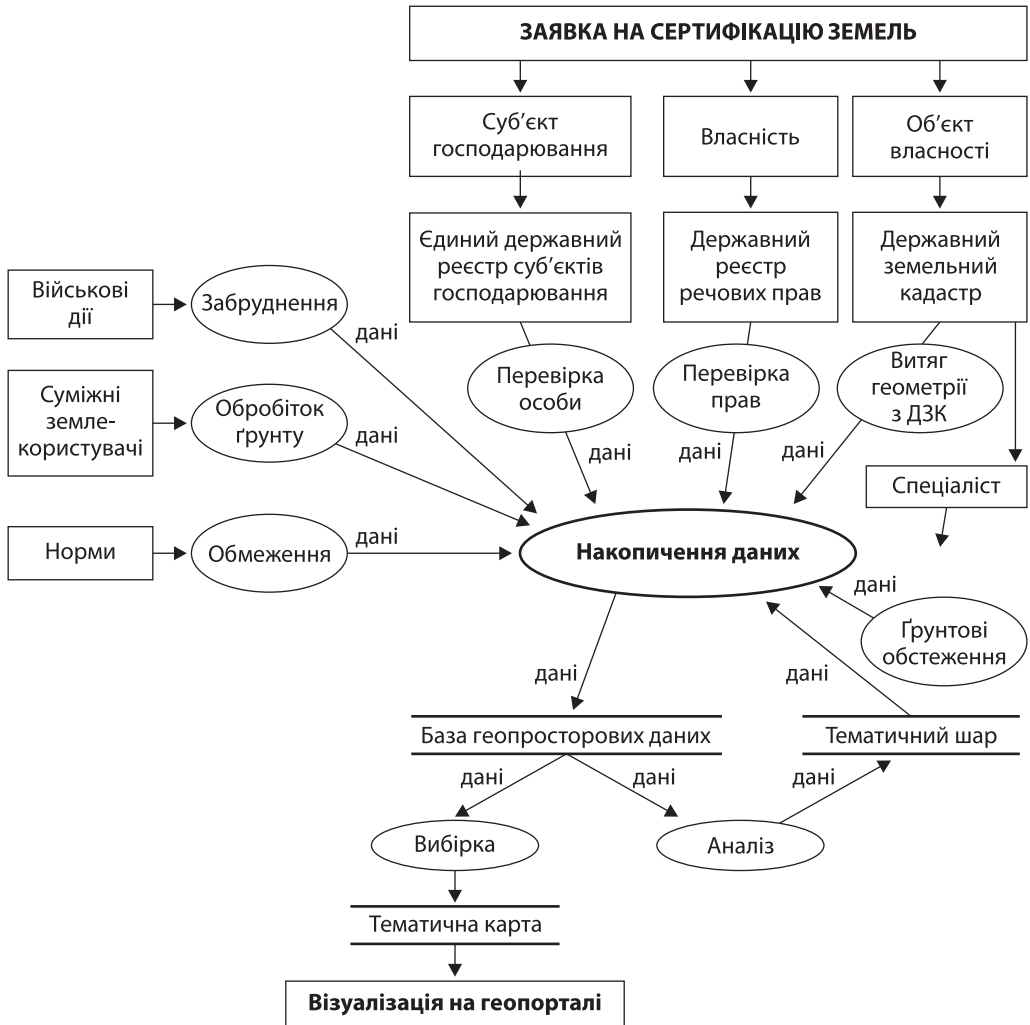


Рис. 1. Функціональна модель інформаційного забезпечення органічного землеробства (Накопичення даних)

в надмірному дублюванні аналізів, що, своєю чергою, знизить затрати ресурсів (часу, зусиль і коштів).

- Підвищити достовірність агроекологічної оцінки стану ґрунтів. Стандартизоване збирання та інтерпретація даних забезпечить мінімізацію людського чинника в аналізі результатів.
- Сприяти прийняттю науково обґрунтованих рішень на рівні господарства. Аграрії отримають можливість швидко

реагувати на виявлені зміни, наприклад, шляхом зміни сівозміни або корекції органічних добрив.

- Забезпечити моніторинг змін ґрунтового стану у довгостроковій перспективі. Це особливо важливо для органічної сертифікації, яка вимагає детальної документації дотримання екологічних стандартів.
- Інтегрувати різномірні джерела даних (польові спостереження, супутникові

знімки та ін.) в єдину цифрову платформу, що дасть змогу отримати комплексну картину стану агроландшафтів.

- Підвищити рівень екологічної відповідальності та сталого використання ґрунтових ресурсів. Завдяки аналізу землекористувачі можуть уникати виснаження родючості.

Функціональною моделлю інформаційного забезпечення органічного землеробства є модель накопичення даних та відображає логіку збору, перевірки, інтеграції та первинної обробки різнорідних даних, необхідних для ухвалення рішень щодо сертифікації земель для органічного виробництва.

Модель складається з трьох основних функціональних блоків, як-от вхідні дані та перевірка, накопичення й інтеграція та аналіз і візуалізація.

Блок 1. Сертифікаційний блок. Включає вхідні дані та перевірку, описує початковий етап надходження та верифікації інформації, що починається із подачі заявки.

Початок збору даних розпочинається із заявки на сертифікацію земель, що надходить від суб'єкта господарювання. Далі відбувається верифікація суб'єкта (перевірка особи), в рамках якої дані про суб'єкта господарювання (ID) перевіряються через Єдиний державний реєстр суб'єктів господарювання (ЄДР). Результат цієї перевірки надходить до вузла Накопичення даних.

Водночас відбувається верифікація земель (перевірка прав та геометрії), котра передбачає перевірку даних про власність через Державний реєстр речових прав (ДРРП). Просторові дані про об'єкт власності (геометрія, межі) отримуються з Державного земельного кадастру (ДЗК). Результати обох перевірок також надходять до вузла Накопичення даних.

Блок 2. Накопичення та інтеграція даних. Центральний вузол Накопичення даних інтегрує інформацію з усіх джерел для формування повноцінної бази.

Дані обмежень як джерел потенційного забруднення отримуються як наслідки військових дій, суміжних землекористувачів

та обробку ґрунту та формують вхідний потік Забруднення.

Існуючі затверджені норми (правові та агрохімічні) формують потік обмеження. А обидва потоки (Забруднення та Обмеження) надходять до вузла Накопичення даних як важливі критерії придатності.

Спеціаліст з держнагляду ініціює ґрунтові обстеження (польові заміри, відбір проб). Результати обстежень (ґрунтові характеристики, вміст речовин) також інтегруються у вузол Накопичення даних.

Інтегровані дані використовуються для аналітичних та прикладних завдань. Накопичені дані є основою для створення бази геопросторових даних.

Запроєктована база даних дає можливість швидкого пошуку даних за критеріями, забезпечує здійснення геопросторового аналізу для підтримки управлінських рішень та тематичного картографування для візуалізації (див. *рис. 1*).

Функціональна модель бази геопросторових даних демонструє, що процес сертифікації органічного землеробства є інтегрованою системою, яка вимагає автоматизованої перевірки юридичних прав, географічних даних, контролю забруднення та моніторингу відповідності нормам, і все це об'єднується в єдину геопросторову базу для подальшого аналізу та візуалізації.

Концептуальна модель бази геопросторових даних (*рис. 2*) організована навколо земельної ділянки та її характеристик, необхідних для оцінки придатності до органічного землеробства та моніторингу. Центральними сутностями, що мають просторову геометрію, є:

- поле (ділянка) — базовий географічний об'єкт, що має код Поля, назва Поля та геометрію. Одне поле може бути поділено на багато елементарних ділянок (зв'язок 1:N). Одне поле має одне цільове призначення (зв'язок 1:1);
- елементарна ділянка — найменша одиниця просторового аналізу, що має код Елементарної Ділянки та геометрію. Одна Елементарна Ділянка має один Ґрунт (за типом) та один Схил.

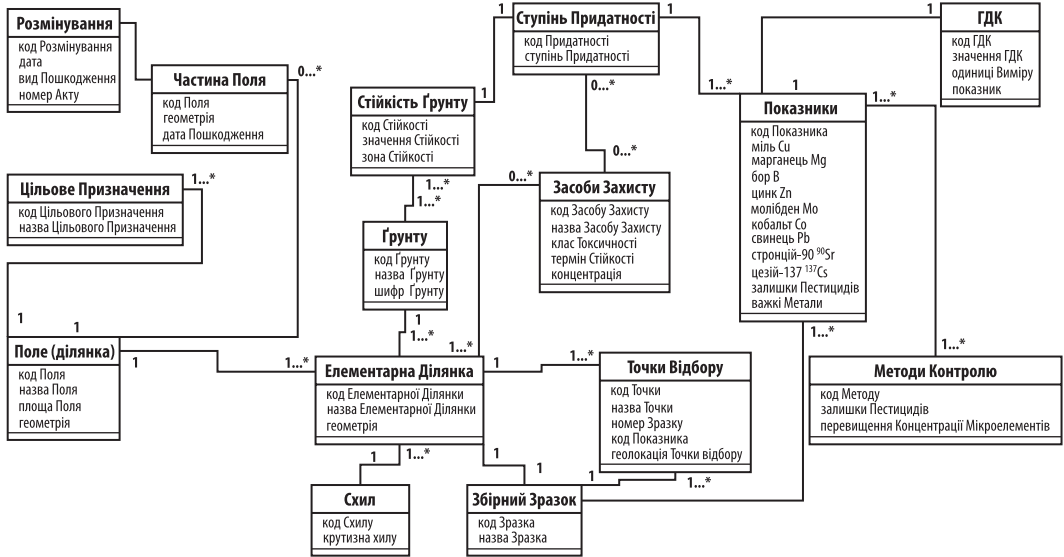


Рис. 2. Концептуальна модель бази геопросторових даних для інформаційного забезпечення органічного землеробства

Клас Ґрунт описує тип ґрунту (код Ґрунту, назва Ґрунту). Клас Схил – фізична характеристика, що впливає на ерозію (код Схилу, крутизна).

Клас Частина Поля використовується для фіксації воєнного впливу на частини полів, має зв'язок 1:N до класу Розмінування (що фіксує статус небезпечності).

Клас Стійкість Ґрунту оцінює стійкість ґрунту до різних чинників (код Стійкості, значення Стійкості). Має прямий зв'язок з класом Ґрунт та Класом Елементарна Ділянка.

Клас Точки Відбору містить дані про геопросторовий об'єкт (точка), що фіксує місце забору зразка (назва Точки, номер Зразку). Одна Елементарна Ділянка може містити багато Точок Відбору. Одна Точка Відбору пов'язана з багатьма Збірними Зразками.

Клас Показники – атрибутивна сутність, що містить результати лабораторних аналізів, критично важливих для органічного землеробства (наприклад, вміст важких металів – Pb, Cd, Hg, залишки ¹³⁷Cs, ⁹⁰S). Один Збірний Зразок пов'язаний із багатьма Показниками.

Клас Методики Контролю фіксує відповідність нормативній базі, що застосовувалась для аналізу (назва Методики, перелік Вимірюваних Елементів).

Клас Засоби Захисту описує дозволені (або не дозволені) засоби, що використовувались (назва Засобу Захисту, концентрація).

Клас ГДК (Гранично Допустимі Концентрації) – атрибутивна сутність, що містить референтні значення (значення ГДК, санкціоновані ГДК) для порівняння з фактичними Показниками.

Результатом аналізу інтегрованих даних є клас Ступінь Придатності. Це ключовий вихідний клас, що визначає, чи підходить ділянка для органічного виробництва (код Ступеня Придатності, назва Ступеня Придатності).

Одна Елементарна Ділянка може мати багато Ступенів Придатності (залежно від критеріїв чи року). Ступінь Придатності агрегує дані з класу Показники та Засоби Захисту (через зв'язки).

Концептуальна модель демонструє, що просторова ідентифікація починається з поля і деталізується до елементарної ділян-

ки. Оцінка придатності (ступінь придатності) є комплексним результатом, що залежить від фізичних властивостей (грунт, схил), результатів моніторингу (показники через точки відбору) та нормативних обмежень (ГДК, методики контролю).

Чіткі зв'язки між класом Точка Відбору та класом Показники забезпечують можливість просторової візуалізації результатів аналізу.

Ця концептуальна модель є міцною основою для розробки логічної моделі (таблиць) в обраній СУБД (наприклад, PostgreSQL/PostGIS).

Для зручної взаємодії з усіма учасниками процесу органічного землеробства з базою геопросторових даних можна формувати шари візуалізації у вигляді тематичних карт, чи інтерактивних геопорталів.

ВИСНОВКИ

Розроблено концептуальну модель (ER-схему) бази геопросторових даних, орієнтовану на інтеграцію ключових показників якості ґрунтів та вимог законодавства у сфері органічного землеробства. Модель охоплює параметри агрохімічного складу, фізичних властивостей та екологічної придатності земельних ділянок, включаючи рівень забруднення важкими металами, радіонуклідами та залишками пестицидів.

Обґрунтовано доцільність застосування структурованої моделі даних порівняно з традиційними методами агрохімічного моніторингу. Запропонована модель забезпечує систематизацію, просторову прив'язку та подальшу обробку різномірної інформації (даних ДЗК, ДРП, лабораторних аналізів та моніторингу суміжних землекористувачів).

Визначено ключові чинники просторових обмежень, що впливають на органічну сертифікацію в українських реаліях, включаючи вплив воєнних дій та сусідства з ділянками, де застосовуються синтетичні засоби захисту.

Рекомендована модель бази геопросторових даних забезпечує автоматизацію процесу сертифікації за рахунок інтеграції з державними реєстрами (ЄДР, ДЗК, ДРП), що дає змогу здійснювати автоматичну верифікацію суб'єктів господарювання та прав на землю, мінімізуючи людський чинник та прискорюючи розгляд заявок.

Модель є ефективним інструментом підтримки ухвалення рішень на рівні аграрних господарств та органів сертифікації. Вона дає можливість формувати аналітичні звіти у реальному часі, виконувати зонування земель за рівнем придатності та гарантувати моніторинг змін ґрунтового стану у довгостроковій перспективі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Прес-служба IFC. (2021, 21 квітня). *Сучасні сільськогосподарські практики допомагають фермерам запобігти зміні клімату*. Agroexpert. URL: <https://agroexpert.ua/19766-2/>.
2. Geospatial data from agricultural census — Experimental statistics. Eurostat — European Commission (22.11.2025). URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/experimental-statistics/geospatial-data-agricultural-census>.
3. Identification of organic farming practices. EU CAP Network — European Union (22.11.2025). URL: https://eu-cap-network.ec.europa.eu/identification-organic-farming-practices_en.
4. Про національну інфраструктуру геопросторових даних. Закон України № 37, ст. 277. (2020). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>.
5. Schuster, J., Hagn, L., Mittermayer, M., Maidl, F.-X., & Hülsbergen, K.-J. (2023). Using Remote and Proximal Sensing in Organic Agriculture to Assess Yield and Environmental Performance. *Agropony*, 13(7), 1868. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/7/1868>.
6. Sandström, E., Boere, E., Krisztin, T., & Verburg, P. H. (2025). *Enabling and constraining factors for organic agriculture in Europe: a spatial analysis*. URL: <https://research.vu.nl/en/publications/enabling-and-constraining-factors-for-organic-agriculture-in-euro/>.
7. Бердін, С. І. (2016). *Інформаційні технології в агрономії: курс лекцій*. Суми: Сумський національний аграрний університет.
8. Медведєв, В. В. (2015). Земельна реформа і родючість ґрунту. *Вісник аграрної науки*, 93(5), 73–79. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201505-17>.
9. Маренич, М. М., Кондратюк, М. І., Копішинська, О. П., & Уткін, Ю. В. (2017). *Інформаційні технології в агрономії: навч. посібн.* Харків: Фінарт.
10. Трускавецький, С. Р., Биндич, Т. Ю., Вяткін, К. І., Шерстюк, О. І., & Коляда, Л. П. (2017). *Концепція створення інформаційної системи ґрунтоохоронного*

- моніторингу методами дистанційного зондування. Київ: Аграрна наука.
11. Булигін, С. Ю. (2015). Якість земель як основа контролю землекористування. *Агроекологічний журнал*, 1, 36–46. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2015.272152>.
 12. Зацерковний, В. І. (2015). Застосування геоінформаційних систем у задачах ефективного землекористування. *Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Сер.: Техногенна безпека. Радіобіологія* (Т. 261, Вип. 249, с. 14–21). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchdub_2015_261_249_4.
 13. Про затвердження Порядку сертифікації органічного виробництва та/або обігу органічної продукції та внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 23 жовтня 2019 р. № 970. Постанова Кабінету Міністрів України № 1032. (2020). (Україна). URL: <https://www.kmu.gov.ua/npras/pro-zatverdzhennya-poryadku-sertifikaciyi-organichnogo-virobnictva-ta-obo-bigu-organichnoyi-produkciyi-ta-vnesennya-zmin-do-postanovi-kabinetu-ministriv-ukrayini-vid-23-zhovtnya-2019-r-970-10>.
 14. Міністерство юстиції України. (2025). Єдиний державний реєстр юридичних осіб, фізичних осіб-підприємців та громадських формувань. URL: <https://usr.minjust.gov.ua/content/free-search>
 15. Державне підприємство «Національні інформаційні системи». (2025). Державний реєстр речових прав на нерухоме майно. URL: <https://nais.gov.ua/p/derjavnyi-reestr-rechovih-prav-na-neruhome-maينو>
 16. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. (2021). Публічна кадастрова карта. URL: <https://map.land.gov.ua/>.
 17. ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначення органічної речовини. (2005). [Чинний від 2005-07-01]. Київ: Державний стандарт України.
 18. ДСТУ 4362:2004. Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів. (2006). [Чинний від 2006-01-01]. Київ: Державний стандарт України.
 19. Городній, М. М. (Ред.). (2005). *Агрохімічний аналіз: підруч.* Київ: Арістей.
 20. Макаренко, Н. А. (Ред.) (2013). *Оцінка придатності ґрунтів для виробництва органічної продукції рослинництва: науково-методичні рекомендації.* Київ: НУБіП України.
 21. ДСТУ 4161-2003. Системи управління безпечністю харчових продуктів. Вимоги. (2003). [Чинний від 2003-07-01]. Київ: Державний стандарт України.
 22. ДСТУ 4944:2008. Агрохімікати. Встановлення допустимих концентрацій шкідливих речовин. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 26.10.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.12.2025
Дата публікації: 27.02.2026

ЗАСТОСУВАННЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ У ЛІСОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ

О.А. Стригіна, В.О. Дирда, В.А. Непочатенко,
С.В. Пенькова, Н.В. Комарова

Білоцерківський національний аграрний університет (м. Біла Церква, Україна)

e-mail: oksana9269@ukr.net; ORCID: 0009-0007-6670-726X

e-mail: viktoryd5706@gmail.com; ORCID: 0009-0005-4667-8540

e-mail: Victor Nepochatenko; ORCID: 0000-0001-6798-7880

e-mail: svitlana1986r@ukr.net; ORCID: 0000-0001-6256-3122

e-mail: komarova_nv@ukr.net; ORCID: 0000-0002-9347-455X

У статті подано ґрунтовний огляд сучасних підходів до застосування фізико-математичних моделей у сфері лісового господарства, що є важливим інструментом для наукового аналізу та практичного управління лісовими екосистемами. Розглянуто ключові напрями використання моделей, зокрема для дослідження росту, розвитку та структури лісових насаджень, прогнозування змін у складі та обсягах лісових ресурсів, а також для оцінювання довгострокового впливу кліматичних чинників на стабільність лісових екосистем. Значну увагу приділено моделюванню природних загроз, як-от лісові пожежі, ерозійні процеси та деградація ґрунтів, що мають критичне значення для забезпечення екологічної безпеки. У статті здійснено класифікацію фізико-математичних моделей за типами, рівнями складності та сферами застосування. Проаналізовано їх переваги, зокрема здатність до точного відтворення природних процесів, а також обмеження, пов'язані з необхідністю якісних вхідних даних і складністю адаптації до конкретних умов. Окремо розглянуто можливості інтеграції моделей із геоінформаційними системами (ГІС) та методами дистанційного зондування Землі, що відкриває нові перспективи для просторового аналізу та моніторингу лісових територій. Узагальнено результати актуальних наукових досліджень, які підтверджують ефективність математичного моделювання для підвищення точності екологічних прогнозів, планування лісогосподарських заходів і прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Зроблено висновок про необхідність розвитку міждисциплінарних підходів, активного впровадження цифрових технологій та посилення науково-практичної співпраці для забезпечення сталого управління лісовими екосистемами в умовах глобальних змін. Акцентовано увагу на впровадженні автоматизованих систем управління, що інтегрують різні технологічні рішення для забезпечення безперервного моніторингу лісів, що передбачає контроль за вирубкою, боротьбу з лісовими пожежами та збереження біорізноманіття. Визначено, що стійке лісове господарство потребує глибокої інтеграції екології, кліматології, генетики, інформаційних технологій і соціальних наук. Використання цих технологій допомагає ефективно моніторити великі та важкодоступні лісові території, забезпечуючи точні дані про стан лісів, виявлення змін у вегетації та ранніх ознак екологічних стресів. Це сприяє своєчасному реагуванню на екологічні зміни й мінімізації негативного впливу на лісові екосистеми.

Ключові слова: оптимізація лісочористування, моделювання мікроклімату лісу, евапотранспірація, моделювання екосистем, конвекція, теплопровідність, геоінформаційні системи, прогнозування, моніторинг, дистанційне зондування Землі.

ВСТУП

Лісове господарство — це комплексна галузь, яка охоплює не лише біологічні та екологічні аспекти, а й активно використовує фізико-математичні методи для про-

гнозування, оптимізації та оцінки стану лісових екосистем. Фізичні явища, як-от передача тепла, вологість, вітрові навантаження та світловий режим у лісі, істотно впливають на розвиток лісів. Їх моделювання за допомогою математичних рівнянь дає можливість створювати точні цифрові

інструменти для управління лісами. Одними з найбільш застосовуваних для аналітики в аграрному секторі економіки є клас лінійних оптимізаційних моделей. Традиційно, у контексті таких моделей розглядаються завдання максимізації прибутку або мінімізації можливих витрат. Істотними перевагами застосування даного класу економіко-математичних моделей є їх універсальність, відносна простота реалізації, відсутність потреби у використанні потужної матеріально-технічної бази. Важливим недоліком цього підходу є обмеженість отриманих результатів та відносно високий ризик неадекватності моделі внаслідок застосування різноманітних параметрів [1].

Метою даної оглядової статті є систематизація та аналіз сучасних підходів до застосування фізико-математичних моделей у лісовому господарстві, визначення їх переваг, обмежень і напрямів подальшого розвитку. Особливу увагу приділити міждисциплінарним аспектам моделювання та інтеграції фізико-математичних методів із сучасними цифровими технологіями управління лісовими ресурсами.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Лісове господарство є однією з ключових галузей природокористування, яка відіграє важливу роль у забезпеченні екологічної стабільності, збереженні біорізноманіття та формуванні сталого розвитку територій. У сучасних умовах зростаючого антропогенного навантаження, кліматичних змін і необхідності раціонального використання природних ресурсів виникає потреба у впровадженні науково обґрунтованих методів управління лісовими екосистемами. Т.П. Лозінська зі співавт. [2] розглянули вплив новітніх технологій на підвищення ефективності лісогосподарської діяльності та покращання стану лісових екосистем, а також ключове значення у сталому розвитку лісів. Окреслено важливість стійкого ведення лісового господарства в умовах зміни клімату, зосереджуючись на необхідності інтеграції сучасних технологій для ефективного управління

лісовими ресурсами. Основну увагу приділено використанню дистанційного зондування та геоінформаційних систем (ГІС), які дають можливість моніторити стан лісів і виявляти ранні ознаки стресу в лісових екосистемах. Ці технології сприяють своєчасному реагуванню на екологічні зміни, зменшуючи негативні впливи на лісове господарство. Додатково розглянуто методи селекції та використання деревних видів, адаптованих до змінюваних кліматичних умов, що підвищують стійкість лісових насаджень до майбутніх змін клімату. Одним із найефективніших інструментів для цього є застосування фізико-математичних моделей, що дають змогу формалізувати складні природні процеси, описати їх кількісно та здійснювати прогнозування на різних просторово-часових рівнях. В.А. Свинчук та ін. розглянули математичні моделі об'єму деревних стовбурів основних лісоутворювальних порід України [3].

Фізико-математичне моделювання у лісовому господарстві охоплює широкий спектр завдань — від оцінки росту деревостанів і динаміки запасів деревини до аналізу впливу кліматичних чинників, прогнозування лісових пожеж. Т.П. Лозінська зі співавт. [4; 5] вказали на своєчасний моніторинг і виявлення пожеж за допомогою сучасних технологій, що дають змогу швидко виявляти загоряння та оцінювати ситуацію. Важливим є використання супутникових даних для фіксації гарячих точок і аналізу масштабу пожеж та систем відеоспостереження, використання безпілотників для патрулювання великих територій і виявлення пожеж у важкодоступних місцях та прогнозування пожежо-небезпечних умов (температура, вологість, вітер) для визначення зон ризику. Розглянуто питання оперативного реагування на виникнення лісових пожеж та вчасного їх гасіння, як ручного, так із залученням технологій. Також було розроблено стратегію для збереження біорізноманіття лісів через ідентифікацію ключових видів, вивчення впливу антропогенних чинників та розробку природоохоронних заходів. Очікувані результати включають підвищення збере-

ження видів, зменшення негативного впливу антропогенних чинників, відновлення лісових ділянок та залучення місцевих громад до природоохоронних заходів. Застосування таких моделей сприяє оптимізації лісокористування, плануванню відновлювальних робіт та підвищенню ефективності моніторингу стану лісів [4; 5].

Математичне моделювання вже давно є одним із провідних напрямів у лісовій науці, однак саме стрімкий розвиток обчислювальної техніки та прикладних математичних методів у другій половині ХХ – початку ХХІ ст. спричинив істотне зростання інтересу до моделювання процесів у лісових екосистемах. У таких країнах, як США й Канада, моделювання давно інтегроване у систему управління лісами є невід’ємним інструментом прогнозування динаміки деревостанів, оцінювання продуктивності та планування лісогосподарських заходів. Н.Е. Burkhardt та М. Томé [6] досліджували моделювання росту лісу на основі функціонально-структурного моделювання та його потенціалу для застосування в лісовому господарстві. Модель GreenLab використовується для цієї мети завдяки її обчислювальній продуктивності, можливості калібрування на реальних рослинах та її поширенню на рівень насаджень. Н. Pretzsch [7] крони дерев моделює на основі видових функцій (розрізняючи освітлені сонцем та тіньові частини крони), тоді як стовбури дерев моделюються відповідно до вдосконаленої функції Крау Клауса фон Гадова (ця функція добре узгоджується з теоретичною формою стовбура: нижня частина як усічений неолід, середня частина як усічений параболоїд, а верхня частина як конус).

О.М. Адамовський [8] розглянув теорію та практику сталого лісокористування: поняття і принципи, сутність поняття «сталі екосистеми», системний підхід до менеджменту екосистем, еколого-економічну ефективність багатопільового використання лісових ресурсів, урахування чинника часу і невизначеності в процесі оцінювання послуг лісових екосистем, еколого-економічні особливості лісокористування

у гірських районах Карпат. За розгляду методів оптимізації комплексного лісокористування досліджено об’єкти та критерії оптимізації лісокористування, роль економіко-математичного моделювання в оптимізації лісокористування, економічну оцінку лісових ресурсів, методи багатокритеріальної оптимізації, принципи лісового менеджменту, чинники впливу на еколого-економічну ефективність лісокористування, функції потенціалу лісових ресурсів, оптимізацію лісокористування на основі вибору альтернативних варіантів, інтегральний еколого-економічний ефект багатопільового лісокористування. Прикладні аспекти оптимізації лісокористування розкриваються в оптимізації обороту рубки на основі вибору альтернативних варіантів, розрахунку еколого-економічної ефективності лісокористування в гірських умовах Карпат, застосуванні методу Фаустмана для еколого-економічної оцінки лісокористування, еколого-економічної оцінки заходів щодо покращання стану зелених насаджень міст.

Лісові пожежі можуть призводити до серйозних змін у структурі та функціонуванні лісових екосистем, включаючи порушення сталого природного балансу, зміну породного складу та деградацію біорізноманіття. У таких умовах необхідне впровадження ефективних заходів із попередження та моніторингу пожежної небезпеки, зокрема оцінки природних і антропогенних чинників їх виникнення, класифікації територій за рівнем ризику та визначення пріоритетних зон для лісозахисних заходів.

S. Shevchuk та V. Chuvpylo [9] розглядають важливу складову системи моніторингу – це застосування методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій. Використання супутникових даних дає змогу оперативно виявляти осередки займання, оцінювати масштаби пожежі та її вплив на лісові масиви. Це забезпечує науково обґрунтований підхід до аналізу лісових пожеж, сприяє ефективному реагуванню на надзвичайні ситуації та формуванню стратегії відновлення постраждалих територій.

В. Зацерковний із співавт. [10] для дослідження лісових територіальних комплексів дедалі більше отримують від дистанційних методів збору та реєстрації інформації з подальшою обробкою отриманих даних. Цьому значною мірою сприяє запуск серії природоресурсних супутників Землі з апаратурою зондування підстилаючої поверхні у видимому, інфрачервоному й радіохвильовому діапазонах електромагнітного випромінювання малого, середнього та високого розширення.

В.В. Миронюк [11] використовує дані ДЗЗ для потреб лісового господарства за такими напрямками: контроль знеліснення, інвентаризація лісу, виявлення значних ушкоджень лісових масивів, моніторингу лісових пожеж. А О.В. Барабаш і О.І. Бандурка [12] розглянули моделювання лісових пожеж на основі прогностичної моделі Байеса та геоінформаційних технологій. Метою моніторингу лісових пожеж є: оцінка пожежної небезпеки; спостереження за динамікою поширення та розвитку пожеж; визначення площі уражень і стеження за післяпожежною динамікою. Технологія моніторингу лісових пожеж передбачає виконання таких етапів: пошук джерел загоряння; виявлення та ідентифікація лісових пожеж, що виникають; розпізнавання й діагностика лісових пожеж; прогнозування їх поширення та розвитку; вибір і прийняття оптимального управлінського рішення щодо гасіння пожеж; оцінка та прогнозування наслідків лісових пожеж.

Модель 3-PG (Фізіологічні процеси, що прогнозують ріст) була розроблена Ландсбергом та Варінгом (1997). Вона створена для подолання розриву між традиційними моделями росту та врожайності, що базуються на вимірюваннях, та моделями вуглецевого балансу, що ґрунтуються на процесах. Вихідні змінні, які вона створює, становлять інтерес та є актуальними для лісових менеджерів. 3-PG розраховує променисту енергію, що поглинається лісовими пологами, та перетворює її на виробництво біомаси. Ефективність перетворення випромінювання змінюється впливом харчування, ґрунтової посухи (модель включає

безперервний розрахунок водного балансу), дефіциту тиску атмосферної пари та віку насадження. 3-PG можна використовувати для оцінки потенціалу ділянки та аналізу ймовірного впливу різних умов вирощування або управлінських дій, як-от проріджування або удобрення. Він має значний потенціал як інструмент для оцінки поглинання вуглецю лісами та плантаціями і зарекомендував себе як цінний навчальний інструмент [13].

Тому, у сучасних умовах перед лісовою наукою України постає важливе завдання – систематизувати міжнародний досвід застосування математичного моделювання та інтегрувати його у вітчизняні дослідницькі й управлінські процеси, що дасть можливість підвищити ефективність прогнозування, планування та охорони лісових екосистем.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

1. Моделювання мікроклімату лісу. Однією з ключових фізичних завдань у лісовому господарстві є моделювання мікроклімату лісових насаджень. Важливими змінними тут є температура повітря і ґрунту, вологість, сонячна радіація, тепло- та масообмінні процеси.

Для моделювання використовуються рівняння теплопровідності, рівняння Нав'є-Стокса (для опису повітряних потоків), а також моделі радіаційного балансу:

$$\partial T / \partial t = \alpha \nabla^2 T + Q, \quad (1)$$

де T – температура; α – коефіцієнт теплопровідності, Q – джерело тепла (наприклад, сонячне випромінювання).

Такі моделі дають змогу прогнозувати зміни кліматичних умов у лісі та їхній вплив на ріст дерев.

Приклад. Модель Penman-Monteith для розрахунку евапотранспірації (випаровування з поверхні ґрунту та листя) – важливий компонент водного балансу лісу.

$$ET = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}, \quad (2)$$

де ET — евапотранспірація (мм/добу); Rn — чиста радіація ($Вт/м^2$); G — тепловий потік у ґрунт; Δ — нахил кривої насичення пари; T — психрометрична константа; u_2 — швидкість вітру (м/с); $e_s - e_a$ — дефіцит вологості повітря.

Цю модель активно використовують в агролісівництві для планування поливу.

Розглянемо приклад застосування моделювання мікроклімату смерекових лісів Українських Карпат для оцінки стійкості до всихання. У Карпатах науковці та лісівники використовують моделі мікроклімату, щоб оцінити, як температура повітря, вологість, сонячна радіація та швидкість вітру змінюються під пологом лісу на різних висотах і експозиціях схилів. Для цього поєднують дані метеостанцій, лісових датчиків температури й вологості ґрунту, цифрові моделі рельєфу та інформацію про зімкнутість крон. На основі цих даних будують просторові моделі, які показують, де в лісі виникають зони підвищеного теплового та водного стресу для ялини європейської.

Результати моделювання застосовують для прогнозування ризику всихання та кородних спалахів, а також для планування вибіркових рубок і зміни породного складу. Практичний ефект полягає в тому, що лісгоспи можуть зберігати прохолодніші та вологіші мікроділянки, залишаючи захисні групи дерев і зменшуючи суцільні вирубки.

2. Фізика росту дерев та моделі біомаси. Для оцінки росту дерев використовуються моделі акумуляції біомаси, які базуються на фізичних законах фотосинтезу та транспірації. Світловий режим, розподіл сонячного випромінювання в кроні, ефективність використання світла описуються через модель Монте-Карло для розсіювання світла та модель фотосинтетично активної радіації (PAR).

Математично приріст біомаси можна описати як:

$$dB/dt = Pn - R, \quad (3)$$

де B — біомаса; Pn — чиста продукція фотосинтезу; R — витрати на дихання.

Приклад. Модель 3-PG (Physiological Principles Predicting Growth).

Це процесно-орієнтована модель росту дерев, що враховує фотосинтез, температуру, вологість ґрунту, щільність насадження. Ключове рівняння моделі:

$$NPP = f_{env} \cdot \epsilon \cdot APAR, \quad (4)$$

де NPP — чиста первинна продукція (т/га); ϵ — ефективність використання PAR (photosynthetically active radiation); $APAR$ — абсорбована PAR; f_{env} — модифікатори навколишнього середовища (температура, CO_2 , вода).

Застосування: прогноз приросту лісу у відповідь на кліматичні зміни.

3. Моделі поширення вогню в лісі. Фізичне моделювання пожежі в лісі базується на теплопереносі, масообміні та хімічних реакціях горіння. Основні типи моделей: емпіричні — ґрунтуються на статистичних даних та фізико-математичні — враховують перенесення тепла (конвекція, теплопровідність, радіація).

Один із прикладів — модель Роттерама:

$$R = I_R / (\rho_b \cdot \epsilon \cdot Q_{ig}), \quad (5)$$

де R — швидкість фронту пожежі; I_R — інтенсивність тепловиділення, ρ_b — щільність пального; ϵ — ефективність поглинання; Q_{ig} — теплота запалювання.

Приклад. Модель FARSITE (Fire Area Simulator).

FARSITE — широко застосовується у США для прогнозу розповсюдження пожеж у реальному часі. Вона поєднує фізику теплопередачі, вітру та горіння.

Основи: модель розраховує еліптичне розширення фронту вогню з урахуванням рельєфу, вологості та пального.

В основі лежить розширення моделі Роттерама:

$$R = R_0 + \varphi_w + \varphi_s, \quad (6)$$

де R — швидкість поширення пожежі; R_0 — базова швидкість; φ_w , φ_s — поправки на вітер і нахил місцевості.

Такі моделі використовуються у GIS-системах для прогнозування розповсюдження пожеж.

4. Механіка деревини та вітрові навантаження. Фізичні моделі також застосовуються для аналізу стійкості дерев до вітру. Деревя розглядаються як пружні стрижні, що деформуються під дією вітрових сил. Тут використовуються рівняння пружності, моменти інерції та граничні умови:

$$EI((d^4y)/(dx^4)) = q(x), \quad (7)$$

де E — модуль пружності деревини; I — момент інерції стовбура; $q(x)$ — навантаження від вітру.

Ці моделі дають змогу проектувати стійкі лісосмуги та захисні насадження.

Приклад. ForestGALES — модель для оцінки ризику повалення дерев під дією вітру.

Вона включає фізичну модель моменту сили вітру та деформацію дерева як балки на пружній основі.

Математична основа:

$$M = 0,5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot h \cdot u^2, \quad (8)$$

де M — момент згинання; C_d — коефіцієнт опору; ρ — густина повітря; A — проєкційна площа крони; h — висота дерева; U — швидкість вітру.

Застосування: прогноз втрат у лісі після буревіїв.

Розглянемо приклад *моделювання мікроклімату соснових і мішаних лісів Полісся для оцінки пожежної небезпеки та водного режиму*. У лісах Полісся основну увагу приділяють моделюванню температури повітря і ґрунту, вологості та руху повітря під пологом соснових насаджень на піщаних і торфових ґрунтах. Для опису прогрівання ґрунту та підстилки застосовують рівняння теплопровідності, яке допомагає оцінити, як тепло поширюється в піщаних ґрунтах і торфовищах упродовж доби та сезону. Рух повітря під кронами та на узліссях описують спрощеними формами рівнянь Нав'є-Стокса, що дає змогу змоделювати швидкість і напрямок повітряних потоків, які впливають на висушування підстилки. Одночасно використовують моделі радіаційного балансу, що враховують надходження сонячної радіації, її поглинання кронами сосни, відбиття від ґрунту та теп-

лове випромінювання в атмосферу. Вхідними даними для моделі є метеорологічні спостереження, зімкнутість крон, висота дерев, тип ґрунту, рівень ґрунтових вод і вологість підстилки. Результатом моделювання є карти температури та вологості під пологом лісу, а також зони з підвищеним ризиком пересихання підстилки й виникнення лісових пожеж. Практично це дає можливість лісгоспам Полісся оптимізувати протипожежні заходи, планувати зволоження торфовищ і регулювати густоту насаджень для збереження сприятливого мікроклімату.

5. Використання чисельного моделювання та симуляцій. Складні фізичні процеси, як-от атмосферна циркуляція, поглинання CO_2 або фільтрація вологи в ґрунті моделюються за допомогою:

- скінченно-різницевих і скінченно-елементних методів (FDM, FEM);
- симуляцій у середовищах типу MATLAB, COMSOL, OpenFOAM;
- комп'ютерних моделей екосистем (наприклад, 3-PG, ForestGALES).

Розглянемо як приклад *світлові моделі в кроні дерева*: Ray-tracing (трасування променів) для моделювання світлового потоку в кроні. Застосовується для оцінки фотосинтетично активного випромінювання (PAR) та прогнозу затінення у багаторічкових насадженнях.

Моделі будуються на основі геометричної оптики з розрахунком кута падіння променя, його інтенсивності та коефіцієнта поглинання. Це допомагає створювати точні прогнози для довготривалого управління лісами.

ВИСНОВКИ

Фізико-математичне моделювання є важливим інструментом наукового аналізу та управління процесами у лісовому господарстві. Використання математичних моделей дає змогу комплексно оцінювати стан лісових екосистем, прогнозувати їх розвиток під впливом природних і антропогенних чинників, а також оптимізувати процеси лісокористування й відновлення.

Встановлено, що серед найпоширеніших напрямів моделювання у лісовому господарстві є: моделювання росту деревостанів і запасів деревини, прогнозування лісових пожеж, аналіз впливу кліматичних змін, а також дослідження гідрологічних і ґрунтових процесів. Ефективність таких підходів значно підвищується за умов інтеграції моделей із геоінформаційними системами, технологіями дистанційного зондування Землі та сучасними інструментами штучного інтелекту.

Огляд літературних джерел засвідчив, що розвиток фізико-математичного

моделювання у лісовій галузі потребує подальшого вдосконалення теоретичних засад, адаптації моделей до регіональних природно-кліматичних умов України та розширення бази емпіричних даних для підвищення точності прогнозів.

Отже, впровадження фізико-математичних моделей у практику лісового господарства є перспективним напрямом, що сприяє підвищенню наукової обґрунтованості управлінських рішень, забезпеченню сталого використання лісових ресурсів та збереженню екологічної рівноваги в природних системах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Степенко, С., & Лазаренко, І. (2021). Застосування економіко-математичного моделювання для аналізу у галузі сільського господарства. *Економіка та суспільство*, (33). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-33>.
2. Лозінська, Т. П., Задорожний, А. І., & Масальський, В. П. (2024). Дослідження нових технологій та інновацій у сфері лісового господарства. *Агробіологія*, 1, 268–276. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2024-187-1-268-276>.
3. Свинчук, В. А., Кашпор, С. М., & Миронюк В. В. (2014). Математичні моделі об'єму деревних стовбурів основних лісоутворювальних порід України. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Лісівництво та декоративне садівництво*, 198(2), 58–64. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu_lis_2014_198\(2\)](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu_lis_2014_198(2)).
4. Лозінська, Т. П., Ситник, О. С., & Велика, К. І. (2024). Огляд і аналіз основних аспектів протипожежного захисту лісових екосистем в умовах сьогодення. *Агробіологія*, 2, 144–153. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2024-191-2-144-153>.
5. Лозінська, Т. П. (2025). Збереження біорізноманіття в лісових екосистемах для підтримання екологічної рівноваги та забезпечення сталого розвитку. *Лісівнича освіта і наука: стан, проблеми та перспективи розвитку: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.* (с. 31–33). Ломжа — Малин.
6. Burkhart, H. E., & Tomé, M. (2012). *Modeling forest trees and stands* (2nd ed.). (pp. 55–198). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5320-2>.
7. Pretzsch, H. (2019). *Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model* (2nd ed.). (pp. 101–276).
8. Адамовський, О. М. (2015). Оптимізація лісокористування в економічних дослідженнях (зарубіжний досвід). *Наук. вісник УкрДЛТУ: до 125-річчя УкрДЛТУ*, 10(2), 168–173.
9. Shevchuk, S., Chuvpylo, V., Gapon, S., 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. DOI: <https://doi.org/10.33543/140139200203>.
10. Зацерковний, В., Савков, П., Пампуха, І. & Васецька, К. (2020). Застосування технологій ГІС та ДЗЗ в задачах моніторингу лісових пожеж. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер.: Військово-спеціальні науки*, 2(44), 54–58. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2020.44.54-58>.
11. Миронюк, В. В. (2020). *Інвентаризація рівнинних лісів України за даними супутникової зйомки: моногр.* Харків: АТ «Харківська книжкова фабрика «ГЛОБУС». URL: https://www.researchgate.net/profile/Viktor-Myroniuk/publication/346788204_Invmonografia.pdf.
12. Барабаш, О. В., & Бандурка, О. І. (2022). Моделювання лісових пожеж на основі прогностичної моделі Байеса та геоінформаційних технологій. *Сучасні інформаційні системи*, 6(1), 19–28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.03>.
13. 3PG Model: *Physiological principles predicting growth (3-PG) model homepage*. University of British Columbia. URL: <https://3pg.forestry.ubc.ca/>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 24.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.12.2025

Дата публікації: 27.02.2026

РЕГІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІКИ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ У ПІВНІЧНО-СХІДНІЙ ЧАСТИНІ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛ.

В.В. Мороз¹, О. П. Житова²

¹Західноукраїнський національний університет (м. Тернопіль, Україна)
e-mail: vera_moroz@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1258-1530

²Поліський національний університет (м. Житомир, Україна)
e-mail: elmi1969@meta.ua; ORCID: 0000-0003-2572-4163

Проблема лісових пожеж на Українському Поліссі набула критичного характеру, що зумовлює необхідність комплексного дослідження регіональних особливостей горимості лісів, їхніх екологічних наслідків та розробки науково обґрунтованих підходів до управління пожежними ризиками. Мета дослідження — виявити регіональні особливості динаміки лісових пожеж у північно-східній частині Житомирської обл., з'ясувати їх екологічні наслідки для ґрунтового покриву та охарактеризувати ефективність прогнозування пожежних ризиків. Методологія базується на аналізі статистичних даних Державної служби України з надзвичайних ситуацій за 2015–2024 рр., визначенні класів природної пожежної небезпеки за шкалою Курбатського, дослідженні впливу пожеж на властивості ґрунтів методами потенціометрії та титриметрії (87 зразків із 30 розрізів) та математичному моделюванні на основі теореми Байєса для 120 кварталів лісництв. Встановлено критичне зростання площі пожеж у 170 разів — від 0,3 тис. га у 2021 р. до 51 тис. га у 2023 р., до тогож у 45% випадків основною причиною стали військові дії. Виявлено парадоксальну тенденцію у Бехівському лісництві: збільшення кількості пожеж удвічі супроводжувалося зменшенням їх площі втричі завдяки ефективному ранньому виявленню. Визначено відмінності класів пожежної небезпеки лісництв філії «Олевське лісове господарство» (2,15–2,79), де домінують соснові насадження класів II–III (понад 60% площі). З'ясовано статистично достовірні зміни властивостей ґрунтів: підвищення рН з 6,5–7,0 до 7,35–7,55 та зниження вмісту органічного вуглецю на 15–40% із тривалим періодом відновлення 5–10 років. Модель Байєса показала високу прогностичну здатність (87% точність), при цьому близькість до доріг збільшує ймовірність пожежі у 2,5–3,2 раза. Результати можуть бути використані для оптимізації розміщення протипожежної інфраструктури та прогнозування тривалості відновлення пірогенних ділянок.

Ключові слова: горимість лісів, пірогенна трансформація, модель Байєса, класи пожежної небезпеки, органічний вуглець, прогнозування ризиків, соснові монокультури.

ВСТУП

Лісові пожежі є одним із найнебезпечніших екологічних чинників, що впливають на функціонування та стійкість лісових екосистем. За даними міжнародних досліджень, упродовж останніх десятиліть спостерігається глобальна тенденція до зростання кількості та інтенсивності лісових пожеж, що пов'язано зі змінами клімату, підвищенням температури повітря на 0,6–0,68°C за декаду та зміною режиму опадів [1; 2]. Для Європи ліси Полісся, особливо соснові монокультури на бідних піщаних ґрунтах та осушені болота, стають однією з найвразливіших до пожеж територій [3–5].

В Україні проблема лісових пожеж набула критичного характеру. За період 2015–2023 рр. на території держави зафіксовано 16 355 лісових пожеж, які завдали економічних збитків на суму 9,3 млрд грн [6]. Особливо загрозливою є ситуація на Поліссі, де за 2001–2023 рр. зафіксовано зростання кількості та інтенсивності пожеж із вираженими піками навесні та наприкінці літа–осені [1; 7].

Згідно аналізу повидільної бази даних (ВО «Укрдержліспроєкт») Житомирська область, де зосереджено 388,1 тис. га соснових лісів — однієї з найбільших площ в Україні, — зазнає особливо значних втрат від пожеж [8].

Додатковим чинником, що різко загострив пожежну ситуацію, стали військові дії, розпочаті у 2022 р. За даними Державного агентства лісових ресурсів України, у 45% випадків основною причиною лісових пожеж є загоряння насаджень внаслідок обстрілів, мінування та падіння безпілотників [1; 9]. Якщо у 2021 р. площа лісових пожеж у лісах, підпорядкованих Державному агентству лісових ресурсів, становила 0,3 тис. га, то у 2022 р. вона зросла до 15,7 тис. га (у 54 рази), а в 2023 р. — до 51 тис. га (у 170 разів) (Державна служба України з надзвичайних ситуацій, 2024 р.) [6]. Унаслідок бойових дій знищено понад 280 тис. га лісу на суму 6,5 млрд грн [10].

Аналіз наукової літератури свідчить, що дослідження лісових пожеж на Поліссі активізувалися після 2015 р., до того ж основна увага приділяється кліматичним чинникам, типам угідь, що горять, та антропогенному впливу [1; 3; 5; 11–13]. Встановлено, що ризик пожеж різко зростає за температури понад 18–20°C і дефіциту опадів, а найчастіше горять соснові ліси, осушені торфовища та луки [2; 7; 14]. Переважна більшість загорянь пов'язана з людською діяльністю: випалюванням трави, підпалами, близькістю доріг та забудови [3; 11].

Особливу увагу дослідники приділяють екологічним наслідкам пожеж. Після низових пожеж спостерігається тимчасове підлучення верхнього горизонту ґрунту через золу, підвищення вмісту К, Са, Mg, проте через 1–1,5 роки рН знову стає дуже кислим [15]. Відбувається деградація рослинних угруповань у сухих соснових типах лісу, хоча в більш вологих умовах можлива швидка сукцесія та навіть зростання видової різноманітності окремих груп [4; 16]. Значні викиди аерозолів і газів формують пилові та димові шлейфи, що істотно впливають на якість атмосферного повітря [5; 9].

Водночас, незважаючи на значну кількість досліджень, залишається низка невирішених питань. Найперше, бракує комплексних регіональних досліджень, що поєднували б аналіз динаміки пожеж, їх еколо-

гічних наслідків та ефективності профілактичних заходів у межах одного природно-територіального комплексу. По-друге, недостатньо вивчені особливості пожежної ситуації в умовах воєнного стану, зокрема вплив військових дій на горимість лісів у різних лісгосподарських підприємствах. По-третє, відсутні порівняльні дослідження ефективності протипожежних заходів у різних лісництвах одного регіону, що унеможливає розробку оптимальних управлінських рішень. По-четверте, недостатньо застосовуються методи математичного моделювання для прогнозування пожежних ризиків на регіональному рівні.

Житомирська обл., де зосереджена найбільша в Україні площа соснових лісів на Поліссі, є ідеальним об'єктом для комплексного дослідження. На її території функціонують великі лісгосподарські підприємства, які характеризуються різними класами природної пожежної небезпеки, неоднаковою інтенсивністю пожеж та різним рівнем організації профілактичних заходів. Інтеграція даних про динаміку пожеж, їх екологічні наслідки для ґрунтового покриву та ефективність профілактики дозволить створити цілісну картину пожежної ситуації в регіоні та розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо її поліпшення.

Мета дослідження — виявити регіональні особливості динаміки лісових пожеж у північно-східній частині Житомирської обл. в умовах воєнного стану, з'ясувати їх екологічні наслідки для ґрунтового покриву та охарактеризувати ефективність профілактичних заходів у різних лісгосподарських підприємствах для обґрунтування системи управління пожежними ризиками.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема лісових пожеж на Поліссі активно досліджується вітчизняними та зарубіжними науковцями, про що свідчить зростання кількості публікацій у провідних міжнародних виданнях упродовж останніх п'яти років. Аналіз наукової літератури дає

зможу виділити чотири основні напрями досліджень: кліматичні драйвери пожеж, типи угідь та їх горимість, антропогенний вплив, а також екологічні наслідки пожеж.

Фундаментальне дослідження S. Youchenko et al. [1], присвячене аналізу взаємозв'язку між змінами клімату та динамікою лісових пожеж на Українському Поліссі за період 2001–2023 рр. Автори встановили, що температура повітря зростала зі швидкістю $0,60^{\circ}\text{C}$ за декаду, а кількість опадів знизилася на 3–5%. Використовуючи дані супутникового моніторингу MODIS та метеорологічні спостереження, дослідники виявили, що ризик пожеж різко зростає за температури понад $18\text{--}20^{\circ}\text{C}$ та дефіциту опадів. Особливо катастрофічною виявилася весна 2020 р., коли понад половина території Українського Полісся опинилася під впливом лісових та торфових пожеж внаслідок поєднання теплої безсніжної зими, посушливої весни та сильного вітру.

Доповнюють цю картину результати V. Karamushka et al. [5], представлені на 17-й Міжнародній конференції з моніторингу геологічних процесів. Дослідники продемонстрували, що кліматичні зміни призводять до подовження пожежонебезпечної періоду та збільшення частоти посух, при цьому особливо небезпечними є посушливі умови серпня. Y. Nykytiuk & O. Podolian [2] у статті проаналізували екологічні детермінанти просторово-часової динаміки пожеж у зонах Полісся та Лісостепу України, виявивши просторові патерни розподілу пожеж залежно від температурного режиму та вологозабезпеченості.

Важливе міжнародне дослідження M. Kirkland et al. [3], присвячене аналізу впливу ландшафтних пожеж на цінні природоохоронні території Полісся. Британські та українські вчені встановили, що пожежі непропорційно вражають торфовища, луки та листяні ліси, але лише за умов низької вологості. Використовуючи дані дистанційного зондування Землі за період 2015–2020 рр., автори виявили, що за низької вологості осушені торфовища горять частіше за хвойні ліси, що становить

особливу загрозу для біорізноманіття та вуглецевих запасів.

С.В. Зібцев та співавт. [7] представили результати моніторингу ландшафтних пожеж Транскордонної Рамсарської території «Ольмани-Переброди» за даними супутникових систем MODIS та VIIRS. Автори встановили, що найчастіше горять соснові ліси на бідних піщаних ґрунтах та відкриті болота. Г. Бумар [14] проаналізували довгострокову динаміку пожеж у Поліському природному заповіднику, виявивши, що у заповідниках значна частка території регулярно охоплюється вогнем, що впливає на структуру та функціонування екосистем.

Польське дослідження A. Kolanek et al. [13], продемонструвало значний вплив людської діяльності на щільність лісових пожеж. Аналізуючи 30-річний період спостережень, автори зафіксували, що близькість доріг, населених пунктів та рекреаційних зон різко збільшує ймовірність виникнення пожеж. Ці висновки підтверджуються дослідженням P. Didenko et al. [11] де у статті показано, що переважна більшість загорянь на Поліссі пов'язана з випалюванням трави, підпалами та недотриманням правил пожежної безпеки.

A. Renkas et al. [12] запропонували новітній підхід до оптимізації розміщення пожежних частин, використовуючи метод ізохрон та діаграми Вороного. Автори продемонстрували, що науково обґрунтоване планування розташування пожежної інфраструктури може скоротити час доїзду та зменшити площу пройденої вогнем. O. Soshenskyi et al. [17] розробили методіку картування зон контакту «ліс-забудова» для Житомирської обл., що дає можливість визначати територіальні пріоритети профілактичних заходів.

В.П. Ворон [15] детально дослідили пірогенні зміни ґрунтів соснових насаджень. Автори встановили, що після низових пожеж спостерігається тимчасове (до 1–1,5 років) підлучення верхнього горизонту ґрунту через золу та підвищення вмісту K, Ca, Mg, проте надалі рН знову стає дуже кислим, а ефект обмежується глибиною до 10 см. O. Kratiuk et al. [18] проаналі-

зували вплив лісових пожеж на соснові насадження Коростишівського лісництва Житомирської обл., виявивши значну деградацію деревостанів та необхідність розробки програм відновлення.

L. Raichuk et al. [9] досліджували взаємодію між вирубукою лісів та кліматичними змінами, встановивши, що лісові пожежі є важливим чинником у цьому процесі. Продовжуючи цю тематику, Л.А. Райчук та ін. [19] обґрунтували необхідність відновлення лісових екосистем як основи сталого розвитку агроландшафтів Українського Полісся. D. Vyshnevskiy [16] проаналізував угруповання мишоподібних гризунів на ділянках з різним ступенем пірогенного пошкодження у Чорнобильській зоні, виявивши, що у більш вологих умовах після пожеж можлива швидка сукцесія та навіть зростання видової різноманітності.

Окремої уваги заслуговують дослідження впливу російсько-української війни на пожежну ситуацію. V. Karamushka et al. [5] зазначили, що військові дії у заповідних територіях Полісся створюють додаткові вогнища займання та ускладнюють гасіння пожеж. S. Boychenko et al. [1] виявили, що у 2022–2023 рр., незважаючи на менш сухі кліматичні умови, різко збільшилася кількість пожеж через бойові дії (обстріли, мінування, падіння безпілотників) у Київському, Чернігівському та Новгород-Сіверському Поліссі. L. Raichuk et al. [9] проаналізували масштаби шкоди, завданої лісовими пожежами внаслідок воєнних дій, та обґрунтували необхідність розробки комплексних програм післявоєнного відновлення лісів.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про комплексний характер проблеми лісових пожеж на Поліссі, де взаємодіють кліматичні, екологічні, антропогенні та, починаючи з 2022 р., військові чинники. Водночас, незважаючи на значну кількість досліджень окремих аспектів проблеми, бракує комплексних регіональних робіт, що поєднували б аналіз динаміки пожеж, їх екологічних наслідків та ефективності профілактичних заходів для конкретного регіону. Особливо

це стосується Житомирської обл., де зосереджена найбільша площа соснових лісів Українського Полісся та де військові дії значно загострили пожежну ситуацію.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводилися на території двох лісгосподарських підприємств північно-східної частини Житомирської обл.: філії «Олевське лісове господарство» (до реорганізації 2024 р.у) та Бехівське лісництво філії «Коростенське лісомисливське господарство» ДП «Ліси України». Об'єкти розташовані в зоні Українського Полісся, характеризуються помірно-континентальним кліматом з середньорічною температурою $+8,8^{\circ}\text{C}$ та кількістю опадів 550–650 мм. Переважають соснові насадження на бідних піщаних ґрунтах, що визначає підвищену горимість лісів.

Для аналізу динаміки лісових пожеж використовувалися дані Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Державного агентства лісових ресурсів України та звітність лісгосподарських підприємств за період 2015–2024 рр. Аналізувалися показники — кількість пожеж, площа пройдена вогнем, економічні збитки, причини виникнення пожеж.

Визначення класів природної пожежної небезпеки проводилося відповідно до шкали Курбатського (1970) з урахуванням типу лісорослинних умов, складу деревостану та повноти. Для кожного лісництва розраховувався середній клас пожежної небезпеки за формулою:

$$K_{\text{сеп}} = \sum \frac{S_i \times K_i}{S_{\text{зар}}}, \quad (1)$$

де $K_{\text{сеп}}$ — середній клас пожежної небезпеки; S_i — площа ділянок i -го класу, га; K_i — клас пожежної небезпеки (1–V); $S_{\text{зар}}$ — загальна площа лісництва, га.

Відбір ґрунтових зразків здійснювався згідно з ДСТУ 4287:2004 [20] у Бехівському лісництві на ділянках, пройдених пожежами у 2022 та 2023 рр., а також на фонових ділянках. Було викопано 30 ґрунтових розрізів (по 10 на кожному типі ділянок),

з яких відібрано 87 зразків по генетичним горизонтам у серпні 2023 р.

pH водної витяжки визначали потенціометричним методом на іонетрі «Експерт-01» згідно з ДСТУ ISO 10390:2007 [21] (співвідношення ґрунт : вода 1 : 2,5). Вміст органічного вуглецю досліджували титриметричним методом за Тюриним (1951) [22]. Для кожного показника проводили 3–5 паралельних визначень.

Для прогнозування ймовірності виникнення лісових пожеж застосовувалася статистична модель на основі теореми Байєса (Bayes, 1763). Площа Бехівського лісництва (120 кварталів) розглядалася як сукупність гіпотез, де кожна відповідає можливості виникнення пожежі в конкретному кварталі. Апостеріорна ймовірність розраховувалася за формулою:

$$P(H_i/K) = \frac{P(K/H_i) \times P(H_i)}{\sum_{i=1}^n P(K/H_i) \times P(H_i)}, \quad (2)$$

де $P(H_i/K)$ – апостеріорна ймовірність виникнення пожежі в i -му кварталі за умови настання події K (певного комплексу ознак); $P(K/H_i)$ – умовна ймовірність спостереження комплексу ознак K (вікова група, клас пожежної небезпеки, тип лісу, наявність доріг тощо) за умови, що реалізується гіпотеза H_i ; $P(H_i)$ – апіорна ймовірність виникнення пожежі в i -му кварталі (до врахування комплексу ознак K); K – подія, що характеризується певним комплексом ознак k_1, k_2, \dots, k_n ; n – загальна кількість можливих гіпотез (кварталів лісництва).

Статистична обробка даних проводилася з використанням Microsoft Excel 2019 та Statistica 10.0. Розраховувалися описові

статистики (середнє арифметичне, стандартне відхилення), здійснювався кореляційний аналіз. Достовірність відмінностей між середніми значеннями оцінювалася за t -критерієм Стьюдента за рівнів значущості $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз лісових пожеж у північно-східній частині Житомирської обл. за період 2015–2024 рр. показав різке погіршення пожежної ситуації, особливо після початку повномасштабного вторгнення у 2022 р. (табл. 1, рис. 1). Якщо у 2021 р. площа лісових пожеж в Україні становила 0,3 тис. га, то у 2022 р. вона зросла до 15,7 тис. га (у 54 рази), а в 2023 р. досягла 51 тис. га (у 170 разів порівняно з 2021 р.). За даними Державного агентства лісових ресурсів України, у 45% випадків основною причиною пожеж стали військові дії: обстріли, мінування територій та падіння безпілотників.

У Бехівському лісництві філії «Коростенське лісомисливське господарство» ДП «Ліси України» за 2022–2023 рр. зафіксовано 15 лісових пожеж загальною площею 15,13 га (див. табл. 1). При цьому спостерігалася парадоксальна тенденція: у 2023 р. кількість пожеж зросла вдвічі (від 5 до 10), але загальна площа, пройдена вогнем, зменшилася утричі (від 12,1 до 3,03 га). Ця закономірність свідчить про підвищення ефективності системи раннього виявлення та оперативного реагування на пожежі, незважаючи на складні умови воєнного часу [23]. Середня площа однієї пожежі зменшилася від 2,42 га у 2022 р. до 0,30 га у 2023 р., що вказує на успішну локалізацію займань на ранніх стадіях розвитку.

Таблиця 1. Динаміка лісових пожеж в Україні та Бехівському лісництві за 2021–2023 рр.

Рік	Україна кількість пожеж, од.	Україна площа, тис. га	Бехівське ліс- ництво кількість пожеж, од.	Бехівське лісництво площа, га	Середня площа 1 пожежі, га
2021	660	0,3	–	–	–
2022	1012	15,7	5	12,1	2,42
2023	1278	51,0	10	3,03	0,30
Зростання 2023/2021, разів	1,9	170	–	–	–

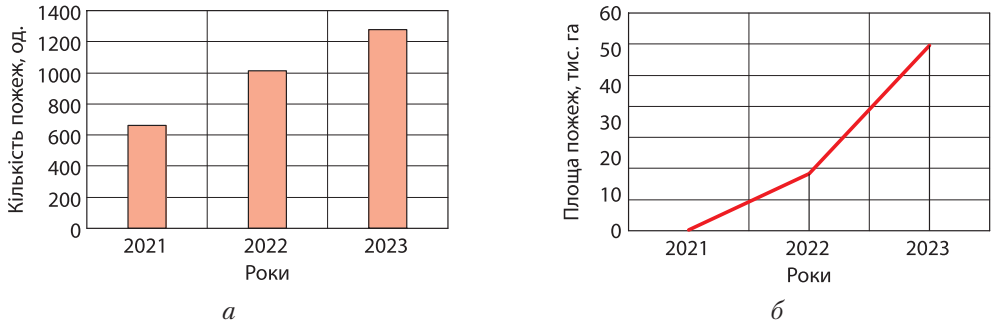


Рис. 1. Динаміка лісових пожеж в Україні у 2021–2023 рр.:
a – кількість пожеж; *б* – площа пожеж

Порівняльний аналіз класів природної пожежної небезпеки лісів. Розрахунок середніх класів природної пожежної небезпеки для трьох лісництв філії «Олевське лісове господарство» виявив істотні відмінності у структурі пожежної небезпеки (табл. 2, рис. 2). Для Журжевицького лісництва середній клас становив 2,60, для Кам'янського – 2,79, для Покровського – 2,15. Найнижчий показник у Покровському лісництві пояснюється найбільшою часткою насаджень I класу небезпеки (2963,1 га, або 41,3% площі), що може здаватися парадоксальним. Однак аналіз показує, що ці насадження представлені переважно молодняками на свіжих піщаних ґрунтах з добре розвиненим трав'яним покривом, що знижує загальний ризик.

Кам'янське лісництво характеризується найвищим середнім класом небезпеки (2,79) через значну площу насаджень III класу (3156,5 га, або 39,1%). Це листяно-хвойні насадження на свіжих суглинкових ґрунтах із помірним накопиченням підстилки. Журжевицьке лісництво займає проміжне положення (2,60) з відносно рів-

номірним розподілом площ між класами I–III (див. рис. 2).

Важливою закономірністю є те, що насадження V класу небезпеки (листяні на вологих ділянках) становлять лише 3–5% площі всіх досліджуваних лісництв (див. табл. 2), що підтверджує домінування пожежонебезпечних соснових типів лісу на Поліссі. Ця особливість узгоджується з даними Kirkland et al. (2023) про підвищену вразливість хвойних монокультур на бідних піщаних ґрунтах до пожеж.

Пірогенна трансформація ґрунтового покриву. Дослідження впливу лісових пожеж на властивості ґрунтів на основі аналізу 87 зразків з 30 ґрунтових розрізів виявило статистично достовірні (t -критерій, $p < 0,05$) зміни як рівня кислотності, так і вмісту органічного вуглецю (табл. 3). На ділянках, пройдених пожежею в 2022 р., спостерігалось підвищення рН водної витяжки до 7,35–7,55 порівняно з фоновими значеннями 6,5–7,0 (різниця статистично достовірна, $p = 0,003$) [23]. Це підлуження верхнього горизонту ґрунту зумовлене надходженням золи, багатой на лужні катіони

Таблиця 2. Розподіл площ за класами природної пожежної небезпеки в лісництвах філії «Олевське лісове господарство»

Лісництво	I клас, га	II клас, га	III клас, га	IV клас, га	V клас, га	Разом, га	Середній клас
Журжевицьке	1571,3	1859,5	2279,7	649,4	216,8	6576,7	2,60
Кам'янське	1731,3	1724,4	3156,5	1329,8	119,7	8061,7	2,79
Покровське	2963,1	1260,3	1908,5	928,1	109,0	7169,0	2,15
Разом	6265,7	4844,2	7344,7	2907,3	445,5	21807,4	2,51

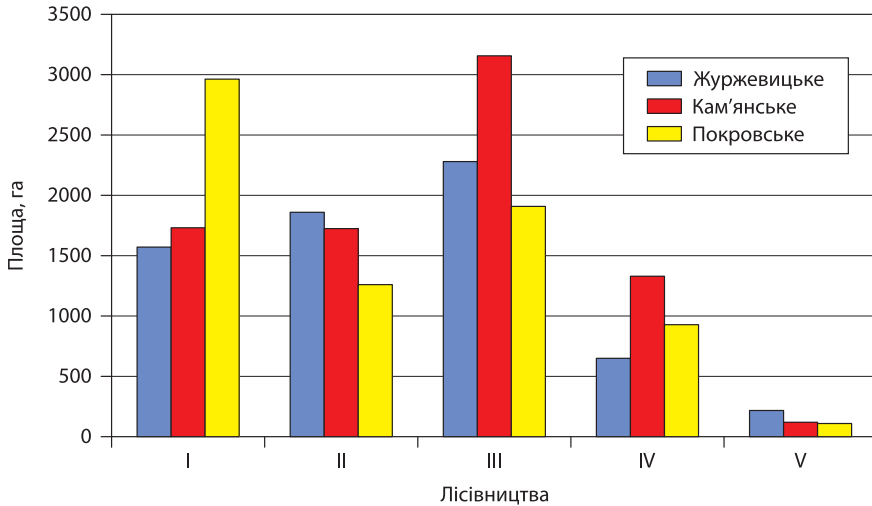


Рис. 2. Розподіл площ за класами природної пожежної небезпеки

(K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), що узгоджується з результатами Voron et al. (2020).

Вміст органічного вуглецю на пірогенних ділянках виявився статистично достовірно нижчим (t -критерій, $p=0,008$), ніж на фонових: 0,33–0,46% проти 0,55–0,62% на контролі (див. табл. 3). Зниження становило 15–40% залежно від інтенсивності пожежі та елементу мікрорельєфу. На мікропідвищеннях, де пожежі були інтенсивнішими, втрати органічного вуглецю сягали 40%, тоді як у мікропониженнях із вищою вологістю – лише 15–20%.

Цікавою закономірністю є те, що на ділянках дворічної давності (пожежі 2022 р.) вміст органічного вуглецю залишався зниженим (0,42–0,46%), що свідчить про тривалий період відновлення гумусового

горизонту. За даними Voron et al. (2020), повне відновлення показників рН до фонових значень відбувається лише через 1,5–2 роки після пожежі, тоді як відновлення вмісту органічної речовини може тривати 5–10 років.

Просторова варіабельність показників на різних елементах мікрорельєфу (мікропідвищення та мікропониження) вказує на неоднорідність пірогенного впливу навіть у межах однієї ділянки (див. табл. 3). На мікропідвищеннях з швидшим прогріванням та нижчою вологістю пожежі були інтенсивнішими, що призводило до більш істотних змін властивостей ґрунту.

Застосування теореми Байєса для 120 кварталів Бехівського лісництва дозволило виділити три категорії ризику виник-

Таблиця 3. Вплив лісових пожеж на властивості ґрунтів у Бехівському лісництві

Тип ділянки	Мікрорельєф	рН водної витяжки	Органічний вуглець, %	Зміна від фону, %
Фонова (контроль)	Мікропідвищення	6,8	0,58	—
	Мікропониження	6,5	0,62	—
Пожежа 2022 р.	Мікропідвищення	7,55	0,42	–28
	Мікропониження	7,35	0,46	–26
Пожежа 2023 р.	Мікропідвищення	7,35	0,38	–34
	Мікропониження	7,55	0,33	–47

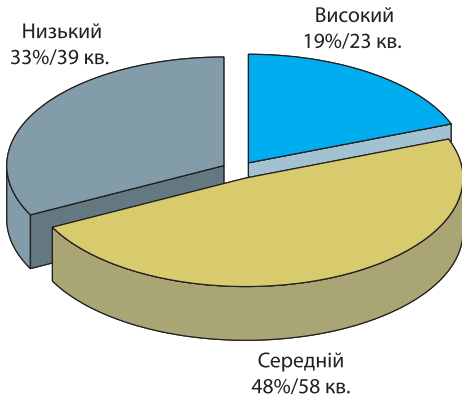


Рис. 3. Розподіл кварталів Бехівського лісництва за категоріями пожежного ризику

нення пожеж: високий ($P > 0,015$), середній ($P = 0,008 - 0,015$) та низький ($P < 0,008$) (табл. 4, рис. 3). До зони високого ризику увійшли 23 квартали (19,2% площі), переважно представлені сосновими молодняками I–II класів пожежної небезпеки поблизу автомобільних доріг. Середній ризик характерний для 58 кварталів (48,3%) з переважанням насаджень II–III класів. Низький ризик притаманний 39 кварталам (32,5%), де домінують листяні та мішані насадження IV–V класів на вологих ділянках.

Важливою закономірністю є те, що близькість до доріг та населених пунктів збільшує ймовірність виникнення пожежі у 2,5–3,2 рази, що узгоджується з результатами польського дослідження Kolanek et al. (2021). Кwartали, розташовані у межах 500 м від доріг, характеризувалися

апостеріорною ймовірністю пожежі 0,018–0,024, тоді як віддалені квартали — лише 0,006–0,009.

Історія попередніх пожеж також виявилася значущим предиктором: квартали, де пожежі траплялися упродовж останніх 10 років, мали у 1,8 раза вищу ймовірність повторного займання. Це може пояснюватися як особливостями типу лісорослинних умов (сухі бори на піщаних ґрунтах), так і соціальними чинниками (близькість до місць відпочинку, традиційні маршрути руху населення).

Модель Байєса показала високу прогностичну здатність, а саме 87% пожеж 2023 р. відбулися саме у кварталах високого та середнього ризику (див. рис. 3). Це підтверджує доцільність використання байєсівського підходу для оптимізації розміщення профілактичних заходів та пожежної інфраструктури, як це було продемонстровано Renkas et al. (2022) для природних екосистем.

Порівняльний аналіз двох досліджуваних підприємств мав як спільні закономірності, так і регіональні відмінності. Спільною рисою є домінування соснових насаджень II–III класів пожежної небезпеки (див. табл. 2), що створює високий базовий рівень ризику. Однак ефективність профілактичних заходів істотно відрізняється, так у Бехівському лісництві вдалося зменшити середню площу пожежі від 2,42 до 0,30 га (див. табл. 1), тоді як в Олевському лісовому господарстві цей показник залишався на рівні 1,5–2,0 га.

Таблиця 4. Розподіл кварталів Бехівського лісництва за категоріями пожежного ризику (модель Байєса)

Категорія ризику	Діапазон ймовірності P	Кількість кварталів	Частка від загальної площі, %	Переважаючі характеристики
Високий	$> 0,015$	23	19,2	Соснові молодняки, близькість доріг
Середній	0,008–0,015	58	48,3	Насадження II–III класів небезпеки
Низький	$< 0,008$	39	32,5	Листяні насадження на вологих ділянках
Разом	—	120	100,0	—

Ключовим чинником, що визначає пожежну ситуацію з 2022 р., є військові дії (див. *рис. 1*). Їхній вплив є нерівномірним: найбільше постраждали лісництва, розташовані ближче до зони активних бойових дій або на шляхах руху військової техніки.

Важливою є взаємодія між кліматичними та антропогенними чинниками. За даними Boychenko et al. (2025), потепління на 0,6–0,68°C за декаду та зниження опадів на 3–7% створюють сприятливі умови для пожеж. У поєднанні з військовими діями (45% причин) та традиційною антропогенною активністю (35% – випалювання трави, підпали) формується синергічний ефект, що пояснює різке зростання як кількості, так і площі пожеж у 2022–2023 рр. (див. *табл. 1*, див. *рис. 1*).

ВИСНОВКИ

У результаті комплексного дослідження лісових пожеж у північно-східній частині Житомирської обл. встановлено регіональні особливості їх динаміки, з'ясовано екологічні наслідки для ґрунтового покриву та охарактеризовано ефективність прогнозування пожежних ризиків.

1. Виявлено критичне погіршення пожежної ситуації у період 2022–2023 рр., коли площа пожеж в Україні зросла від 0,3 тис. га (2021 р.) до 51 тис. га (2023 р.), що у 170 разів перевищує довоєнний рівень. Встановлено, що у 45% випадків основною причиною стали військові дії. Водночас, у Бехівському лісництві зростання кількості пожеж удвічі супроводжувалося зменшенням їх площі втричі (від 2,42 до 0,30 га),

що свідчить про підвищення ефективності раннього виявлення та оперативного реагування.

2. Визначено істотні відмінності у структурі пожежної небезпеки лісництв філії «Олевське лісове господарство»: середній клас варіює від 2,15 (Покровське) до 2,79 (Кам'янське). Встановлено, що насадження V класу небезпеки становлять лише 3–5% площі, тоді як домінують соснові насадження II–III класів (понад 60%), що створює високий базовий рівень пожежного ризику.

3. На основі аналізу 87 зразків з 30 ґрунтових розрізів встановлено статистично достовірні ($p < 0,01$) зміни властивостей ґрунтів: підвищення рН від 6,5–7,0 до 7,35–7,55 та зниження вмісту органічного вуглецю на 15–40%. З'ясовано, що на ділянках дворічної давності вміст органічного вуглецю залишався зниженим, що вказує на тривалий період відновлення (5–10 років).

4. Застосування моделі Байєса для 120 кварталів Бехівського лісництва дозволило виділити три категорії ризику: високий (19,2%), середній (48,3%) та низький (32,5%). Встановлено, що близькість до доріг збільшує ймовірність пожежі у 2,5–3,2 раза. Модель показала високу прогнозувальну здатність: 87% пожеж 2023 р. відбулися у кварталах високого та середнього ризику.

5. Виявлено синергічний ефект взаємодії кліматичних (потепління 0,6–0,68°C за декаду), військових (45% причин) та антропогенних (35% – випалювання трави) чинників, що пояснює різке зростання площі пожеж у 2022–2023 рр.

ЛІТЕРАТУРА

- Boychenko, S., Kuchma, T., Karamushka, V., Maidanovych, N., & Kozak, O. (2025). Wildfires and climate change in the Ukrainian Polissia during 2001–2023. *Sustainability*, 17(5), 2223. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052223>.
- Nykytiuk, Y., & Podolian, O. (2025). Ecological determinants of the spatiotemporal dynamics of wildfires in the Polissia and forest-steppe zones of Ukraine. *Agronomy*, 8(3), 140–152. DOI: <https://doi.org/10.32819/202518>.
- Kirkland, M., Atkinson, P., Pearce-Higgins, J., De Jong, M., Dowling, T., Grummo, D., ... Ashton-Butt, A. (2023). Landscape fires disproportionately affect high conservation value temperate peatlands, meadows, and deciduous forests, but only under low moisture conditions. *The Science of the Total Environment*, 884, 163849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163849>.
- Karamushka, V., Boychenko, S., & Nazarova, O. (2022). Climate impact drivers provoke fires in protected areas of Polissia. In *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580238>. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.2022580238>.

5. Karamushka, V., Kuchma, T., Boychenko, S., & Nazarova, O. (2023). Climate change and fires in the Ukrainian Polissia region. In *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520235>. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.2023520235>.
6. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. (2024). *Статистика надзвичайних ситуацій в Україні за 2015–2023 роки*. <https://www.dsns.gov.ua/>
7. Зібцев, С. В., Сошенський, О. М., Миронюк, В. В., & Гуменюк, В. В. (2019). Моніторинг ландшафтних пожеж Транскордонної Рамсарської території «Ольмани—Переброди» за даними дистанційного зондування Землі. *Лісівництво і агролісомеліорація*, 134, 88–95. DOI: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.134.2019.88>. URL: <https://forestry-forestmelioration.org.ua/index.php/journal/article/view/214>.
8. Сидоренко, С. Г., & Сидоренко, С. В. (2020). Аналіз горимості лісів України як передумова лісопожежного районування. *Лісівництво і агролісомеліорація*, 137, 91–101. DOI: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.137.2020.91>. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/fil/Додає/view/ByFileId/1223488>.
9. Raichuk, L., Shvydenko, I., & Kuchma, T. (2024). Climatic risks and forest ecosystems: The interaction between deforestation and climate change. *Balanced Nature Using*, 2, 18–26. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2024.309922>.
10. Державне агентство лісових ресурсів України. (2024). *Охорона лісів від пожеж 2025 рік*. URL: <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisovogospodarstvo/ohorona-i-zahist-lisiv/ohorona-lisiv-vid-pozhezh>.
11. Didenko, P., Ustymenko, V., & Bakay, B. Y. (2019). Forest fires in the Polissia and their impact on the environment. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 45, 136–141. DOI: <https://doi.org/10.36930/42194518>.
12. Renkas, A., Popovych, V., & Rudenko, D. (2022). Optimization of fire station locations to increase the efficiency of firefighting in natural ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management*, 78(1), 89–101. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.erem.78.1.25581>.
13. Kolanek, A., Szymanowski, M., & Raczyk, A. (2021). Human activity affects forest fires: The impact of anthropogenic factors on the density of forest fires in Poland. *Forests*, 12(6), 728. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12060728>.
14. Бумар, Г., Германчук, В., & Бельська, О. (2021). Багаторічний моніторинг пожеж в Поліському природному заповіднику та їх наслідки. *Вісник Біосферного заповідника «Асканія-Нова»*, (22), 10–16. DOI: <https://doi.org/10.53904/1682-2374/2020-22/2>. URL: <http://visti.askania-nova.kherson.ua/index.php/journal/article/view/4>.
15. Ворон, В. П., Мельник, Є. Є, Іванчіва, Є. В, Тимочук, І. В., & Ткач, О. М. (2019). Зміни в ґрунті соснових насаджень після пожежі. *Лісівництво і агролісомеліорація*, 135, 130–139. DOI: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.135.2019.130>. URL: <https://forestry-forestmelioration.org.ua/index.php/journal/article/view/240?articlesBySameAuthorPage=2>.
16. Vyshnevskiy, D. (2024). Muroid rodent communities in areas with varying degrees of fire damage: The Chernobyl polygons. *Theriolgia Ukrainica*, 27, 112–118. DOI: <https://doi.org/10.53452/tu2712>.
17. Soshenskiy, O., Myroniuk, V., Zibtsev, S., Gume-niuk, V., de Miguel Diez, F., & Vasylyshyn, R. (2024). Mapping Wildland-urban interfaces to support wild-fire management over fire-prone forest outskirts of the Zhytomyr region. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 15(2), 23–40. DOI: <https://doi.org/10.31548/forest/2.2024.23>.
18. Kratiuk, O., Aharova, M., & Romaniuk, R. (2024). The impact of forest fires on pine plantations in the branch «Korostyshiv Forestry». *Grafil of Science*, 38, 150–156. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.04.2024.026>. URL: <https://www.neliti.com/publications/635525/the-impact-of-forest-fires-on-pine-plantations-in-the-branch-korostyshiv-forestr>.
19. Райчук, Л. А., Швиденко, І. К., & Чоботько, Г. М. (2025). Відновлення лісових екосистем як основа збалансованого розвитку агроландшафтів Українського Полісся. *Агроекологічний журнал*, 1, 24–31. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2025.327085>. URL: <https://journalagroeco.org.ua/article/view/327085>.
20. ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб. (2005). [Чинний від 2005-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc.
21. ДСТУ ISO 10381-2:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб. Ч.2. Настанови щодо методів відбирання проб (ISO 10381-2:2002, IDT). (2006). [Чинний від 2006-04-01]. Київ: Держспоживстандарт України. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=58855.
22. *Методичні вказівки для проведення лабораторних занять з дисципліни «Ґрунтознавство»* (2022). Умань: Уманський національний університет садівництва. URL: <https://biology.udau.edu.ua/assets/files/molodshij-bakalavr/metodichki/metodichni-vkazivki-gruntoznavstvo.pdf>.
23. Moroz, V. (2024). Analysis and forecasting of the scale and impact of forest fires on ecosystems of Ukraine. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 15(3), 43–60. DOI: <https://doi.org/10.31548/forest/3.2024.43>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 04.12.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.01.2026
 Дата публікації: 27.02.2026

ТРАНСФОРМАЦІЯ АГРОЛАНДШАФТІВ ПІВДНЯ УКРАЇНИ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Т.Л. Кучма, І.К. Швиденко, Л.А. Райчук, А.М. Лішук

*Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: tanyakuchma@gmail.com; ORCID: 0000-0002-9328-5919
e-mail: favor09@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6135-8968
e-mail: edelvice@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2552-4578
e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8339-9365*

Підрич Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. спричинив одну з найбільших екологічних катастроф в історії України, призвівши до втрати 18 км³ прісної води та руйнування зрошувальних систем на площі понад 584 тис. га. Метою дослідження є оцінка просторово-часових змін стану агроресурсів Дніпропетровської, Запорізької та Херсонської обл. унаслідок осушення Каховського водосховища (далі — вдсх) за період 2020–2025 рр. з використанням даних дистанційного зондування Землі. Для комплексної оцінки трансформації рослинного покриву та водного режиму агроландшафтів застосовано чотири спектральні індекси: NDVI, SAVI, NDWI та NDMI. Аналіз здійснювався в середовищах Google Earth Engine, QGIS, Copernicus Open Access Hub і Sentinel Hub EO Browser. Було досліджено сільськогосподарські угіддя у межах 50 км від колишнього водосховища порівняно з більш віддаленими територіями. Результати підтвердили різке зниження вегетаційної активності після червня 2023 р., що було статистично верифіковано t-тестами та тестом Манна–Вітні. Найбільші зміни зафіксовано у Херсонській обл.: NDVI знизився на 55%, SAVI — на 57, NDWI — на 88, NDMI — на 44%. У Запорізькій обл. зниження становило 25–38%, у Дніпропетровській — 26–30%. Аналіз індексів виявив значне зростання площ екстремальної посухи, особливо в Херсонській обл. Використання супутникової інформації є ефективним інструментом для вивчення трансформації рослинного покриву стану водного режиму за наслідками руйнації Каховського вдсх та кліматичних змін. Отримані результати є актуальними під час розробки загальнодержавних і регіональних програм відновлення зрошення та заходів з адаптації сільськогосподарського виробництва до змін клімату на принципах скорочення емісії парникових газів у процесі аграрного виробництва, досягнення балансу між деградацією й відновленням ґрунтів та формування біоенергетичних низьковуглецевих агроєкосистем, а також створюють наукове підґрунтя для оцінки втрат і відновлення екосистемних послуг агроландшафтів у посткатастрофічний період.

Ключові слова: ДЗЗ, спектральні індекси, NDVI, SAVI, NDMI, NDWI, рослинний покрив, інвазійні види, посуха, кліматичні зміни, деградація.

ВСТУП

Підрич Каховської гідроелектростанції (ГЕС) 6 червня 2023 р. став однією з найбільших екологічних катастроф в історії незалежної України. Ця подія мала багатомірні наслідки — гідрологічні, екологічні, соціально-економічні, аграрні та гуманітарні [1]. Руйнування греблі призвело до втрати близько 18 км³ прісної води, що дорівнює річному водоспоживанню всієї України [2], а Каховське вдсх фактично

перестало існувати як гідротехнічний об'єкт.

Для південних регіонів України, зокрема Херсонської, Запорізької та Дніпропетровської обл., Каховське вдсх відіграло ключову роль у забезпеченні водними ресурсами. Його функціонування було критично важливим для стабільного вододопостачання аграрного сектору через розгалужену мережу зрошувальних систем, підтримки промислового виробництва, забезпечення потреб населених пунктів, а також збереження екосистем, включно

з дельтою Дніпра та заплавленими територіями. Загальна площа зрошення Херсонської, Запорізької та Дніпропетровської обл. сягала 584 тис. га земель, а проєктна понад 900 тис. га [3]. Ці площі формували істотну частку регіональної продукції зернових, технічних та овочевих культур, продуктивне культивування яких за агрокліматичних умов степової зони є неможливим без стабільного зволоження. Тому, руйнування греблі Каховської ГЕС спричинило системну дестабілізацію продовольчої безпеки держави та регіональної аграрної економіки [2; 4; 5].

Комплексна оцінка наслідків цієї екологічної кризи охоплює кілька ключових напрямів: формування нових агрокліматичних умов у степовій зоні, підвищення ризиків деградації ґрунтів та опустелювання, загрозу соціально-економічної стабільності регіону, потребу у створенні нових моделей адаптації сільського господарства [6–9].

У цих умовах супутникові технології стають унікальним інструментом моніторингу та прогнозування [10; 11]. На відміну від традиційних статистичних методів, вони допомагають отримати оперативні та просторово детальні дані про стан земельних ресурсів, що є критичним для ухвалення управлінських рішень [12].

Метою досліджень є оцінка просторових і динамічних змін у стані агресурсів південного регіону України, спричинених підривом Каховської гідроелектростанції, з використанням супутникових даних.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Каховська ГЕС, введена в експлуатацію у 1956 р., була частиною каскаду дніпровських гідроелектростанцій. Її гребля формувала Каховське водосховище завдовжки до 240 км і завширшки до 23 км, з об'ємом понад 18 км³. Водосховище виконувало багатфункціональні завдання: виробництво електроенергії, забезпечення судноплавства, водопостачання промислових центрів (зокрема Кривого Рогу та Нікополя), а також живлення Північно-Кримського

та Каховського каналів, які були основою зрошувального землеробства [13].

Після вибуху, що зруйнував гідротехнічну споруду, відбувся неконтрольований скид води. Екологічні наслідки руйнування Каховської ГЕС стали предметом інтенсивних досліджень із 2023 р. Перші оцінки екологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС представлені у звітах міжнародних організацій. UNDP Ukraine [14] провела оперативну оцінку гуманітарних та екологічних наслідків катастрофи. ОСНА Ukraine [15] оцінила масштаби гуманітарної кризи у зоні затоплення та втрати доступу до води. З отриманих висновків можна стверджувати, що протягом перших десяти днів площа водного дзеркала зменшилася на 40%, а до кінця червня 2023 р. залишилося лише 12% початкового обсягу. До 2024 р. водосховище практично повністю висохло, залишивши лише русло р. Дніпро та окремі ізольовані водойми. Заданими Міністерства аграрної політики України, після підриву греблі без водопостачання залишилися 94% зрошувальних систем у Херсонській обл., 74% у Запорізькій та 30% у Дніпропетровській [16; 17]. Це означає, що понад 580 тис. га сільськогосподарських земель були фактично виведені з інтенсивного обробітку. Орієнтовні втрати врожайності зернових та олійних культур становлять близько 4 млн т на рік, що еквівалентно приблизно 1,5 млрд дол. США [6]. Так у роботах вітчизняних і зарубіжних науковців та практиків, зокрема В. Вишневським та ін. [18] окреслено наслідки руйнування Каховської ГЕС, які вплинули на трансформацію гідрологічного режиму нижньої течії р. Дніпра, що призвело до деградації зрошувальних систем, активізації ерозійних процесів, вторинного забруднення ґрунтів і вод, істотної втрати екосистемних послуг агроландшафтів. Поняття втрати екосистемних послуг у цьому контексті відображає зниження функціональної спроможності агроландшафтів забезпечувати регулювання гідрологічного режиму, підтримання ґрунтової родючості, стабілізацію мікроклімату та продукційні функції, що зумовлено трансформацією

водного балансу після руйнування Каховського вдсх.

Традиційні наземні методи не повною мірою здатні забезпечити визначення стану агроландшафтів після знищення Каховської ГЕС, які істотно обмежені в просторовому охопленні, періодичності спостережень та можливості функціонування в районах екологічної небезпеки й обмеженої доступності. У таких умовах технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стають незамінним інструментом моніторингу, забезпечуючи систематичне, об'єктивне та одночасне відстеження основних показників стану агроecosystem: динаміки вологості ґрунту, евапотранспірації, спектральних індексів рослинного покриву (NDVI, SAVI, NDWI, NMDI), а також просторово-часових закономірностей деградаційних процесів на регіональному й локальному рівнях. Дослідженнями акад. О.Г. Тараріко зі співавт. [19] доведено, що використання супутникових інформаційних ресурсів і методів дистанційного зондування створює сучасний потенціал для моніторингу та оцінки екологічного стану агросфери України, дозволяючи оперативнo виявляти зміни у земельних угіддях, зрошуваних площах та потенційно ризикованих ділянках для ефективного управління агросектором.

У своїх працях науковці М. Pchuk et al. [20] дослідили трансформацію рослинного покриву та водного балансу на території колишнього Каховського вдсх після руйнування ГЕС за допомогою супутникового моніторингу (NDVI і NDWI) у період 2022–2025 рр. Результати показали, що після руйнування Каховської ГЕС площа поверхневих вод зменшилася від більше 18 000 га до приблизно 3 000 га, площа оголеної ґрунтової поверхні збільшилася понад 50 000 га, а NDVI зріс від $-0,0156$ до $0,3421$, тоді як NDWI знизився від $0,0481$ до $-0,3535$, що свідчить про активне відновлення рослинності на оголеному дні водосховища та значну втрату води.

На відміну від більшості попередніх досліджень, які зосереджувалися переважно на описі гідрологічних, екологічних чи гу-

манітарних наслідків руйнування Каховської ГЕС, загальних моделях деградації земель або обмежених оцінках змін лише на дні колишнього водосховища за 1–2 індексами (зокрема NDVI та NDWI), дане дослідження вперше здійснює комплексну багаторічну мультиіндексну (NDVI, SAVI, NDWI, NMDI) оцінку просторово-диференційованої деградації саме агроландшафтів та зрошуваних агроecosystem у трьох областях з порівнянням ближніх (<50 км) і віддалених зон, що допомагає диференціювати безпосередній вплив зміни водного режиму і регіональних кліматичних тенденцій та сформувати агроecological підґрунтя для впровадження природоадаптованих технологій.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для здійснення дослідження та аналізу стану рослинності та деградаційних процесів застосовано комплексний підхід, що поєднує використання супутникових, кліматичних і ґрунтових даних у середовищах Google Earth Engine [21], QGIS [22], Copernicus Open Access Hub (Copernicus Data Space Ecosystem) [23] і Sentinel Hub EO Browser [24].

Для оцінки змін у рослинному покриві внаслідок трансформації гідрологічних умов у період 2020–2025 рр. було застосовано чотири спектральні індекси: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Normalized Difference Water Index (NDWI) та Normalized Multi-band Drought Index (NMDI) [25–28]. Кожен із них дав можливість охопити різні аспекти стану рослинності – від біомаси до водозабезпечення. Дослідження охопило три області – Дніпропетровську, Запорізьку та Херсонську, а також контроль – територію Біосферного заповідника «Асканія-Нова» імені Ф.Е. Фальц-Фейна (БЗ «Асканія-Нова»). Здійснено порівняння сільськогосподарських угідь, розташованих у межах 50 км від колишнього Каховського вдсх, із тими, що знаходяться на більшій відстані. Визначення деградаційних процесів та оцінюван-

ня екологічних ризиків для агроєкосистем регіону проводили за Vegetation Health Index (VHI) [29].

Гіпотеза дослідження полягала в тому, що ближні до водосховища території були більш залежні від зрошення і, відповідно, сильніше постраждали після його обміління.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Базовим індикатором для оцінки біопродуктивності та фотосинтетичної активності рослинності у дослідженні обрано NDVI — найпоширеніший спектральний показник у практиці супутникового моніторингу. У контексті аналізу впливу осушення Каховського вдсх на агроєкосистеми NDVI постає ключовим індикатором, що дає змогу простежити часову динаміку змін біомаси сільськогосподарських угідь.

Аналіз динаміки NDVI за період 2020–2025 рр. виявив чітку тенденцію до зниження індексу після червня 2023 р. — моменту руйнування дамби Каховської ГЕС (рис. 1, а).

Найбільш виражені негативні зміни зафіксовано у Херсонській обл., де середні значення NDVI зменшилися на 20–30% ($p < 0,05$), що свідчить про істотне скорочення біомаси внаслідок втрати джерела зрошення. У Запорізькій обл. зниження становило 15–20% зі статистичною значущістю на рівні $p \approx 0,05–0,1$. У Дніпропетровській обл. зміни були менш вираженими — до 10% і не мали достовірної статистичної різниці ($p > 0,1$), що вказує на відносно стабільність агроландшафтів.

Контрольна територія — БЗ «Асканія-Нова» — продемонструвала зниження NDVI на 10–15%, що, ймовірно, пов'язано із регіональною посухою, а не з припиненням зрошення, оскільки природна степова рослинність не залежала від штучного водопостачання.

З метою мінімізації впливу оптичних властивостей ґрунту на результати аналізу рослинного покриву застосовано індекс SAVI, який є модифікацією NDVI та допомагає точніше оцінити стан рослинності на

орних землях. Часова динаміка SAVI за період 2020–2025 рр. також характеризується чітким зниженням після червня 2023 р., що корелює із втратою джерела зрошення (рис. 1, б).

Найбільш виражене зниження зафіксовано у Херсонській обл., де середні значення SAVI зменшилися на 25% ($p < 0,05$), що свідчить про системне скорочення рослинного покриву на орних землях. У Запорізькій обл. негативна динаміка мала меншу амплітуду, тоді як у Дніпропетровській обл. індекс залишався відносно стабільним. У БЗ «Асканія-Нова» встановлено лише тенденцію до зниження SAVI ($p \approx 0,08$), що, ймовірно, пов'язано із регіональною посухою.

Для оцінки водного стану рослинного покриву використано індекс NDWI, який є особливо чутливим до змін у водонасиченості листків. У межах дослідження NDWI виявився найчутливішим індикатором до гідрологічних змін, спричинених осушенням Каховського вдсх (рис. 1, в). У Херсонській обл. середні значення NDWI після червня 2023 р. зменшилися більш ніж удвічі ($p < 0,01$), що вказує на катастрофічне скорочення вологості рослинного покриву та критичний рівень водного дефіциту. Щодо Запорізької обл. — зниження NDWI становило 15–20% ($p \approx 0,05$), тоді як у Дніпропетровській обл. індекс залишився стабільним. На території БЗ «Асканія Нова» спостерігалася помірне зменшення NDWI ($p \approx 0,08$), що, вірогідно, обумовлено регіональними кліматичними умовами, а не втратою зрошення.

Для оцінки рівня вологонасиченості ґрунтів та інтенсивності посушливих умов застосовано індекс NMDI, який є більш чутливим до змін вологості ґрунту та придатним для моніторингу тривалих процесів аридизації. Часовий аналіз NMDI підтвердив тенденцію до зменшення вологості ґрунтів після червня 2023 р. (рис. 1, г). У Херсонській обл. зафіксовано істотне падіння індексу ($p < 0,05$), що свідчить про формування хронічного водного дефіциту та деградацію ґрунтів. У Запорізькій обл. спостерігалася аналогічна, хоча менш ін-

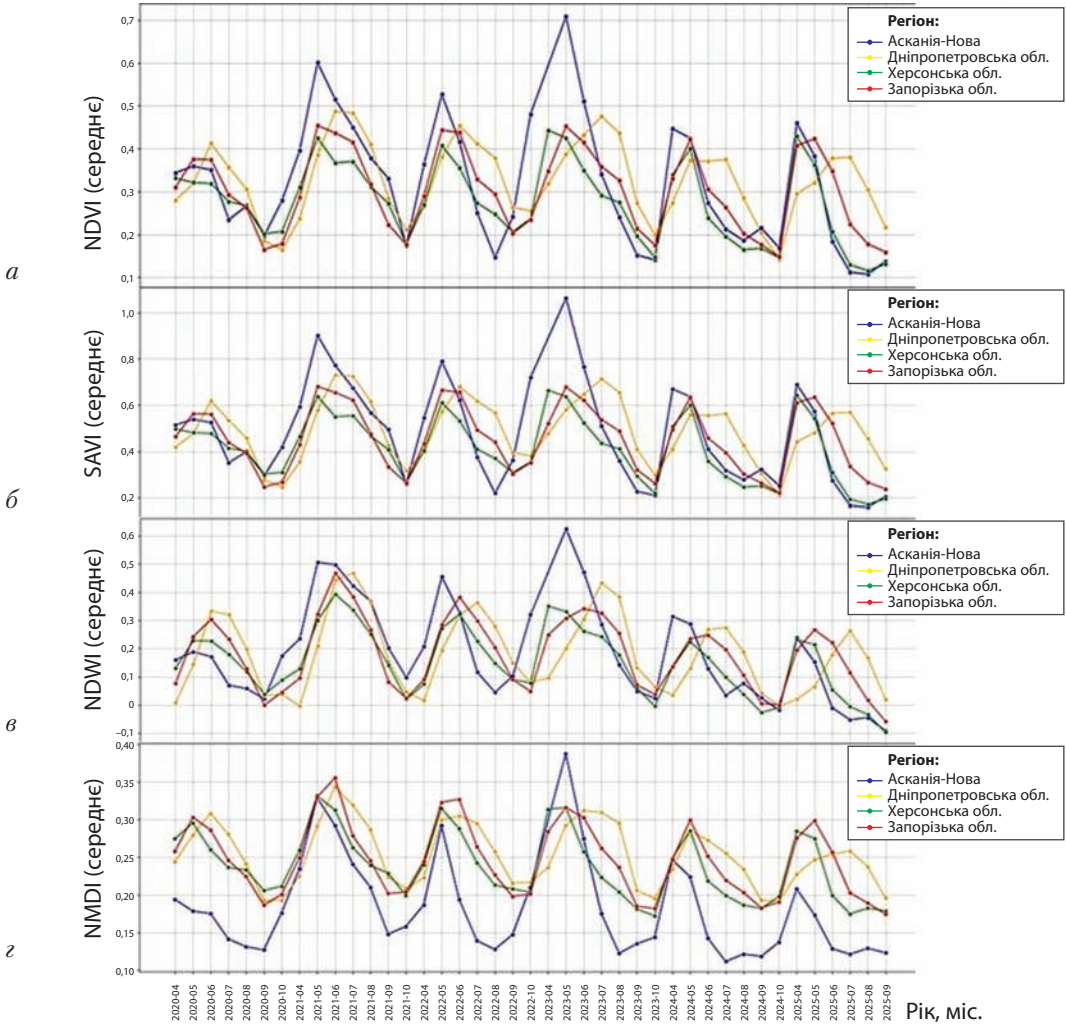


Рис. 1. Динаміка індексів NDVI (а), SAVI (б), NDWI (в) та NMDI (г) за період 2020–2025 рр.

Примітка: побудовано авторами.

тенсивна динаміка ($p \approx 0,05$). У Дніпропетровській обл. зміни не були статистично значущими, що вказує на збереження відносно стабільного водного режиму. У БЗ «Асканія-Нова» виявлено слабкий тренд до висихання ґрунтового покриву ($p \approx 0,1$), пов'язаний із регіональними кліматичними коливаннями.

Тому, аналіз часової динаміки спектральних індексів (див. рис. 1) підтвердив, що осушення Каховського вдсх призвело до

системного зниження біопродуктивності, вологості рослинного покриву та ґрунтів, найбільш вираженого у південних аграрних регіонах, передусім у Херсонській обл.

Для поглибленої оцінки просторової диференціації впливу втрати водопостачання проведено порівняльний аналіз спектральних індексів на сільськогосподарських угіддях у межах 50-км зони від території колишнього Каховського вдсх та за її межами.

Просторовий аналіз NDVI показав, що до листопада 2024 р. динаміка індексу залишалася подібною в обох зонах, однак у літній період 2025 р. значення NDVI на полях, розташованих ближче до колишнього водосховища, були істотно нижчими, що свідчить про посилення водного стресу в умовах відсутності зрошення.

Отже, NDVI став ефективним інструментом для виявлення деградаційних процесів у рослинному покриві, спричинених гідрологічними змінами. Його чутливість до змін у біомасі дає можливість не лише фіксувати факт зниження продуктивності, але й простежити просторову диференціацію впливу, що є критично важливим для планування адаптаційних заходів у сільському господарстві.

Аналіз SAVI підтвердив більш інтенсивну деградацію рослинного покриву в межах ближньої зони. У Херсонській обл. SAVI у межах 50 км знизився на 60–70%, тоді як у віддаленій зоні — на 50–55%. У Запорізькій обл. зменшення становило 45–50% у ближній зоні та 25–30% у віддаленій. У Дніпропетровській обл. зміни були менш вираженими — 35–40% у ближній зоні та 20–25% у віддаленій.

Просторовий розподіл NDWI засвідчив найбільш різку диференціацію між зонами. Так, у Херсонській обл. NDWI у ближній зоні знизився майже на 95%, тоді як у віддаленій — на 80%. У Запорізькій обл. зменшення становило 40% у межах 50 км та близько 20% за їх межами. Щодо Дніпропетровської обл. — зміни були незначними.

Аналіз NMDI також довів більшу інтенсивність деградації ґрунтового покриву поблизу колишнього водосховища. У Херсонській обл. індекс у ближній зоні знизився на 40–50%, тоді як у віддаленій — на 30–35%. У Запорізькій обл. падіння становило 30% у ближній зоні та 15% у віддаленій. А у Дніпропетровській обл. зміни були помірними — 25–30% у межах 50 км та 10–15% поза цією зоною.

Тому, просторовий аналіз спектральних індексів обґрунтував гіпотезу про значно вищу залежність агроландшафтів, розта-

шованих у безпосередній близькості до Каховського вдсх, від водопостачання. Поєднання часової динаміки та просторової диференціації дає можливість комплексно оцінити масштаби гідрологічного стресу та формує теоретично доведену основу для розроблення адаптаційних заходів у сільському господарстві.

Отже, аналіз просторової диференціації впливу руйнування Каховської ГЕС на стан агроєкосистем виявив істотні регіональні відмінності в характері та масштабах деградації рослинного покриву. Для кількісної оцінки цих відмінностей було проведено порівняльний аналіз динаміки спектральних індексів (NDVI, SAVI, NDWI, NMDI) у трьох обраних областях, які характеризуються різним ступенем залежності сільськогосподарського виробництва від зрошення та неоднаковою віддаленістю від Каховського вдсх. Регіональні особливості змін стану рослинності і вегетаційних умов внаслідок втрати зрошення наведено в *табл. 1*.

Представлені дані відображають як загальні тенденції деградації рослинного покриву після червня 2023 р., так і специфічні регіональні особливості, зумовлені локальними гідрологічними умовами, структурою посівних площ, наявністю альтернативних джерел водопостачання та станом зрошувальної інфраструктури. Особлива увага приділена порівнянню територій, розташованих у безпосередній близькості до колишнього водосховища (до 50 км), з більш віддаленими сільськогосподарськими угіддями, що допомогло верифікувати гіпотезу про залежність інтенсивності впливу осушення водойми на стан агроландшафтів від відстані до водосховища.

Отримані дані по Дніпропетровській обл. демонструють найменші зміни серед трьох досліджуваних регіонів. До червня 2023 р. всі індекси характеризувалися стабільною сезонною динамікою, що свідчило про нормальні умови зволоження. Після руйнування дамби спостерігається помірне зниження індексів у ближній зоні (<50 км), зі зниженням NDVI та SAVI на 26–27%, NDWI — на 30, а NMDI — на 28%. У від-

Таблиця 1. Порівняння вегетаційних індексів

Область*	Зона, км	NDVI (2020–2022)	NDVI (2024–2025)	Δ NDVI, %	SAVI (2020–2022)	SAVI (2024–2025)	Δ SAVI, %	NDWI (2020–2022)	NDWI (2024–2025)	Δ NDWI, %	NMDI (2020–2022)	NMDI (2024–2025)	Δ NMDI, %
I	<50	0,44	0,32	-27	0,66	0,49	-26	0,37	0,26	-30	0,32	0,23	-28
I	>50	0,37	0,34	-8	0,55	0,49	-11	0,33	0,28	-15	0,3	0,26	-13
II	<50	0,46	0,33	-28	0,67	0,5	-25	0,39	0,24	-38	0,33	0,21	-36
II	>50	0,41	0,35	-15	0,61	0,52	-15	0,36	0,29	-19	0,31	0,26	-16
III	<50	0,49	0,22	-55	0,73	0,31	-57	0,42	0,05	-88	0,32	0,18	-44
III	>50	0,43	0,28	-35	0,66	0,38	-42	0,38	0,08	-79	0,31	0,2	-35
IV	Контроль	0,49	0,36	-27	0,74	0,55	-26	0,41	0,29	-29	0,25	0,19	-24

Примітки: I – Дніпропетровська обл., II – Запорізька обл., III – Херсонська обл., IV – Асканія-Нова.

даленій зоні (>50 км) зміни є незначними (8–15%), що вказує на локалізований вплив втрати водосховища без системної деградації агроєкосистем.

Стосовно Запорізької обл., дані свідчать, що ця територія зазнала більш виражених змін, особливо у ближній зоні. До середини 2023 р. індекси NDVI та SAVI мали високі значення, що вказувало на сприятливі умови для рослинності. Після осушення водосховища NDVI та SAVI знизилися на 25–28%, NDWI – на 38, а NMDI – на 36%. У віддаленій зоні падіння становить 15–19%, що фіксує помірний вплив втрати зрошення. Різниця між зонами стала особливо помітною з другої половини 2023 р., що підтверджує просторову нерівномірність деградаційних процесів.

Херсонська обл. зазнала найсильнішого впливу, що пояснюється її безпосередньою близькістю до Каховського вдсх. У ближній зоні NDVI знизився на 55%, SAVI – на 57, NDWI – на 88, а NMDI – на 44%. У віддаленій зоні зниження індексів також значне: NDVI – на 35%, SAVI – на 42, NDWI – на 79, NMDI – на 35%. Така динаміка свідчить про формування хронічного водного стресу, що охоплює не лише зони, безпосередньо залежні від зрошення, але й ширші території, які раніше отримували опосередковану вигоду від водосховища.

Територія БЗ «Асканія-Нова», яка постає контролем у дослідженнях, демонструє зниження індексів на рівні 24–29%, що значно менше, ніж у Херсонській обл. загалом. Це підтверджує, що частина змін пов'язана із регіональними кліматичними коливаннями, але критичне падіння NDWI та NDVI у зонах зрошення є прямим наслідком втрати водосховища. Для території БЗ «Асканія-Нова» як контрольній території з природною степовою рослинністю, що не залежала від зрошення, також спостерігається зниження індексів, але воно є значно меншим, ніж у Херсонській обл. загалом. Це доводить, що частина змін пов'язана із кліматичними коливаннями, тоді як критичне падіння NDWI та NDVI у зонах зрошення є наслідком втрати водосховища.

Застосування спектральних індексів NDVI, SAVI, NDWI та NMDI у цьому дослідженні дало змогу здійснити комплексну оцінку змін у рослинному покриві та водному режимі агроландшафтів після осушення Каховського вдсх. Кожен із індексів виконав специфічну функцію, забезпечуючи багатовимірне розуміння деградаційних процесів. NDVI продемонстрував високу чутливість до змін у біомасі та фотосинтетичній активності рослин. Його значення чітко відображали просторову диференціацію впливу втрати зрошення, особливо у Херсонській обл., де падіння

перевищило 50–70%. NDVI виявився ефективним для загального моніторингу стану рослинності. SAVI як модифікація NDVI з урахуванням ґрунтового фону підтвердив зниження щільності рослинного покриву на орних землях. Його застосування допомогло уникнути переоцінки біомаси в умовах оголеного ґрунту, що є критично важливим для точного аналізу сільськогосподарських угідь. NDWI був найчутливішим індикатором до втрати води. Його значення у Херсонській обл. знизилися майже до нуля, що свідчить про катастрофічне зневоднення рослинного покриву. NDWI, який ефективно ідентифікує водний стрес і є ключовим інструментом для моніторингу зрошуваних систем, доповнив аналіз, дозволяючи оцінити вологонасиченість ґрунтів. Його значення підтвердили тенденції NDWI, особливо у зонах, що раніше залежали від зрошення. NMDI є корисним для довгострокового моніторингу посух і деградації ґрунтів.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що комбінація цих чотирьох індексів забезпечує надійний інструментарій для виявлення, кількісної оцінки та просторового аналізу змін у рослинності та водному режимі. Їх спільне використання дає можливість не лише фіксувати факт деградації, але й розрізнити її причини (зневоднення, втрату біомаси чи посуху), що є критично важливим для екологічного моніторингу та планування адаптаційних заходів у сільському господарстві.

Окремим завданням для досягнення поставленої мети було визначення деградаційних процесів та оцінка екологічних ризиків для агроєкосистем регіону. Тому індекс VHI широко застосовується для моніторингу посухи, оцінки стресу рослин та прогнозування врожайності і є комплексним показником, що інтегрує інформацію про стан рослинності на основі температурних та вегетаційних характеристик, отриманих із супутникових даних.

Результати аналізу за червень 2021 р. (до початку повномасштабного вторгнення РФ) показали переважно задовільний стан рослинності на території Дніпропе-

тровської, Запорізької та Херсонської обл. (рис. 2, а).

Лише поодинокі осередки слабкої та помірної посухи спостерігалися на півдні Херсонської обл., що свідчить про мінімальний рівень деградаційних процесів у цей період.

У червні 2023 р. переважна частина території Дніпропетровської, Запорізької та Херсонської обл. перебувала у задовільному стані ($VHI > 60$), що відображено темно-зеленим кольором на карті (рис. 2, б). Втім спостерігалися лінійні осередки сильної та екстремальної посухи (червоний і темно-червоний кольори), які простяглися вздовж долини р. Дніпро та південних районів Херсонської обл.

У червні 2024 р. ситуація істотно змінилася: площі з низькими значеннями VHI (сильна та екстремальна посуха) значно збільшилися, особливо в Херсонській обл. та частково в південних районах Запорізької, Дніпропетровська обл. залишала-ся переважно у задовільному стані, проте з'явилися локальні ділянки слабкої посухи (рис. 2, в). Це доводить про посилення кліматичних стресів та зростання ризику деградації агроєкосистем.

Найкритичніший прояв екстремальної та сильної посухи простежувався у червні 2025 р. на території Херсонської обл. Запорізька обл. мала також значні площі слабкої та помірної посухи, а Дніпропетровська — поодинокі осередки.

Отже, можна стверджувати, що використання супутникової інформації є ефективним інструментом для вивчення трансформації рослинного покриву та стану водного режиму за наслідками руйнації Каховського вдсх та кліматичних змін. Одержані результати є актуальними за розробки загальнодержавних і регіональних програм відновлення зрошення та заходів з адаптації сільськогосподарського виробництва до змін клімату на принципах скорочення емісії парникових газів у процесі аграрного виробництва, досягнення балансу між деградацією та відновленням ґрунтів та формування біоенергетичних низьковуглецевих агроєкосистем.

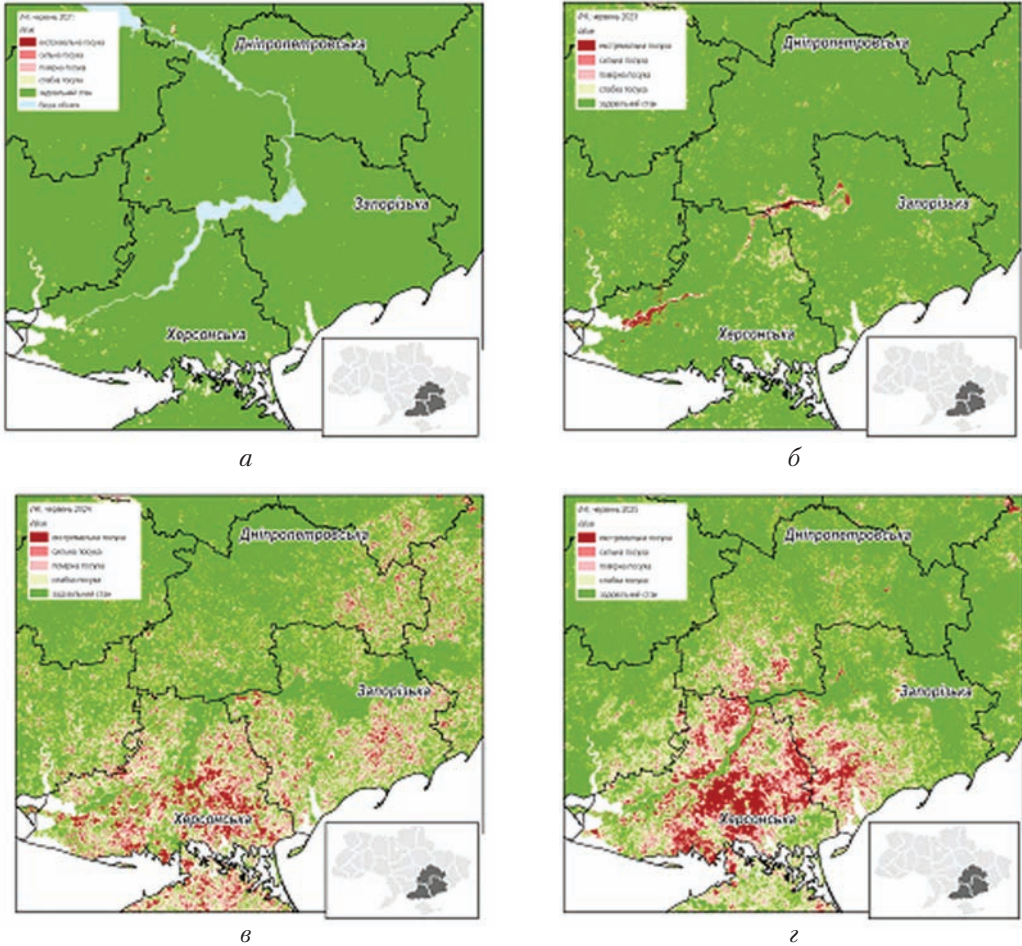


Рис. 2. Просторовий розподіл індексу VHI на території Дніпропетровської, Херсонської, Запорізької обл. у червні 2021 (а), 2023 (б), 2024 (в) та 2025 (г) рр.

Примітка: побудовано авторами.

ВИСНОВКИ

Руйнування Каховської ГЕС спричинило нерівномірну деградацію агроландшафтів із чітко вираженою просторовою залежністю по відстані до водосховища. У 50-кілометровій зоні зафіксовано критичне зниження вегетаційних показників: для Херсонської обл. NDVI знизився на 55%, SAVI — на 57, NDWI — на 88%, що свідчить про катастрофічне зневоднення та втрату біопродуктивності. Натомість у Дніпропетровській обл. деградація виявилася локалізованою (зниження показників

на 26–30%), що підтверджує гіпотезу про залежність інтенсивності екологічних наслідків від рівня попередньої залежності агроландшафтів від зрошення.

Комплексний аналіз індексу VHI за період 2021–2025 рр. виявив прогресивне розширення площ екстремальної та сильної посухи, особливо виражене у Херсонській обл. Порівняння з контрольною територією Біосферного заповідника «Асканія-Нова» імені Ф.Е. Фальц-Фейна (зниження показників на 24–29% проти 44–88% у зрошуваних зонах) дає змогу розмежу-

вати вплив регіональних кліматичних коливань від прямих наслідків втрати водопостачання. Це вказує на формування нового екологічного режиму з хронічним водним дефіцитом, який поглиблюється синергією антропогенних і кліматичних чинників.

Застосування чотирьох спектральних індексів (NDVI, SAVI, NDWI, NMDI) продемонструвало їхню диференційовану чутливість до різних аспектів деградації агроландшафтів. NDWI став найчутливішим маркером водного стресу (зниження до 88–95% у критичних зонах), тоді як SAVI забезпечив найточнішу оцінку втрати рослинного покриву з урахуванням ґрунтового фону. Статистична верифікація результатів *t*-тестами та критерієм Манна-Вітні підтвердила достовірність виявлених трендів ($p < 0,05$), що обґрунтовує використання мультиспектрального підходу як стандартизованої методології моніторингу наслідків масштабних гідрологічних катастроф.

Втрата функціонування 94% зрошувальних систем у Херсонській, 74 – у Запорізькій та 30% у Дніпропетровській обл. (загалом понад 580 тис. га) призвела до системної дестабілізації аграрного виробництва з орієнтованими втратами врожайності близько 4 млн т зернових та олійних культур на рік. Супутниковий моніторинг засвідчив не лише поточну деградацію, але

й формування передумов для довгострокового опустелювання південних агроландшафтів, що вимагає термінової розробки адаптаційних стратегій на засадах низьковуглецевого землеробства та альтернативних джерел водопостачання. Відновлення агроландшафтів має розглядатися також крізь призму відтворення їхніх екосистемних послуг, зокрема регулювання водного режиму, збереження ґрунтової родючості, підтримання біорізноманіття та забезпечення продовольчої безпеки, що відповідає концепції сталого управління природними ресурсами.

Дослідження доводить, що інтеграція платформ Google Earth Engine, QGIS, Copernicus Open Access Hub та Sentinel Hub EO Browser забезпечує оперативний, просторово детальний та науково валідний інструментарій для моніторингу масштабних екологічних трансформацій. На відміну від традиційних статистичних методів, супутниковий підхід допомагає визначати деградаційні процеси в режимі, наближеному до реального часу, що є критично важливим для прийняття управлінських рішень у сфері землекористування, водного менеджменту та розробки регіональних програм адаптації до кліматичних змін у контексті досягнення цілей сталого розвитку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M. S., Baek, I., Kabenge, I., & Cho, B.-K. (2023). Remote sensing in field crop monitoring: A comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances. *Remote Sensing*, 15(2), 354. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15020354>.
2. Осадчий, В. І. (2025). Каховське водосховище після катастрофи: сучасний стан, виклики та стратегія відновлення (стенограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 16 квітня 2025 р.). *Вісник НАН України*, 7, 62–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2025.07.062>.
3. Дупляк, В., Величко, С., & Дупляк, О. (2023). Наслідки руйнування Каховського водосховища для зрошення та водопостачання півдня України. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*, 44, 19–28. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.19-28>.
4. Romashchenko, M., Faybishenko, B., Onopriienko, D., Napich, H., Novitskiy, R., Dent, D., ... Roubik, H. (2025). Prospects for restoration of Ukraine's irrigation system. *Water International*, 50(2), 104–120. DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718>.
5. Spears, B. M., Harpham, Q., Brown, E., Barnett, C. L., Barwell, L., Collell, M. R., ... Wood, M. D. (2024). A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*, 8(5), 834–836. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0>.
6. Truth Hounds & Project Expedite Justice. (2024). *Затоплено війною: дослідження руйнування Каховської греблі та його наслідки для екосистеми, аграріїв, цивільного життя та міжнародного правосуддя*. URL: <https://truth-hounds.org/cases/zatopleno-vijnoyu-doslidzhennya-rujnuvannya-kahovskoyi-grebl-i-ta-jogo-naslidy-dlya-ekosystemy-agrariyiv-czyvilnogo-zhyttya-ta-mizhnarodnogo-pravosuddya/>.
7. Tsaryk, L., & Kuzyk, I. (2023). Russian-Ukrainian War: Environmental Aspect. *Scientific Notes Ternopil*

- National Volodymyr Hnatyuk Pedagogical University. Ser.: Constructive Geography and Geoecology, 53, 2, 100–106.*
8. Tuchkovenko, Y. S., & Stepanenko, S. (2023). The impact of destruction of the Kakhovka dam on the environmental status of the Odesa area of the Black Sea. *Problems of Water Supply Sewerage and Hydraulics, 44*, 71–80. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80>.
 9. Пічура, В. І., Потравка, Л. О., & Білошкуренко, О. С. (2025). Дослідження наслідків руйнації Каховської дамби та осушення водосховища для населення України. *Водні біоресурси та аквакультура, 1*(17), 218–247. DOI: <https://doi.org/10.32782/wba.2025.1.20>.
 10. Тараріко, О. Г., Ільєнко, Т. В., Кучма, Т. Л., Власова, О. В., Солоха, М. О., Зубов, А. О., & Білокінь, О. А. (2024). *Супутниковий моніторинг ерозійно деградованих агроландшафтів: наук.-метод. та практ. рек.* Київ: Аграрна наука. DOI: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-605-1>.
 11. Freitas, M. W., & Santos, J. R. (2014). Zoneamento hierárquico da paisagem nos domínios da Bacia do Rio Uruguai. *Sociedade & Natureza (online), 26*, 287–300. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-451320140207>.
 12. 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. *Агроекологічний журнал, 2*, 6–21. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2022.263312>.
 13. Саніна, І. В., & Люта, Н. Г. (2023). Екологічні наслідки підриву греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінеральні ресурси України, 2*, 50–55.
 14. World Bank, Government of Ukraine, European Commission, & United Nations. (2024). Ukraine: Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): February 2022 — December 2023. URL: <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2024-02/UA%20RDNA3%20report%20EN.pdf>.
 15. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. (2023). Ukraine Khakovka Dam — 9 June 2023. URL: <https://www.unocha.org/media-centre/ukraine-khakovka-dam-9-june-2023>.
 16. Міністерство аграрної політики та продовольства України. (2023). Знищення росіянами Каховської ГЕС завдало значних збитків сільському господарству України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/znyshchennia-rosiianamy-kakhovskoi-hes-zavdalo-znachnykh-zbitkyk-silskomu-hospodarstvu-ukrainy>.
 17. Андрусевич, А., Короткий, Т., Марушевський, Г. Медведева, М., Польовий, М., Тропін, З., & Хендель, Н. (2023). *Попередній екологічний та юридичний аналіз руйнування Каховської ГЕС і його наслідків (аналіз звіту)*. Київ.
 18. Vyshnevskiy, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Y., & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International, 48*(5), 631–647.
 19. Тараріко, О. Г., Дем'янюк, О. С., Ільєнко, Т. В., Солоха, М. О., & Лиховид, П. В. (2025). Супутниковий інформаційний ресурс — сучасний потенціал для вирішення екологічних проблем агросфери України. *Збалансоване природокористування, 1*, 55–71. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.328357>.
 20. Ilchuk, M., Zatserkovnyi, V., Stakhiv, I., Lyashchenko, O., & Ilchenko, O. (2025). *Satellite-based monitoring of land cover transformation after the Kakhovka Dam collapse (2022–2025): Remote sensing for environmental monitoring*. URL: <https://www.openreviewhub.org/uk/node/8386>.
 21. Google Earth Engine — for planetary-scale geospatial analysis. URL: <https://earthengine.google.com/>.
 22. QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. URL: <https://qgis.org>.
 23. Copernicus Open Access Hub (Copernicus Data Space Ecosystem). (n.d.). Платформа доступу до супутникових даних програми Copernicus. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/>.
 24. Sentinel Hub EO Browser. Online platform for accessing and visualizing Sentinel satellite imagery. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.
 25. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment, 8*(2), 127–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
 26. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment, 25*(3), 295–309. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
 27. Gao, B. C. (1996). NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment, 58*(3), 257–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
 28. Wang, L., & Qu, J. J. (2007). NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters, 34*(20). DOI: <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>.
 29. Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research, 15*(11), 91–100. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T).

Дата першого надходження рукопису до редакції: 16.12.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.01.2026
 Дата публікації: 27.02.2026

СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ІНДЕКСИ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ ЯК ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АГРОЕКОСИСТЕМ ЗА КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Д.М. Шерстюк, Т.В. Ільєнко

*Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: volaf666@gmail.com; ORCID: 0009-0001-1687-5974
e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5406-5449*

Дослідження присвячене розробці методологічного підходу до моніторингу змін рослинного покриву України в умовах кліматичних трансформацій із застосуванням супутникових технологій. На прикладі полігону у Вишгородському р-ні Київської обл. проведено аналіз різноманітних об'єктів — водних, аграрних, лісових, лучних та урбанізованих територій — із використанням мультиспектральних даних Sentinel-2 (рівень L2A) за 2018 р. та 2025 р. Розраховано низку спеціалізованих індексів хлорофілу: CVI (Chlorophyll Vegetation Index), CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index), MTVI2 (Modified Triangular Vegetation Index), MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index) та GNDVI. Геопросторову обробку та візуалізацію здійснено в програмному середовищі QGIS за допомогою розрахункових формул для кожного індексу з урахуванням спектральних каналів Sentinel-2. Застосовано аналітичний метод порівняльного аналізу індексів з використанням функції Elevation Profile для візуалізації змін значень та отримання точних кількісних показників, що дало можливість оцінити їхню чутливість до фізіологічних параметрів рослинності та локальних відмінностей між типами землекористування. Порівняльний аналіз показав, що індекси хлорофілу забезпечують більш деталізоване відображення фотосинтетичної активності та пігментного складу рослин порівняно з узагальненим NDVI. Встановлено їхню здатність диференціювати хвойні та широколистяні деревостани, а також виявляти вплив урбанізації та аграрної діяльності. Валідація результатів за кліматичними даними NASA Giovanni (AIRS) за 2015–2022 рр. підтвердила кореляцію між підвищенням температури, зростанням концентрації CO₂ та змінами індексних значень, що відображають подовження вегетаційного періоду та посилення рівня хлорофілу. Наукова новизна роботи полягає у комплексному застосуванні спектральних індексів для багатоконпонентного середовища, що включає водні, аграрні, лісові та урбанізовані ділянки, що допомагає отримати більш точну картину екологічних процесів. Практичне значення подовження — у можливості використання запропонованої методики для моніторингу продуктивності агроєкосистем, оцінки стійкості лісових масивів та прогнозування ризиків деградації земель, що створює підґрунтя для розробки адаптивних стратегій управління природними та агроєкосистемами України в умовах глобальних кліматичних викликів, а також для інтеграції результатів у національні системи екологічного моніторингу та плануванні сталого розвитку.

Ключові слова: Sentinel-2, CVI, CARI, MTVI2, MCARI, QGIS, кліматичні показники, Copernicus BROWSER, рослинний покрив.

ВСТУП

Клімат наразі втрачає свою передбачуваність та стабільність внаслідок зміни характеристик, які були викликані збільшенням рівня CO₂ та загальною температурою, що є важливим регулятором клімату, екосистемі в якій ми проживаємо. За даними Міжурядової панелі з питань зміни клімату (IPCC), антропогенна діяльність спричи-

нила підвищення глобальної температури на 1,1°C порівняно з доіндустріальним періодом, що супроводжується критичними змінами у структурі та функціях рослинного покриву [1].

Унаслідок такої бурхливої активності дані про стан рослин можуть не збігатися або хибно інтерпретуватися через антропогенний вплив під час дослідження інших чинників. Особливої актуальності

ця проблема набуває в контексті України, де поєднуються інтенсивна аграрна діяльність, урбанізація та кліматичні зміни, що ускладнює об'єктивну оцінку екологічного стану територій.

Традиційні методи моніторингу рослинності, зокрема широко використовуваний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), попри свою універсальність, не завжди дають можливість диференціювати природні кліматичні чинники від антропогенного впливу за дослідження великих територій. Це створює критичний методологічний розрив у сучасній екологічній науці, особливо за умов прискорення темпів кліматичних змін та зростання антропогенного тиску на природні екосистеми.

Зростаюча концентрація CO₂ в атмосфері, яка за останнє десятиліття перевищила 420 ppm, безпосередньо впливає на фотосинтетичні процеси рослин, підвищуючи рівень хлорофілу та змінюючи тривалість вегетаційного періоду. Водночас паралельні процеси урбанізації, зміни землекористування та лісогосподарської діяльності створюють складну мозаїку впливів, які традиційні методи дистанційного зондування часто не здатні розмежувати.

Актуальність розробки нових підходів до моніторингу підкреслюється необхідністю забезпечення продовольчої безпеки, збереження біорізноманіття та адаптації до кліматичних змін. За прогнозами ФАО, до 2050 р. попит на харчові продукти зросте на 70%, що вимагає точного розуміння динаміки продуктивності рослинного покриття та чинників, що її визначають.

Це створює потребу у розробці більш точних методик оцінки стану рослинності з урахуванням кліматичних змін, що і визначає актуальність даного дослідження. У цьому контексті спеціалізовані індекси хлорофілу представляють перспективну альтернативу традиційним підходам, оскільки вони демонструють вищу чутливість до фізіологічних змін рослин та допомагають більш точно відокремлювати сигнали кліматичних змін від антропогенних впливів.

Мета дослідження — обґрунтувати використання спеціалізованих індексів хлорофілу (CVI, CARI, MTVI2, MCARI, LCI, GNDVI) як більш точної альтернативи NDVI для виявлення впливу кліматичних змін на рослинний покрив України з мінімізацією впливу антропогенних чинників на результати досліджень.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Глобальні кліматичні зміни продовжують чинити зростаючий тиск на екосистеми, викликаючи зміну рослинного покриття, деградацію земель і втрату біорізноманіття. Сучасні дослідження зосереджені на розробці методів оцінки цих змін, прогнозуванні наслідків, а також створенні систем адаптації та зменшення ризиків. В останніх дослідженнях велику увагу приділено поєднанню методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційних технологій (ГІС) та машинного навчання. Наприклад, у патентному дослідженні О.В. Ковирьової (2019) запропоновано інноваційний підхід до визначення змін у рослинному покритті внаслідок кліматичних змін і діяльності людини. Технологія передбачає багатофакторний аналіз із застосуванням супутникових даних Sentinel, вегетаційних індексів та статистичної моделі для визначення просторових закономірностей деградації покриття. Запропоновані алгоритми дають можливість встановити причинно-наслідкові зв'язки між змінами клімату, антропогенним тиском і змінами екосистем [2].

У дослідженні Н.І. Рябчун (2009) описано методику виявлення антропогенно-кліматичних чинників впливу на рослинність за допомогою індексу NDVI, класифікації покриття і фіксування змін багаторічної динаміки. Автори демонструють практичне застосування супутникових даних MODIS, а також GIS-аналізу для моніторингу екологічного стану територій, що зазнали трансформації. Результати дослідження підтверджують ефективність використання супутникових даних як інструменту для виявлення просторових проявів деградації [3].

Для динамічного моніторингу змін рослинності були розроблені відповідні методи і пристрої з застосуванням алгоритмів аналізу часових рядів супутникових знімків (Шерер, 2007). Особливістю підходу є адаптивне налаштування порогових значень для кожного регіону та класифікація на основі методів машинного навчання. Такий підхід дає змогу підвищити точність і ефективність виявлення локальних змін біомаси у різні сезони та роки [4].

У дослідженні Yi Lang (2022) було здійснено глибокий аналіз змін рослинного покриву в басейні р. Янцзи, як результату поєднаного впливу кліматичних змін і людської діяльності. Було використано NDVI, дані про температуру, кількість опадів та землекористування, що допомогло встановити пріоритетні чинники зміни екосистем і виявити більш значний вплив кліматичних чинників у верхній течії річки, тоді як у нижній течії домінує антропогенний вплив [5].

Значну роль у прогнозуванні змін лісових екосистем відіграє застосування геопросторових даних. У публікації Dan M. Savastru (2019) обґрунтовано використання супутникових знімків, даних LIDAR і геопросторових баз для оцінки впливу змін клімату на ліси. У дослідженні розроблено індикаторну модель, яка дає можливість враховувати вразливість лісових ресурсів, сценарії кліматичних змін і природну адаптивну здатність екосистем [6].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження виконано на території полігону у межах Вишгородського р-ну Київської обл., що охоплює Київське водосховище, фрагменти сільськогосподарських угідь, лісові масиви різного типу, лучну рослинність, населені пункти та елементи транспортної інфраструктури. Така комбінація водних, лісових, лучних, аграрних та урбанізованих об'єктів створює репрезентативні умови для порівняльної оцінки чутливості спектральних індексів хлорофілу щодо різних типів підстильної поверхні та інтенсивності антропогенного навантаження.

Як вихідні дані використано мульти-спектральні супутникові знімки Sentinel-2 (рівень L2A з атмосферною корекцією), відібрані за критеріями мінімальної хмарності та повного накриття дослідної ділянки за 2.06.2018 та 8.06.2025. Для розрахунку індексів залучено спектральні канали у видимому, ближньому та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах із просторовою роздільною здатністю 10–60 м (*табл. 1*).

Таблиця 1. Канали Sentinel-2, використані для розрахунку індексів, їх діапазони і просторова роздільна здатність [7]

Канали індексів	Діапазон, просторова роздільна здатність
B3 (Green)	560 нм, 10 м
B4 (Red)	665 нм, 10 м
B5 (Red edge)	705 нм, 20 м
B8 (Near IR)	842 нм, 10 м
B8A (Narrow Near IR)	865 нм, 20 м

У роботі проаналізовано низку індексів, чутливих до вмісту хлорофілу та структурних характеристик рослинного покриву: NDVI, GNDVI, CIVI, CARI, LCI, MCARI, MTVI2 та комбінований показник MCARI/MTVI2. Їх формули та адаптовані вирази для супутника Sentinel-2 в програмному середовищі QGIS [8] наведено в *табл. 2*. Вибір саме цих індексів зумовлений їх здатністю уточнювати оцінку фізіологічного стану рослин порівняно з узагальнювальним індексом NDVI, а також можливістю виділення локальних відмінностей між різними типами рослинності та класами землекористування.

Підбір спектральних каналів здійснювали з урахуванням вимог до індексів хлорофілу, використовуючи базу Index Database для перевірки коректності їх застосування до сенсора Sentinel-2 (*табл. 3*).

Геопросторову обробку даних виконано в програмному середовищі QGIS. На основі вихідних каналів Sentinel-2 у модулі Raster Calculator розраховано растрові шари індексів згідно з наведеними формулами, після чого знімки було обрізано за контуром полігону дослідження.

Таблиця 2. Формули індексів та їх адаптація для супутника Sentinel-2 у програмному середовищі програми QGIS [9; 10]

Індекс	Формула	QGIS Formula
NDVI	$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$
GNDVI	$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Green}}{\text{NIR} + \text{Green}}$	$(B8 - B3) / (B8 + B3)$
CVI	$\text{CVI} = \frac{R750}{R705} - 1$	$(B8 - B4) / B4$
CARI	$\left(\frac{R700}{R670} \right) \frac{\sqrt{(a \cdot 670 + R670 + b)^2}}{(a^2 + 1)^{0.5}}$ $a = (R700 - R550) / 150,$ $b = (R550 - ((R700 - R550) / 150 * 550))$	$\text{ABS}(((B5 - B3) / 150) \times B4 + (B3 - ((B5 - B3) / 150) \times 550)) / \text{sqrt}(((B5 - B3) / 150)^2 + 1)$
LCI	$\text{LCI} = \frac{R865 - R665}{R865 + R705}$	$(B8A - B4) / (B8A + B5)$
MCARI	$\text{MCARI} = [(R700 - R670) - 0,2 \cdot (R700 - R550)] \cdot \left(\frac{R700}{R670} \right)$	$((B5 - B4) - 0,2 \times (B5 - B3)) \times (B5 / B4)$
MTVI2	$\text{MTVI2} = \frac{1,5[1,2(R800 - R550) - 2,5(R670 - R550)]}{\sqrt{(2R800 + 1)^2 - (6R800 - 5\sqrt{R670})} - 0,5}$	$(1,5 \times (1,2 \times (B8 - B3) - 2,5 \times (B4 - B3))) / \text{sqrt}((2 \times B8 + 1)^2 - (6 \times B8 - 5 \times \text{sqrt}(B4)) - 0,5)$
MCARI/ MTVI2	$\frac{\text{MCARI}}{\text{MTVI2}} = \frac{\text{MCARI}}{\text{MTVI2}}$	$((B5 - B4) - 0,2 \times (B5 - B3)) \times (B5 / B4) / ((1,5 \times (1,2 \times (B8 - B3) - 2,5 \times (B4 - B3))) / \text{sqrt}((2 \times B8 + 1)^2 - (6 \times B8 - 5 \times \text{sqrt}(B4)) - 0,5))$

Примітки: Green, RED, NIR – значення КСВ відповідно в зеленій, червоній та ближній ІЧ зонах спектра; $R\lambda$ – значення КСВ для довжини хвилі λ нм; B_i – значення КСВ в i -тому каналі супутника Sentinel-2; КСВ – коефіцієнт спектрального відбиття.

Таблиця 3. Індеси хлорофілу, канали та їх просторова роздільна здатність

Індеси	Діапазон нм. Канал Sentinel-2	Просторова роздільна здатність
CVI	705 B5	20 м
	740–750 B6	20 м
GNDVI	842 B8	10 м
	560 B3	10 м
MCARI/MTVI2	550 B3	10 м
	670 B4	10 м
	700 B5	20 м
	800 B8	10 м

Індекси	Діапазон нм. Канал Sentinel-2	Просторова роздільна здатність
CARI	865 B8A	20 м
	705 B5	20 м
	665 B4	10 м
LCI	865 B8A	20 м
	705 B5	20 м
	665 B4	10 м

Порівняльний аналіз індексів проведено на основі дослідження їхніх гістограм та ключових статистичних характеристик (мінімум, максимум, середнє значення, медіана, стандартне відхилення) для одних і тих самих ділянок. Для аналізу просторової мінливості індексних значень використано інструмент Elevation Profile View: уздовж заданих лінійних відрізків, прокладених через водні об'єкти, аграрні поля, лісові масиви, луки, населені пункти та лінійну інфраструктуру, побудовано профілі інтенсивності індексів та отримано точкові кількісні значення. Дистанцію профілів уніфіковано в метрах, що забезпечило коректне порівняння різних розрізів.

Для перевірки узгодженості супутникових показників із кліматичними умовами здійснено валідацію на основі даних платформи NASA Giovanni [11] для території України за 2015–2022 рр. (концентрація CO₂ за даними AIRS та температурні характеристики). Статистичне порівняння часових рядів індексів із клімато-атмосферними змінними дало змогу виявити загальні тренди та можливі систематичні відхилення інтерпретації супутникових оцінок.

Тому, обрана комбінація різнотипних об'єктів на дослідному полігоні, інструментарій Sentinel-2, система індексів хлорофілу та комплекс процедур геопросторового й статистичного аналізу забезпечують можливість цілісної оцінки ефективності спектральних індексів для моніторингу стану рослинного покриву та встановлення антропогенних змін ландшафтів, за аналогією до підходу, реалізованого в попередніх роботах з аналізу спектральних індексів на основі Sentinel-2.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Індекси хлорофілу становлять інформативний та практично значущий інструмент для дослідження рослинного покриву на великих територіях. Вони дають змогу детально характеризувати фізіологічний стан рослинності та забезпечують більш коректне зіставлення (зокрема кореляційний аналіз) з іншими спектральними показниками, як-от NDVI, що підвищує точність і надійність інтерпретації результатів. Перевага індексів хлорофілу полягає в їхній більш тісній пов'язаності саме з фотосинтетичною активністю та пігментним комплексом рослин, тоді як узагальнені вегетаційні індекси відображають стан рослинності більш інтегрально.

Крім того, широкє розмаїття наявних індексів хлорофілу дає змогу добирати їх з урахуванням видового складу та морфологічних особливостей місцевої флори. Це створює передумови для диференційованого виділення окремих груп рослин, зокрема хвойних і широколистяних деревостанів, оскільки форма, просторове розміщення та анатомічна будова листків істотно впливають на характер відбиття випромінювання й, відповідно, на значення індексів. Зазначений підхід є особливо корисним для аналітичних досліджень, спрямованих на діагностику стану рослинного покриву, фіксування просторових відмін та оцінювання впливу антропогенних і кліматичних чинників.

У межах цієї роботи було відібрано низку вегетаційних індексів хлорофілу, розрахованих за даними одного з найпоширеніших та доступних джерел супутникової

інформації — Sentinel-2 (див. *табл. 2*), та здійснено оцінку їхньої ефективності для моніторингу різнотипних об'єктів рослинного покриву.

CVI (Chlorophyll Vegetation Index) призначений для оцінювання вмісту хлорофілу за спектральними діапазонами, чутливими до пігментів, зокрема вузькими червоними та NIR-каналами Sentinel-2. Індекс вирізняється підвищеною чутливістю на ранніх і середніх етапах вегетації, проте його стабільність знижується за значних варіацій освітлення та атмосферних умов [12].

GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) — є модифікацією NDVI із заміною червоного каналу на зелений. Це підвищує чутливість до вмісту хлорофілу в листках, особливо на початкових стадіях розвитку рослин, коли зміни у фізіологічному стані ще слабо відображаються в традиційних вегетаційних індексах [12].

Індекс CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index) оцінює інтенсивність поглинання хлорофілу в червоній ділянці спектра та точніше реагує на зміну його вмісту, а не лише на щільність пологу чи LAI. Водночас індекс є чутливим до шуму у вузьких спектральних смугах і потребує ретельної калібровки [13].

LCI (Leaf Chlorophyll Index) використовує спектральні ділянки Red Edge («червоного краю») для оцінки хлорофілу в листках. Попри орієнтацію на високоспектральні дані, добре адаптується до Sentinel-2 завдяки наявності вузькосмугових каналів. Демонструє менше насичення на ділянках густої рослинності та кращу чутливість до змін хлорофілу порівняно з NDVI [12].

MCARI спрямований на зменшення впливу тіней, яскравості та структурних особливостей пологу. Як модифікація CARI, він є більш чутливим до концентрації хлорофілу, зокрема за середньої щільності рослинного покриву, та краще відокремлює вплив ґрунтового фону й структури пологу, залишаючись водночас чутливим до спектральних шумів [13].

MTVI2 (Modified Triangular Vegetation Index 2) — нормалізує вплив структури рослинного покриву, враховуючи неліній-

ність спектральної відповіді за високої біомаси. Показує менше насичення за високих значень LAI та ефективніше працює на різних ґрунтових фонах, відображаючи структурно-біомасні характеристики рослинності [13].

MCARI/MTVI2 — поєднує властивості двох індексів, зменшуючи вплив ґрунтового фону та освітлення. Однак на основі доступних даних і літературних джерел він продемонстрував найгіршу ефективність, яка обмежена просторовою роздільністю Sentinel-2, тому він придатний лише для невеликих територій із використанням високороздільних даних [13].

Для цілісної оцінки можливостей спектральних індексів хлорофілу в межах дослідного полігону виділено тестові ділянки з різнотипними об'єктами: лісовими масивами, сільськогосподарськими угіддями, водоймами та урбанізованими територіями (*рис. 1*).

Під час виконання досліджень були отримані растри вище наведених індексів за супутниковими даними Sentinel-2 (02.06.2018 та 08.06.2025). Для візуального порівняння поведінки спектральних індексів на різних типах поверхні було розглянуто NDVI та CARI (*рис. 2*). Візуальне зіставлення індексів NDVI та CARI на одній і тій самій території допомогло оцінити їхню диференційну чутливість до типів підстильної поверхні. В обох випадках добре окреслюються її основні типи: русло річки й прибережна смуга, мозаїка сільськогосподарських угідь, лісові масиви та урбанізовані території. Втім виявлено істотні відмінності в контрастності та чутливості до різних типів покриву.

Водні об'єкти NDVI визначає як ділянки з найнижчими значеннями (світло-зелені відтінки). CARI характеризується вищою контрастністю між водою та прибережною рослинністю, що забезпечує чіткіше окреслення меж водойм.

Лісові масиви на NDVI відображаються насиченими темно-зеленими тонами. CARI показує аналогічну інтенсивність, проте виявляє більшу диференціацію всередині деревостанів, що вказує на різницю

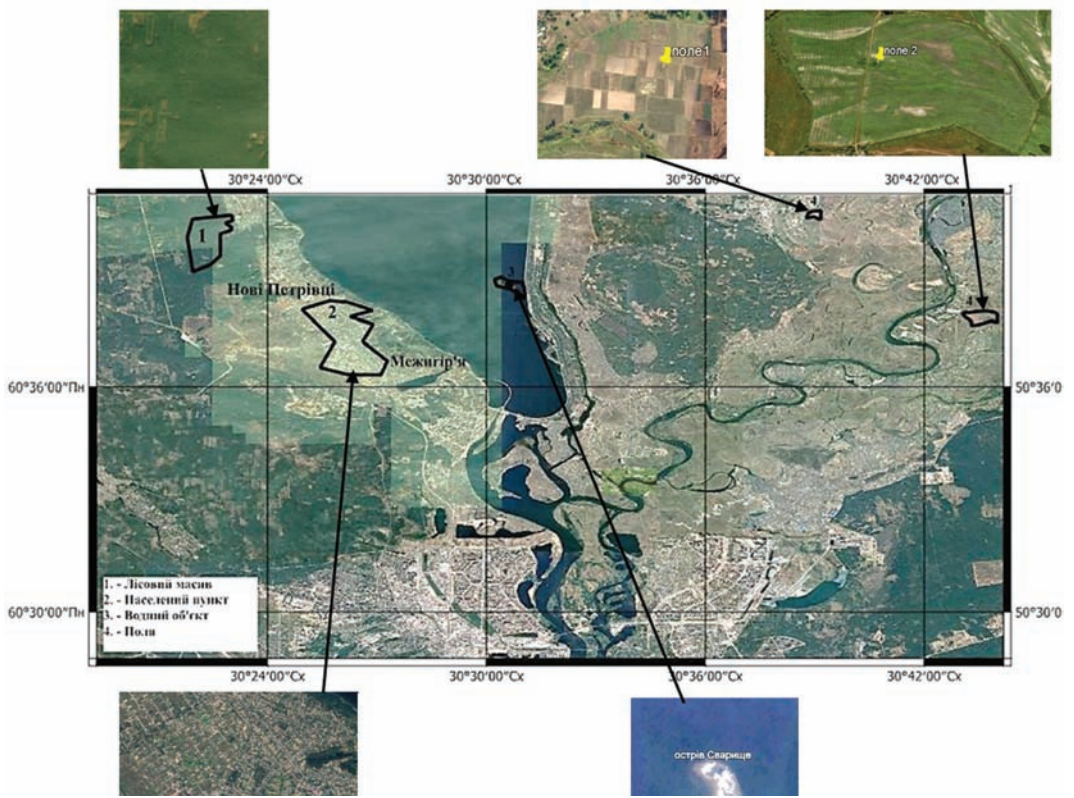


Рис. 1. Дослідний полігон з тестовими ділянками

Примітка: створено авторами з використанням супутникових зображень Google Maps.

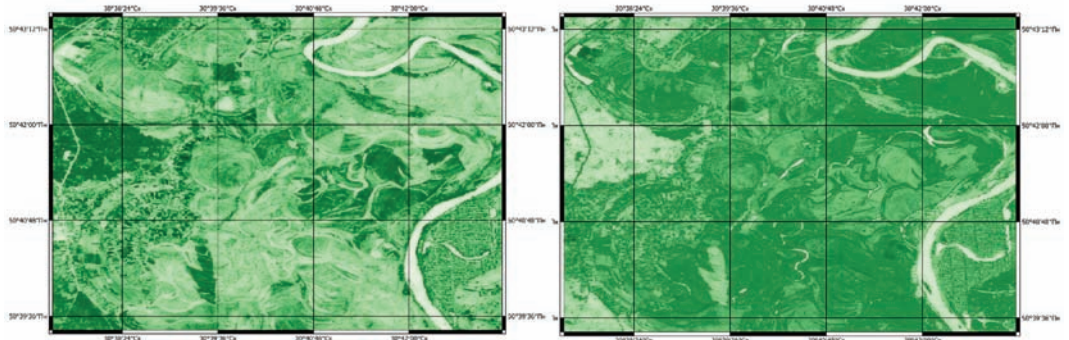


Рис. 2. Растри індексів NDVI та CARI за даними Sentinel-2 08.06.2025 р.

Примітка: створено авторами.

в концентрації хлорофілу між окремими фітоценозами.

Сільськогосподарські поля NDVI представляє помірними значеннями (середньо-зелені відтінки). CARI демонструє вищу варіабельність, що дає змогу краще розрізняти окремі поля з різним станом посівів, із виразнішою текстурою та чіткішими межами між ділянками.

Антропогенні об'єкти, як-от дороги, проєкти та забудовані ділянки проявляються на обох зображеннях як світлі лінії та плями. CARI визначає ці об'єкти з вищою чіткістю, особливо дрібні елементи інфраструктури, що пов'язано з меншою чутливістю до фонового відбиття ґрунту.

Отже можна зробити висновок, що NDVI забезпечує згладжене відображення рослинного покриву, ефективно для загального картування вегетації, тоді як CARI фіксує підвищену чутливість до варіацій вмісту хлорофілу, вищу просторову мінливість значень та кращу диференціацію окремих типів рослинності, що підтверджує його перспективність для детального моніторингу стану фітоценозів та встановлення локальних змін.

Детальне вивчення ефективності індексів здійснюється шляхом їх статистичного аналізу. Об'єднана гістограма (рис. 3)

демонструє частотний розподіл за 2018 і 2025 рр. значень п'яти спектральних індексів CVI, GNDVI, LCI, NDVI та MTVI2, що використовуються для оцінки стану рослинного покриву. Для більшості показників (NDVI, GNDVI, LCI, CVI) основна маса значень зосереджена в діапазоні низьких і середньопозитивних інтервалів, що відповідає домінуванню територій із помірно розвиненістю рослинного покриву. Порівняльний аналіз частотних розподілів індексів між 2018 та 2025 рр. виявив тенденцію до зменшення значень у бік вищих інтервалів, що може свідчити про загальне підвищення вегетаційної активності та вмісту хлорофілу в рослинному покриві. Найбільш виразні зміни спостерігаються у зменшенні піків низьких значень: якщо у 2018 р. для більшості індексів фіксувалися високі частоти в діапазоні 0,1–0,2 (особливо для CVI з піком ~80), то у 2025 р. розподіл стає більш рівномірним із підвищенням частки середніх та високих значень. Така динаміка вказує на зменшення площ із низькою вегетаційною активністю та зростання просторової неоднорідності рослинного покриву, що може бути зумовлено як фенологічними чинниками (різні дати зйомки, фази вегетації), так і реальними змінами в структурі

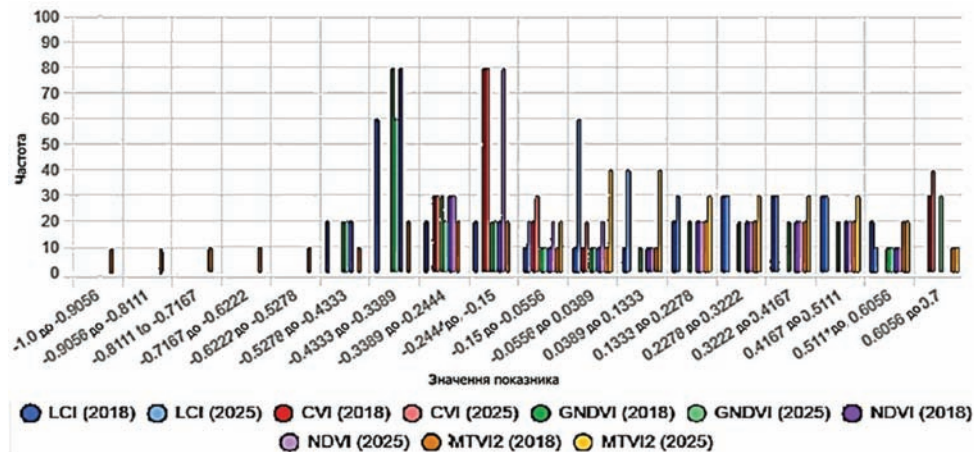


Рис. 3. Гістограма спектральних індексів CVI, GNDVI, LCI, NDVI та MTVI2 за 2018 та 2025 рр., для дослідного полігона

Примітка: побудовано авторами за супутниковими знімками Sentinel-2 (2.06.2018 та 8.06.2025).

турі землекористування чи кліматичними умовами вегетаційних періодів. MTVI2 у 2025 р. показує збільшення частки позитивних значень, що підтверджує зростання показників просторової структури й біомаси пологу. Виявлені зміни засвідчують позитивну динаміку стану рослинності з одночасним посиленням контрастів між різними типами фітоценозів та категоріями землекористування.

Така динаміка підтверджує доцільність використання хлорофільних індексів для деталізації змін, які не завжди фіксуються традиційними вегетаційними показниками.

Більш детальний аналіз для визначення впливу кліматичних умов певних років на сільськогосподарські угіддя за спектральними індексами було здійснено порівнянням їх гістограм для двох тестових полів (рис. 4; 5). Порівняльний аналіз частотних розподілів NDVI, GNDVI та LCI для першого поля в 2018 і 2025 рр. продемонстрував

загальну тенденцію до зміщення значень у бік вищих інтервалів, що вказує на покращання вегетаційних умов (див. рис. 4). У 2018 р. NDVI мав максимум переважно в зоні 0,15–0,25 з довгою «хвильою» до 0,7–0,8, що характеризувало значну частку площ із низькими й помірними значеннями індексу. В 2025 р. його розподіл змістився вправо (максимум 0,55–0,65) за практичної відсутності низьких значень, що свідчить про формування суцільного й добре розвинутого рослинного покриву. Крім того, розподіл LCI в обидва роки залишається відносно стабільним (0,5–0,7), тоді як GNDVI зміщується від максимуму близько 0,9 у 2018 р. до 1,7–1,9 у 2025 р., що відображає істотне нарощування зеленої біомаси.

Для другого поля в 2018 р. гістограми розподілу вегетаційних індексів демонструють майже повний збіг кривих NDVI та LCI з максимумом у діапазоні 0,33–0,36, що пояснює про відносно однорідний стан посівів із переважанням середньовисоких

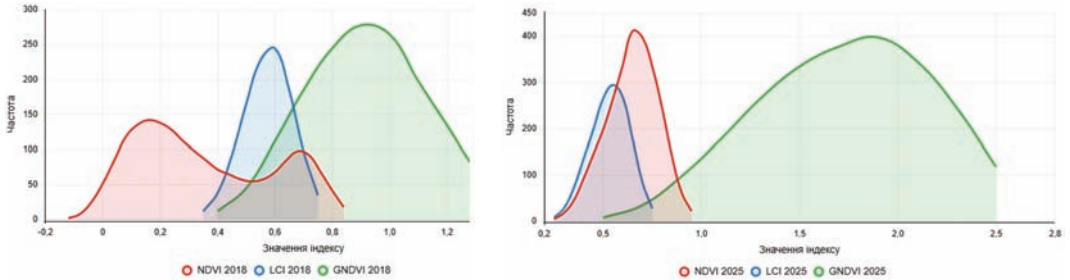


Рис. 4. Гістограма індексів NDVI, LCI, GNDVI (тестова ділянка — поле 1)

Примітка: побудовано авторами.

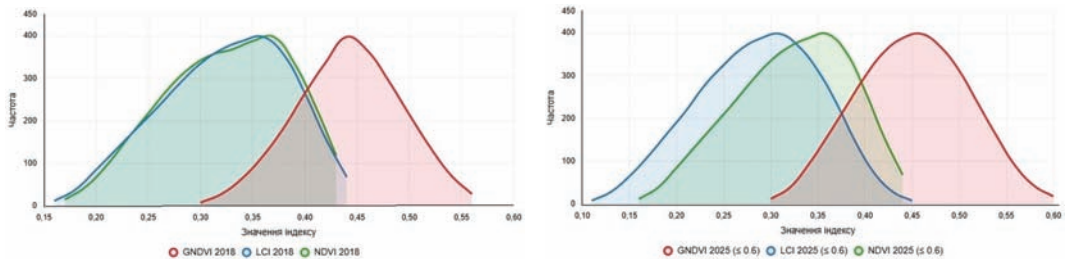


Рис. 5. Гістограма індексів NDVI, LCI, GNDVI (тестова ділянка — поле 2)

Примітка: побудовано авторами.

значень індексів (див. *рис. 5*). Розподіл GNDVI 2018 зміщений у бік вищих значень (пік близько 0,44–0,46; діапазон 0,35–0,55), відображаючи добре розвинену листову поверхню рослинності. В 2025 р. форма розподілу GNDVI загалом зберігається з максимумом у тому самому інтервалі, проте розподіл LCI істотно зміщується вліво (пік 0,28–0,31, розширення до 0,12–0,40) з появою значної частки низьких значень.

Загалом, перше поле демонструє більш виражене покращання спектральних характеристик у 2025 р., тоді як зниження пікових значень LCI на другому полі може свідчити про зменшення пігментної насиченості або більшу неоднорідність покриву. Така динаміка підтверджує доцільність застосування кількох індексів для комплексної оцінки стану рослинності, враховуючи як хлорофільні, так і структурно-біомасні аспекти. Тому, якщо для першого поля простежується тенденція до деградації частини площ, то для другого поля спостерігається покращання загального стану посівів та підвищення їх продуктивного потенціалу. Аналіз статистичних характеристик гісто-

грам індексів для кожної тестової ділянки з різнотипними об'єктами (лісовими масивами, сільськогосподарськими угіддями, водоймами та урбанізованими територіями) сприяє визначенню інформативності цих індексів щодо кожного класу цих об'єктів та особливостей їх застосування. Для цього для кожної тестової ділянки (див. *рис. 1*) було сформовано таблиці статистичних характеристик для вищезгаданих спектральних індексів (*табл. 4–7*) і проаналізовано їх зміни у 2025 р. порівняно з 2018 р.

Для тестової ділянки «поле 1» для більшості індексів (CARI, MCARI, MCARI/MTVI2, NDVI, MTVI2, GNDVI, частково LCI) спостерігається збільшення середніх і медіанних значень у 2025 р. порівняно з 2018 р. (див. *табл. 4*), що свідчить про кращий розвиток рослинності та підвищення продуктивного потенціалу поля. Одночасно для багатьох показників (особливо GNDVI, CIVI, MCARI, MCARI/MTVI2, NDVI) зростають стандартні відхилення й коефіцієнти варіації, тобто можна припустити, що просторова структура покриву стає більш мозаїчною.

Таблиця 4. Основні статистичні параметри вегетаційних індексів у 2018 та 2025 рр. (об'єкт – поле 1)

Індекс	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
CARI 2018	1795,406	8698,252	4501,733	4491,230	1051,812	0,234
CARI 2025	1926,773	9662,924	4692,122	4689,466	1188,911	0,253
CVI 2018	1,260	53,530	9,317	8,108	4,995	0,536
CVI 2025	1,933	41,094	8,975	6,851	5,968	0,665
GNDVI 2018	0,317	0,741	0,519	0,517	0,071	0,137
GNDVI 2025	0,459	4,488	1,294	1,061	0,674	0,521
LCI 2018	0,226	0,721	0,463	0,458	0,080	0,172
LCI 2025	0,248	0,689	0,471	0,456	0,083	0,176
MCARI 2018	-39,593	12892,427	3717,804	3464,903	1768,621	0,476
MCARI 2025	-214,222	11987,504	4326,158	3845,016	2293,870	0,530
MCARI/MTVI2 2018	-154,757	14495,353	5894,731	5751,160	1781,235	0,302
MCARI/MTVI2 2025	-831,195	14365,483	6723,522	6360,037	2293,576	0,341
MTVI2 2018	0,209	0,895	0,603	0,607	0,121	0,201
MTVI2 2025	0,258	0,872	0,607	0,603	0,130	0,215
NDVI 2018	0,225	0,852	0,518	0,512	0,109	0,211
NDVI 2025	0,263	0,827	0,529	0,513	0,119	0,225

Таблиця 5. Основні статистичні параметри вегетаційних індексів у 2018 і 2025 рр. (об'єкт – лісовий масив)

Індекс	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
CARI 2018	943,485	8539,167	2040,780	1903,003	622,321	0,305
CARI 2025	721,270	6398,052	1963,743	1905,689	443,919	0,226
CVI 2018	2,780	85,926	23,144	22,118	7,006	0,303
CVI 2025	3,934	32,842	15,427	15,330	2,721	0,176
GNDVI 2018	0,340	0,677	0,605	0,611	0,032	0,053
GNDVI 2025	0,702	3,996	2,138	2,111	0,384	0,179
LCI 2018	0,178	0,651	0,571	0,580	0,044	0,077
LCI 2025	0,347	0,689	0,585	0,586	0,034	0,059
MCARI 2018	-884,294	7046,561	3037,455	3051,938	645,946	0,213
MCARI 2025	410,004	11535,280	4507,283	4433,982	1059,203	0,235
MCARI MTVI2 2018	-3004,313	12260,969	4142,208	4117,984	796,504	0,192
MCARI MTVI2 2025	975,478	13799,732	5739,581	5667,454	1127,508	0,196
MTVI2 2018	0,172	0,845	0,730	0,745	0,064	0,087
MTVI2 2025	0,407	0,892	0,780	0,784	0,046	0,059
NDVI 2018	0,221	0,745	0,643	0,656	0,056	0,087
NDVI 2025	0,381	0,812	0,689	0,692	0,044	0,065

Таблиця 6. Основні статистичні параметри вегетаційних індексів у 2018 і 2025 рр. (об'єкт – населений пункт)

Індекс	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
CARI 2018	12,782	65535,000	6425,246	5945,186	2576,060	0,401
CARI 2025	22,454	37835,867	6779,178	6397,877	2625,583	0,387
CVI 2018	-0,365	98,373	10,919	8,082	10,114	0,926
CVI 2025	-0,272	71,837	4,022	2,929	3,782	0,940
GNDVI 2018	-0,374	0,749	0,367	0,383	0,107	0,292
GNDVI 2025	-0,473	5,535	0,709	0,605	0,450	0,634
LCI 2018	-0,485	0,676	0,292	0,305	0,104	0,357
LCI 2025	-0,619	0,710	0,340	0,345	0,122	0,358
MCARI 2018	-8885,128	823213,440	2164,291	2010,423	5345,303	2,470
MCARI 2025	-7363,104	40442,180	2711,007	2310,794	2400,121	0,885
MTVI2 2018	-0,822	0,991	0,373	0,387	0,166	0,446
MTVI2 2025	-0,661	0,915	0,422	0,427	0,189	0,448
NDVI 2018	-0,270	0,825	0,321	0,327	0,122	0,379
NDVI 2025	-0,260	0,853	0,363	0,354	0,149	0,411

Загалом, можна зробити висновок, що у 2025 р. поле характеризується інтенсивнішою та більш розвинутою вегетацією, але з помітною внутрішньою неоднорідністю, яка відображає різні умови живлення,

зволоження або агротехніки на окремих ділянках.

Для лісового масиву (див. *табл. 5*) можна дійти висновку, що між 2018 і 2025 рр. переважає тенденція до зміцнення й част-

Таблиця 7. Основні статистичні параметри вегетаційних індексів у 2018 і 2025 рр. (об'єкт – водний об'єкт)

Індекс	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
CARI 2018	40,340	24673,600	1980,768	1563,417	2127,163	1,074
CARI 2025	25,324	8684,725	1107,141	808,011	831,229	0,751
CVI 2018	-0,486	35,341	-0,005	-0,083	1,156	-236,358
CVI 2025	-0,301	0,147	-0,091	-0,107	0,054	-0,590
GNDVI 2018	-0,372	0,427	-0,206	-0,236	0,112	-0,542
GNDVI 2025	-0,525	-0,012	-0,305	-0,311	0,137	-0,448
LCI 2018	-0,631	0,296	-0,281	-0,296	0,118	-0,420
LCI 2025	-0,661	0,253	0,025	0,060	0,146	5,881
MCARI 2018	-2199,366	9853,522	441,202	95,727	917,131	2,079
MCARI 2025	-969,778	4381,512	1411,769	1355,709	392,850	0,278
MCARI/MTVI2 2018	-637357,900	329549,100	-492,603	-142,002	18958,447	-38,486
MCARI/MTVI2 2025	-1328010,900	4179870,500	4530,295	5290,429	128254,340	28,310
MTVI2 2018	-1,986	0,321	-0,708	-0,650	0,419	-0,591
MTVI2 2025	-1,605	0,562	-0,006	0,087	0,309	-51,817
NDVI 2018	-0,431	0,302	-0,238	-0,252	0,105	-0,442
NDVI 2025	-0,510	0,090	-0,190	-0,170	0,151	-0,796

кового вирівнювання стану деревної рослинності, із деяким посиленням зеленої біомаси. Вищі значеннями NDVI, MTVI2 та більшістю хлорофіл-чутливих індексів вказують на посилення продуктивності та «озеленення» деревного покриву порівняно з 2018 р. Для CARI, CVI, LCI, NDVI та MTVI2 відзначається зменшення дисперсії й варіації, тобто структура лісового пологую стає більш однорідною, без різко виділених ослаблених зон. Окрім того, для індексів GNDVI, MCARI і MCARI/MTVI2 спостерігається зростання як середніх значень, так і частково варіації, що може вказувати на формування ділянок із надзвичайно високою зеленою біомасою й активністю хлорофілу (наприклад, більш вологі фрагменти масиву).

Отже, за сукупністю індексів, у 2025 р. лісовий масив загалом виглядає більш здоровим, зеленим і структурно вирівняним, із локальними зонами ще інтенсивнішого розвитку деревної рослинності.

Для населеного пункту розподіл індексів істотно відрізняється від поля чи лісу й добре відображає мозаїку забудови, грун-

тів, окремих зелених ділянок та техногенних поверхонь (див. *табл. 6*). За більшістю індексів (CARI, MCARI, MCARI/MTVI2, LCI, NDVI, MTVI2, GNDVI) у 2025 р. зростають середні та медіанні значення, що свідчить про посилення вегетаційного сигналу в межах населеного пункту – збільшення площі та/або інтенсивності зелених насаджень.

Показники варіації залишаються високими, а для частини індексів (NDVI, GNDVI) ще й зростають, тобто урбанізоване середовище залишається дуже мозаїчним, із різкими переходами між забудованими, відкритими та озеленими територіями. Сильне зниження середніх значень CVI на фоні зростання інших індексів підкреслює, що різні вегетаційні показники реагують на міський ландшафт по-різному; за інтерпретації треба враховувати наявність дахів, асфальту, тіней та інших урбаністичних ефектів.

Тому за комплексом індексів можна зробити висновок, що в 2025 р. населеному пункту властивий більш виражений і локально інтенсивний рослинний покрив,

але з дуже високою просторовою неоднорідністю, характерною для міських агломерацій.

Для водної поверхні індекси поводяться інакше, ніж на суходолі: переважають негативні або близькі до нуля значення, що відображає поглинання випромінювання водою та відсутність розвинутої наземної рослинності (див. *табл. 7*). В обидва роки вода характеризується негативними NDVI та GNDVI, тобто відсутністю наземного рослинного покриву. Істотні зміни в LCI та MTVI2 (перехід від стабільно негативних до значень навколо нуля або слабо позитивних) разом із зростанням дисперсії підтверджують, що оптичні властивості водної поверхні стали істотно більш неоднорідними – ймовірно, через поєднання мілководних ділянок, домішок. Хлорофіл-чутливі індекси (CARI, MCARI) у 2025 р. показують загалом нижчий контраст, але більш стабільний сигнал, що свідчить про певне вирівнювання умов у межах водного об'єкта.

Отже, за комплексом індексів, водна поверхня в обох роках чітко відрізняється від суходолу, але в 2025 р. вона виглядає менш оптично однорідною, із більш вираженими змінами прозорості, глибини та/або вмісту домішок і прибережної рослинності. Для водних об'єктів усі розглянуті вегетаційні

індекси виконують радше функцію спектральної маски, ніж інструмента оцінки рослинності.

Тому, ефективність використання вегетаційних індексів виявилася істотно залежною від типу об'єкта – орних полів, лісових масивів, урбанізованих територій та водної поверхні. Узагальнюючи результати, можна підкреслити, що NDVI, GNDVI, LCI та MTVI2 є найбільш універсальними індексами для порівняння різних типів рослинного покриву. Водночас CARI, CIVI, MCARI та MCARI/MTVI2 є більш чутливими до пігментного складу та біомаси, що робить їх особливо корисними для аналізу полів і лісів, але менш ефективними в урбанізованих чи водних умовах. Поєднання цих індексів дає можливість комплексно оцінити стан рослинності, її продуктивність і неоднорідність, а також чітко відокремити суходіл від водних територій.

Виявлені зміни у частотних розподілах індексів між 2018 та 2025 рр. можуть бути пов'язані із кліматичними змінами, які спостерігаються на території України за останнє десятиліття. Аналіз супутникових даних NASA за 2015–2022 рр. засвідчив стійку тенденцію до зростання концентрації CO₂ в атмосфері (*рис. 6*) та температури повітря над територією України (*рис. 7*), що узгоджується з сучасними уявленнями

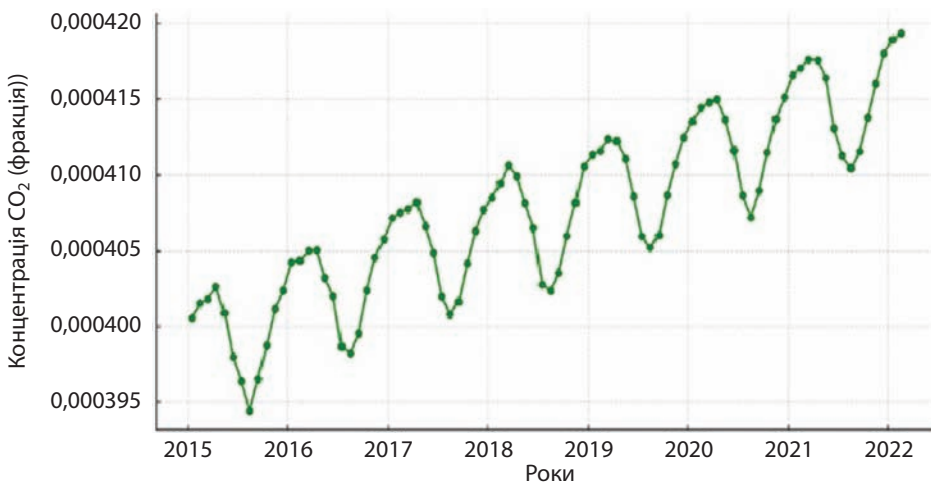


Рис. 6. Графік динаміки рівня вуглекислого газу за період від 2015 до 2022 рр.

Примітка: розроблено авторами згідно [11].

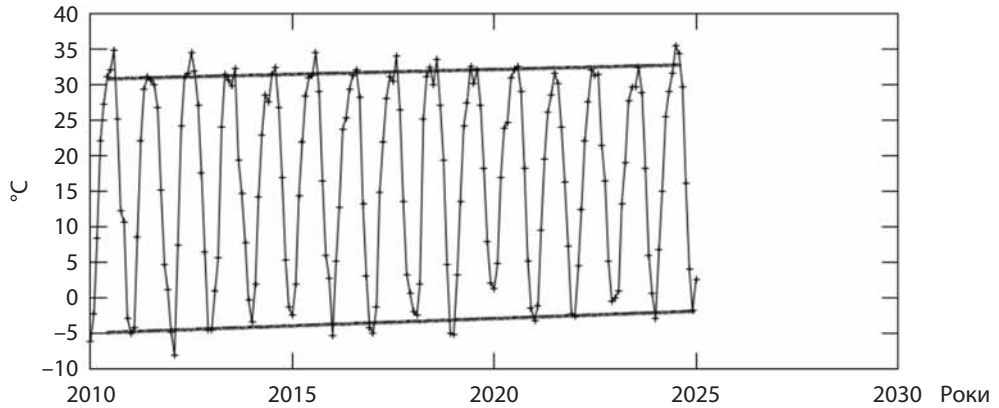


Рис. 7. Графік динаміки температури за період від 2015 до 2022 рр.

Примітка: розроблено авторами згідно [11].

про регіональні прояви глобальних кліматичних змін.

Це, своєю чергою, відображається на життєвому циклі рослинності та зумовлює підвищення вмісту хлорофілу й подовження вегетаційного періоду, що простежується порівняно індексних зображень за 2018 та 2025 рр. (див. *рис. 3*).

Для більш детального аналізу просторової мінливості значень індексів застосовано інструмент Elevation Profile програмного забезпечення QGIS, який дає змогу візуалізувати зміни стану рослинного покриву уздовж заданих профілів через різні типи підстильної поверхні (*рис. 8*).

Графіки профіля NDVI (див. *рис. 8*) загалом повторюють один одного, що підтверджує стабільність основних типів землеко-

ристування вздовж профілю. Максимальні значення NDVI (0,6–0,75) на початку та в другій половині профілю відповідають ділянкам із густою рослинністю (лісові масиви, добре розвинені посіви). Відмінності між роками переважно незначні: у низці сегментів 2025 р. спостерігаються трохи вищі піки NDVI, але в зонах низької вегетації криві практично збігаються. Це свідчить про відносну стабільність загальної біомаси та щільності рослинного покриву.

За профілями індексу MCARI (*рис. 9*) простежується подібний загальний хід кривих у 2018 та 2025 рр., що відображає сталість просторової структури ландшафту вздовж профілю (чергування аграрних угідь, лісових масивів, відкритого ґрунту, водних або урбанізованих ділянок). Вод-

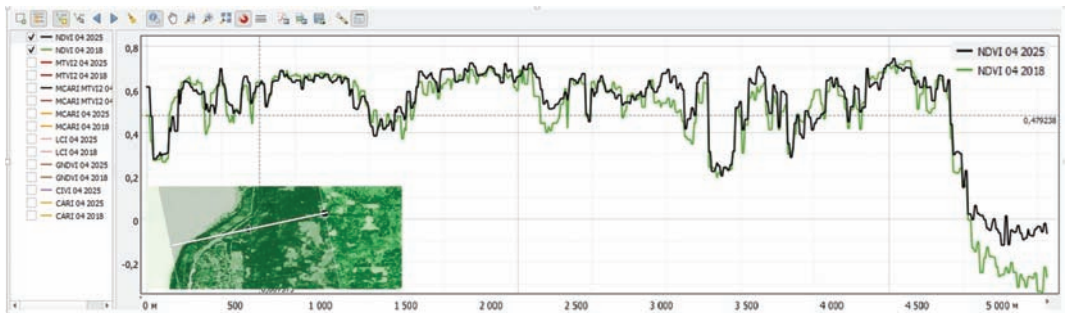


Рис. 8. Профіль NDVI, побудований авторами з використанням інструменту Elevation Profile QGIS

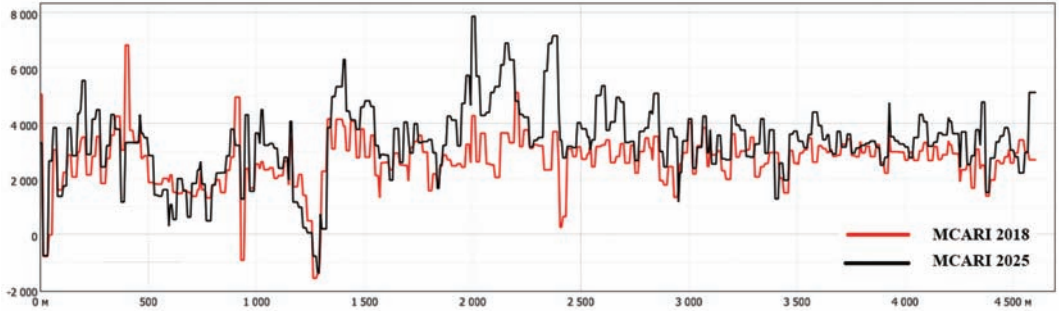


Рис. 9. Профіль MCARI, побудований авторами з використанням інструменту Elevation Profile QGIS

ночас майже на всій довжині профілю значення MCARI у 2025 р. (чорна крива) є вищими за показники 2018 р. Це пояснює підвищення вмісту хлорофілу та/або зміни структури пологу (згущення, збільшення частки деревної рослинності) за незмінної конфігурації підстильної поверхні. Підвищення MCARI у 2025 р. за відносно стабільних значень NDVI може інтерпретуватися як покращання фізіологічного стану рослинності (зростання вмісту хлорофілу, зміна видового складу чи вікової структури насаджень) без істотної зміни загальної площі й щільності рослинного покриву. Це підтверджує доцільність використання чутливих до хлорофілу індексів для деталізації змін, які не завжди виявляються за допомогою традиційних вегетаційних індексів.

Отже, застосування інструменту Elevation Profile забезпечує отримання точних кількісних значень індексів у конкретних точках, що підвищує достовірність інтерпретації результатів. Однак слід зазначити обмеження методу: оцінка здійснюється лише вздовж вибраних профільних ліній, а не для всієї площі дослідження, що потребує ретельного відбору репрезентативних відрізків.

Отримані результати узгоджуються із сучасними тенденціями використання спектральних індексів хлорофілу для моніторингу рослинності та оцінки стану сільськогосподарських культур. Дослідження Nadjla et al. (2022) продемонструвало

ефективність застосування індексів RECI (Red-Edge Chlorophyll Vegetation Index) та GCI (Green Chlorophyll Vegetation Index) для аналізу багаторічних змін сільськогосподарських угідь на плато Мостаганем в Алжирі, встановивши, що індекс GCI виявився більш ефективним для автоматичного виділення сільськогосподарських площ і чіткішої диференціації рослинних формацій порівняно з індексом RECI. Це підтверджує наші висновки про вищу ефективність хлорофіл-специфічних індексів для деталізації стану агроценозів [14].

Thinley et al. (2024) порівнювали п'ять вегетаційних індексів та три хлорофіл-специфічні індекси на основі супутникових знімків Sentinel-2 для моделювання надземної біомаси міського дендропарку в субтропічному Квінсленді, Австралія [15]. Дослідження показало, що модифікований індекс коригованої вегетації (MSAVI) та модифікований індекс поглинання хлорофілу (MCARI) найкраще прогнозували надземну біомасу, що узгоджується з нашими результатами щодо високої інформативності MCARI для оцінки стану як лісових, так і міських насаджень.

Zhang et al. (2025) представили глобальний продукт вмісту хлорофілу в листках (LCC) з роздільною здатністю 10 м, використовуючи індекс чутливості до хлорофілу (CSI) та платформу Google Earth Engine. Висока роздільна здатність продукту дає змогу фіксувати детальніший просторовий розподіл і розумні часові про-

філі, що робить його придатним для точного землеробства та моніторингу лісових насаджень, підтверджуючи перспективність використання даних Sentinel-2 для регіонального моніторингу [16].

Vekturov et al. (2024) застосували індекс хлорофілу (CI) для визначення дефіциту поживних речовин у сільськогосподарських культурах Чуйської обл. Киргизстану методами дистанційного зондування, встановивши, що використання хлорофільних індексів є найбільш ефективним для раннього виявлення дефіциту поживних речовин. Це вводить нашу гіпотезу про можливість використання індексів LCI та CARІ для диференційованої оцінки фізіологічного стану посівів на окремих полях [17].

Zhang et al. (2022) запропонували новий червоно-крайовий спектральний індекс CSI для визначення вмісту хлорофілу в листках, який демонструє стійкість до варіацій структури крони та фону ґрунту [18].

Amorim et al. (2024) проаналізували тренди та варіабельність поверхневого хлорофілу в Німецькій бухті (Північне море) за період 1998–2020 рр., використовуючи дані дистанційного зондування Copernicus GlobColour, що засвідчує універсальність підходів на основі хлорофільних індексів для моніторингу як наземних, так і водних екосистем [19].

Тому, сучасні дослідження підтверджують високу ефективність хлорофіл-специфічних індексів для моніторингу стану рослинності, оцінки біомаси та виявлення екологічних змін у різних екосистемах, що узгоджується з результатами даного дослідження та пояснює доцільність їх застосування для регіонального моніторингу та точного землеробства.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження зафіксовано, що спеціалізовані індекси хлорофілу (CVI, GNDVI, LCI, CARІ, MCARI, MTVI2) становлять ефективний інструмент для диференціації кліматичних та антропогенних змін рослинного покриву, забезпечуючи вищу чутливість до фізіо-

логічного стану рослинності порівняно з традиційним індексом NDVI.

Встановлено диференційовану ефективність індексів залежно від типу об'єктів дослідження. NDVI, GNDVI, LCI та MTVI2 виявилися найбільш універсальними для порівняння різних типів рослинного покриву. CARІ продемонстрував підвищену чутливість до варіацій вмісту хлорофілу та забезпечив кращу диференціацію окремих типів рослинності, визначаючи більшу просторову неоднорідність всередині лісових масивів та сільськогосподарських угідь. MCARI був особливо інформативним для визначення тонких фізіологічних змін, які не фіксуються традиційними вегетаційними індексами.

Профільний аналіз із використанням інструменту Elevation Profile View підтвердив, що підвищення значень MCARI у 2025 р. за відносної стабільності NDVI свідчить про покращання фізіологічного стану рослинності без істотної зміни загальної біомаси та щільності покриву. Це підтверджує, що індекси хлорофілу здатні виявляти зміни, зумовлені природними кліматичними чинниками (подовження вегетації, підвищення фотосинтетичної активності), тоді як різкі локальні перепади значень на коротких відстанях є індикаторами антропогенного впливу (вирубки, зміна землекористування, створення насаджень).

Результати дослідження узгоджуються із сучасними науковими публікаціями щодо ефективності хлорофіл-специфічних індексів для моніторингу рослинності, оцінки біомаси та фіксування екологічних змін у різних екосистемах. Комплексне використання індексів CVI, GNDVI, LCI, CARІ та MCARI в поєднанні з аналізом супутникових даних щодо концентрації CO₂ та температури забезпечує надійну методику диференціації природних кліматичних та антропогенних чинників змін рослинного покриву на великих територіях.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці адаптованих моделей індексів хлорофілу для специфічних типів рослинності з урахуванням морфологічних

особливостей листкових пластинок різних таксономічних груп, що дасть можливість підвищити точність селективної ідентифікації окремих фітоценозів. Доцільним є також залучення супутникових даних із

вищою просторовою роздільністю та проведення додаткових наземних досліджень фізіологічних властивостей листків для валідації дистанційних оцінок вмісту хлорофілу на регіональному рівні.

ЛІТЕРАТУРА

- IPCC. (2023). Sections. In H. Lee & J. Romero (Eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35–115). IPCC. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Ковирьова, О. В. (2019). Патент України 1563950. УкрНОІВІ. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1563950/>.
- Рябчун, Н. І. (2009). Патент України 266337. УкрНОІВІ. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/266337/>.
- Шерер, В. О. (2007). Патент України 307602. УкрНОІВІ. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/307602/>.
- Yi, L., Sun, Y., Ouyang, X., & Yin, S. (2022). Identifying the impacts of climate change and human activities on vegetation cover changes: A case study of the Yangtze River Basin, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), Article 6239. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19106239>.
- Savastru, D. M., Zoran, M. A., & Savastru, R. S. (2019). Geospatial information for assessment of climate change impact on forest phenology. *Proceedings of SPIE*, 11174, Article 1117402. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2532257>.
- Copernicus Data Space Ecosystem. (n.d.). *Sentinel-2*. URL: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>.
- QGIS Development Team. (n.d.). QGIS Geographic Information System (Ver. 3.34) [Computer software]. Open Source Geospatial Foundation.
- Index DataBase. (n.d.). *A database for remote sensing indices*. URL: <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>
- Sentinel Hub. (n.d.). *Sentinel-2 RS indices*. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/indexdb/>.
- NASA GES DISC. (n.d.). *Giovanni — Interactive online visualization and analysis*. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
- Li, X., Zhu, B., Li, S., Liu, L., Song, K., & Liu, J. (2025). A comprehensive review of crop chlorophyll mapping using remote sensing approaches: Achievements, limitations, and future perspectives. *Sensors*, 25(8), 2345. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25082345>.
- Janse, P. V., Deshmukh, R. R., Kayte, J. N., & Randive, P. U. (2019). Estimation of crop chlorophyll content by spectral indices using hyperspectral non-imaging data. In K. Santosh & R. Hegadi (Eds.), *Recent trends in image processing and pattern recognition (RTIP2R 2018) (Communications in Computer and Information Science, Vol. 1037)*. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-9187-3_32.
- Nadjla, B., Assia, S., & Ahmed, Z. (2022). Contribution of spectral indices of chlorophyll (RECI and GCI) in the analysis of multi-temporal mutations of cultivated land in the Mostaganem plateau. In *2022 7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA)* (pp. 1–6). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISPA54004.2022.9786326>.
- Thinley, J., Pickering, C., & Ndehedehe, C. (2024). Using vegetation and chlorophyll indices to model above-ground biomass over time in an urban arboretum in subtropical Queensland. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 34, Article 101202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101202>.
- Zhang, H., Li, J., Gu, C., Guan, L., Wang, X., Mumtaz, F., ... Yu, W. (2025). The 10 m-resolution global leaf chlorophyll content product using Sentinel-2 based on chlorophyll sensitive index CSI [Preprint]. *Earth System Science Data Discussions*. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-2025-42>.
- Bekturov, M., Zhumabekova, A., & Konurbayeva, G. (2024). Application of chlorophyll index to detect nutrient deficiency in agricultural plants by remote sensing. *Bulletin of the Kyrgyz National Agrarian University*, 22(5), 17–24.
- Zhang, H., Li, J., Liu, Q., Lin, S., Huete, A., Liu, L., ... Yu, W. (2022). A novel red-edge spectral index for retrieving the leaf chlorophyll content. *Methods in Ecology and Evolution*, 13, 2771–2787. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13994>.
- Amorim, F. D., Balkoni, A., Sidorenko, V., & Wiltshire, K. H. (2024). Analyses of sea surface chlorophyll a trends and variability from 1998 to 2020 in the German Bight (North Sea). *Ocean Science*, 20, 1247–1265. DOI: <https://doi.org/10.5194/os-20-1247-2024>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 04.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.12.2025

Дата публікації: 27.02.2026

ГУМУСНИЙ СТАН ҐРУНТІВ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Т.О. Льєнко¹, Я.С. Цимбал¹, М.В. Алексєнко¹,
В.В. Коваль², С.Г. Брегеда²

¹Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України» (м. Київ, Україна)
e-mail: ilyenko4@ukr.net; ORCID: 0009-0009-8553-1073
e-mail: tsimbal.ya@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0414-885X
e-mail: alekseenkov@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3078-7759

²Північно-східний міжрегіональний центр
Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України»
(с-ще Степне, Полтавська обл., Україна)
e-mail: poltavapvc@ukr.net; ORCID: 0009-0001-8949-4240
ORCID: 0009-0007-5904-6547

Досліджено гумусний стан ґрунтів Полтавської обл. Узагальнено динаміку вмісту гумусу в ґрунтах області впродовж п'яти турів (1996–2020 рр.) агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення. Встановлено невідповідність процесів стабілізації вмісту гумусу загалом у області в XI турі (2016–2020 рр.) порівняно з VII туром (1996–2000 рр.) на фоні зменшення норм внесення органічних добрив та значного зниження обстеженої площі. Визначено, що вміст гумусу впродовж досліджуваного періоду залишався відносно стабільним (3,15–3,39%) і відповідав підвищеному рівню забезпеченості, незважаючи на істотне зменшення обсягів внесення органічних добрив (від 15,5 до 5,0 т/га). Встановлено, що стабілізація вмісту гумусу відбувається за рахунок зміни структури посівних площ у сівозмінах і мінімізації обробітку ґрунту, що набуло широкого впровадження в останні роки. Зафіксовано скорочення площі обстеження від 1037,5 до 371,7 тис. га, що не вплинуло істотно на середньозважений показник гумусу. Зокрема, обстежена площа сільськогосподарських угідь у XI турі зменшилася на 665,8 тис. га, або на 64,2% порівняно з VII туром відповідно. За результатами XI туру агрохімічної паспортизації ґрунтів Полтавської обл. встановлено, що більшість районів характеризуються підвищеним (12 районів) і середнім (7 районів) рівнем вмісту гумусу, лише 2 райони — високим. Найвищий вміст гумусу зафіксовано у Великобагачанському (4,40%) та Карлівському (4,22%) р-нах, найнижчий — у Чорнухинському (2,67%). Аналіз динаміки за 1996–2020 рр. показав, що у 12 районах відбулося збільшення вмісту гумусу (на 0,02–0,81%), тоді як у 13 районах спостерігається тенденція до його зниження (на 0,01–4,10%). Загалом результати свідчать про зменшення частки ґрунтів із підвищеним вмістом гумусу та збільшення частки із середнім, що вказує на погіршення гумусного стану ґрунтів області.

Ключові слова: агрохімічна паспортизація, моніторинг, площа обстеження, динаміка, органічні добрива, побічна продукція, рослинні рештки, біологізація, агротехнічні заходи, район.

ВСТУП

Одним з основних компонентів довкілля є ґрунтовий покрив, який виконує життєво необхідні біосферні функції. Характерною й найважливішою особливістю ґрунтового покриву є його родючість — це основна й найцінніша його властивість [1]. Важливо зазначити, що ґрунт є ключовим елементом природного середовища, який забезпечує підтримання життя на планеті.

Він бере участь у численних природних процесах і виконує різноманітні функції, зокрема забезпечує рослини необхідними поживними речовинами. Однак, на сучасному етапі розвитку, значний вплив на родючість ґрунтів мають антропогенні чинники, такі як сільськогосподарська діяльність, промислове виробництво та урбанізація. Не раціональне використання добрив, пестицидів та агротехнічних заходів призводить до деградації ґрунтів, зменшення вмісту гумусу та порушення балансу

макроелементів. Негативні наслідки такої діяльності можна спостерігати на прикладі різних регіонів, де ґрунтовий покрив зазнає значних змін через інтенсивне використання агротехнічних прийомів. Окрім того, промислові викиди та забруднення водних ресурсів істотно впливають на стан ґрунтів, сприяючи накопиченню токсичних речовин та зниженню їх родючості.

Враховуючи вище зазначене, особливої актуальності набуває моніторинг і агрохімічне обстеження ґрунтів сільськогосподарського призначення на динаміку вмісту гумусу в орних землях, зокрема Полтавської обл. Одним із головних завдань якого є збереження та підвищення вмісту гумусу в регіоні для забезпечення сталого розвитку та продовольчої безпеки держави.

Метою досліджень є моніторинг умісту гумусу в ґрунтах Полтавської обл. за результатами останніх п'яти турів агрохімічного паспортизації земель сільськогосподарського призначення (1996–2020 рр.).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Родючість ґрунтів України демонструє тенденцію до поступового зниження. За результатами агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення, протягом кожних п'яти років ґрунти України втрачають у середньому 0,04–0,05% гумусу, 4–7 мг/кг рухомих сполук фосфору та 5–7 мг/кг калію. Якщо перевести ці показники у фізичну масу, щорічні втрати становлять приблизно 300–350 кг гумусу, 2,6–4,5 кг сполук рухомого фосфору та 3,2–4,5 кг калію на гектар. Окрім того, на значних територіях країни фіксується дефіцит або, навпаки, надлишок окремих мікроелементів. Подібні зміни у хімічному складі ґрунтового середовища здатні істотно впливати на стан агроєкосистем і продуктивність сільськогосподарських культур. Зменшення вмісту гумусу, зокрема, зумовлює зниження урожайності та підвищення потреби у внесенні додаткових добрив.

Низка відомих вчених, зокрема О.О. Ласло зі співавт. [1], а також V. Tkachenko,

S. Tanchyk, U. Karbivska, D. V. Litvinov et al. [2–5] вважають, що родючість ґрунту розглядається як інтегрований показник взаємодії основних чинників ґрунтоутворення та комплексний критерій оцінки його якісного стану. Одним із ключових параметрів є вміст органічної речовини, центральною складовою якої виступає гумус. Цей компонент формується внаслідок розкладання та гуміфікації рослинних і тваринних решток. Гумус відіграє важливу роль у біогеохімічному кругообігу зольних елементів, є резервом азоту, макро- та мікроелементів. Його кількість безпосередньо впливає на агрофізичні, фізико-хімічні, біологічні та агрохімічні властивості ґрунтів, визначаючи водний, повітряний і температурний режими, а відтак — продуктивність агроценозів. Таким чином, уміст гумусу залишається визначальним показником ефективності землеробства незалежно від його інтенсивності [1–5].

Водночас І.Д. Примак із співавт., L.K. Shevtsova, T. Khomenko et al. [6–8] наголошують, що гумус часто називають «імунною системою ґрунту», адже саме він забезпечує стабільність і поліпшення його структури, підтримання основних функцій та «здоров'я» ґрунтового середовища. Завдяки достатньому вмісту гумусу активізуються природна стійкість рослин до хвороб і шкідників, пригнічується розвиток патогенних організмів, а також зберігаються фільтраційні та сорбційні властивості ґрунтів. Отже, гумус є незамінним чинником забезпечення сталого функціонування сільськогосподарських екосистем.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Обстеження земель сільськогосподарських угідь здійснювали згідно з відповідною методикою проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення [9]. Вміст гумусу визначали за ДСТУ 4289:2004 [10]. Аналізувалися середньозважені показники вмісту гумусу у ґрунтах кожного району Полтавської обл., а також зміни площі обстежених земель [11–14].

Дані оброблялися методами статистичного аналізу та графічної візуалізації. Математико-статистичну обробку отриманих результатів здійснювали на персональному комп'ютері з використанням пакетів прикладних програм типу Excel, Statistica, Sigma. Статистичну обробку отриманих результатів проводили методом варіаційної статистики.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Гумусний стан ґрунтів являє собою комплексний показник, який відображає взаємодію органічної речовини з усіма компонентами ґрунтового середовища. Він виступає своєрідною матрицею, що формує сукупність фізичних, хімічних, біологічних та агрономічних властивостей ґрунту, визначаючи його основні режими – водний, повітряний, тепловий і поживний. Саме тому вміст гумусу розглядається як інтегральний критерій, який характеризує потенційну та реальну родючість ґрунтів [1; 2; 8].

Ґрунтовий покрив Полтавської обл. представлений переважно чорноземами, сірими лісовими, піщаними, заплавними та болотними ґрунтами. У структурі земельного фонду регіону ґрунти з середнім вмістом гумусу становлять близько 52% від загальної площі орних земель, тоді як звичайні малогумусні (низький вміст гумусу)

займають приблизно 7,8% [14]. Різноманіття ґрунтів у регіоні забезпечує їхню високу агрономічну цінність та ефективність для ведення сільськогосподарської діяльності. Однак такі різні типи ґрунтів потребують диференційованого підходу до управління їх родючістю.

В умовах інтенсивного сільського господарства, особливо в аграрних регіонах, таких як Полтавщина, збереження та підвищення вмісту гумусу є ключовим завданням для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу. Полтавська обл., порівняно з іншими регіонами України, має один із найвищих показників вмісту гумусу в ґрунтах. Цей факт свідчить про сприятливі природні умови та ефективні заходи збереження родючості, що застосовуються в регіоні.

Спостереження за вмістом гумусу в ґрунтах Полтавської обл. здійснюються фахівцями ДУ «Держґрунтохорона». Інформація, накопичена у процесі обстеження сільськогосподарських угідь, дає змогу прослідкувати зміни вмісту гумусу, що відбулися впродовж VII–XI (1996–2020 рр.) турів у ґрунтах області (рис. 1).

За період спостереження показник вмісту гумусу істотно не змінювався. Під час обстеження у VII турі середньозважений вміст гумусу в ґрунтах області становив 3,33%, що відповідає підвищеному рівню забезпечення. Зменшення обсягів внесення

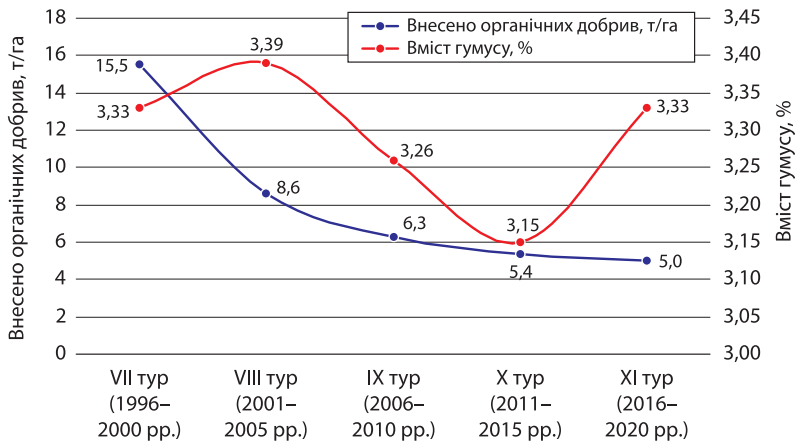


Рис. 1. Динаміка вмісту гумусу і внесення органічних добрив за турами обстежень

ня органічних добрив у VIII турі агрохімічної паспортизації (на 6,9 т/га порівняно з VII туром) не зумовило зниження вмісту гумусу. Середньозважений показник у вказаному турі становив 3,39%.

Ґрунт, як самостійне природне тіло та важлива складова екосистеми, являє собою складно організовану динамічну систему, в якій безперервно відбуваються процеси обміну речовинами й енергією з довкіллям. Рівень його гумусованості зумовлюється балансом між надходженням органічних сполук і їх втратами, що відбуваються внаслідок мінералізації, ерозійних процесів та інших біогеохімічних перетворень.

Упродовж п'яти турів (VII–XI тури) вміст гумусу залишався на відносно одному рівні (3,15–3,33%) на фоні зменшення норм внесення органіки (15,5–5,0 т/га). З різних причин, в області різко зменшились обсяги внесення під сільськогосподарські культури органічних добрив. Так, у 1996 р. на 1 га посівної площі було внесено по 4,7 т органічних добрив, а в 2020 р. — 0,9 т, тоді як для забезпечення бездефіцитного балансу гумусу треба вносити 9–10 т/га органіки.

Проаналізувавши динаміку показників «вміст гумусу» та «внесення органічних добрив» за турами обстежень встановлено, що лише зниження вмісту гумусу в IX та X турі агрохімічної паспортизації може бути зумовлено зниженням кількості вне-

сених органічних добрив. Слід зауважити, що подальша стабілізація вмісту гумусу в ґрунтах області не залежить від рівня застосування органічних добрив. Це може свідчити про ефективність інших заходів управління родючістю ґрунтів, таких як сівозміни, збереження залишків рослин на полі та застосування інших агротехнічних методів.

Оскільки взаємозв'язок між вмістом гумусу та внесенням органічних добрив не зафіксовано, проаналізовано показник «вміст гумусу» з іншим, не менш важливим чинником — «обстежена площа», за турами агрохімічної паспортизації (рис. 2).

За результатами досліджень виявлено доволі значне зменшення обстеженої площі: від 1037,5 тис. га у VII турі до 371,7 тис. га у XI турі. Обстежена у XI турі площа порівняно з VII туром зменшилася на 665,8 тис. га (64,2%). Середньозважений вміст гумусу за результатами обстеження залишився в межах підвищеного рівня забезпеченості (3,33%).

За результатами XI туру агрохімічної паспортизації, два райони Полтавської обл. характеризуються високим вмістом гумусу, 12 — підвищеним, і 7 — середнім (табл.). Найвищий вміст гумусу зафіксовано у В.-Багачанському (4,40%) та Карлівському (4,22) р-нах, найнижчий — у Чорнухинському р-ні (2,67%).

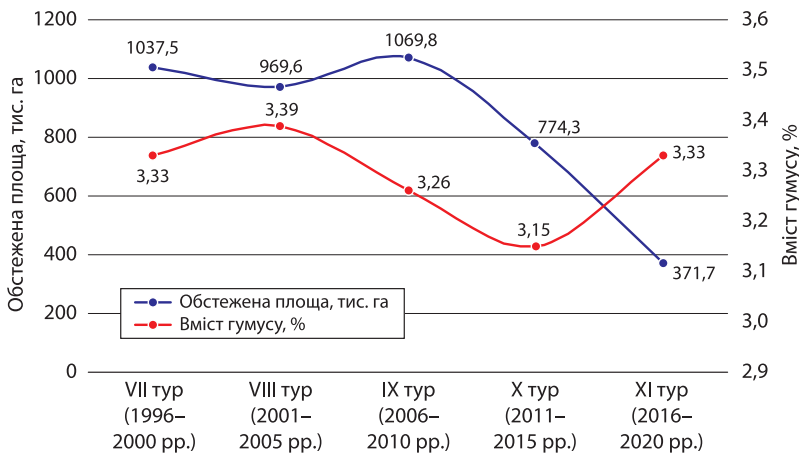


Рис. 2. Вміст гумусу і обстежені площі за турами агрохімічної паспортизації земель

Уміст гумусу за турами обстеження у Полтавській обл. (1996–2020 рр.)

Назва району	VII тур		VIII тур		IX тур		X тур		XI тур			Обстежена площа (± до VII тury) тис. га	Середньозважений вміст гумусу, %
	обстежена площа, тис. га	вміст гумусу, %	обстежена площа, тис. га	вміст гумусу, %	обстежена площа, тис. га	вміст гумусу, %	обстежена площа, тис. га	вміст гумусу, %	обстежена площа, тис. га	вміст гумусу, %	рівень забезпеченості		
В.-Багачанський	29,8	3,59	26,6	3,66	38,4	3,3	25,3	2,87	5,4	4,40	Високий	-24,4	+0,81
Гадяцький	55,8	3,26	50,1	3,24	67,3	3,01	68,6	2,92	23,7	2,99	Середній	-32,1	-0,27
Глобінський	81,9	3,33	71,1	3,49	64,9	3,3	68,9	2,98	31,7	3,48	Підвищений	-50,2	+0,15
Гребінківський	29,6	3,27	23,9	3,42	24,7	3,47	23,4	3,17	10,6	3,23	Підвищений	-19,0	-0,04
Диканський	21,1	3,70	22,8	3,69	31,5	3,25	26,1	3,23	11,0	3,15	Підвищений	-10,1	-0,55
Зіньківський	40,9	3,89	52,6	3,39	43,1	3,06	26,6	3,30	20,0	3,13	Підвищений	-20,9	-0,76
Карлівський	44,7	4,41	29,0	4,27	29,1	4,33	6,2	3,81	10,3	4,22	Високий	-34,4	-0,19
Кобеляцький	56,1	3,10	45,2	3,01	48,4	2,92	45,8	2,89	40,0	3,09	Середній	-16,1	-0,01
Козельщинський	36,4	2,80	30,1	2,90	27,8	2,96	24,9	3,00	20,0	3,03	Середній	-6,4	+0,23
Котелевський	24,4	3,20	31,4	3,23	34,5	3,03	24,1	2,81	15,0	2,86	Середній	-9,4	-0,34
Кременчуцький	29,2	2,70	28,2	2,75	33,9	2,82	4,6	2,62	9,0	2,72	Середній	-20,2	+0,02
Лохвицький	55,4	2,84	51,3	3,10	56,4	3,09	52,0	2,67	20,9	2,97	Середній	-34,5	+0,13
Лубенський	46,7	2,90	51,9	2,92	48,1	2,93	6,1	2,77	15,0	3,22	Підвищений	-31,7	+0,32
Машівський	34,8	4,37	37,2	4,44	48,2	4,21	51,1	4,17	6,6	3,73	Підвищений	-28,2	-0,64
Миргородський	59,6	3,41	61,2	3,65	71,9	3,39	53,1	3,50	23,3	3,52	Підвищений	-36,3	+0,11
Новосанжарський	54,3	3,10	42,6	3,55	43,0	3,16	38,7	3,31	14,0	3,44	Підвищений	-40,3	+0,34
Оржицький	41,6	2,90	42,2	3,07	41,7	3,12	8,3	3,22	15,0	3,13	Підвищений	-26,6	+0,23
Пирятинський	31,7	2,50	33,3	2,82	36,2	2,81	14,5	2,74	—	—	—	-31,7	-2,50
Полтавський	32,6	3,30	35,0	3,48	40,8	3,42	28,4	3,47	8,3	3,80	Підвищений	-24,3	+0,50
Решетилівський	24,5	3,20	42,7	3,28	29,3	3,25	9,7	3,10	—	—	—	-24,5	-3,20
Семенівський	42,8	3,50	28,9	3,40	55,9	3,49	28,3	3,13	—	—	—	-42,8	-3,50
Хорольський	65,7	3,58	47,7	3,63	58,4	3,14	47,9	3,09	25,5	3,62	Підвищений	-40,2	+0,04
Чорнухинський	22,3	2,37	23,9	2,51	24,0	2,60	23,1	2,56	13,2	2,67	Середній	-9,1	+0,30
Чугівський	35,7	4,10	30,6	4,13	35,2	3,94	30,5	3,88	—	—	—	-35,7	-4,10
Шипацький	39,9	3,86	30,1	3,75	37,1	3,38	38,1	3,48	33,2	3,33	Підвищений	-6,7	-0,28
Загалом	1037,5	3,33	969,6	3,39	1069,8	3,26	774,3	3,15	371,7	3,09	Підвищений	-665,8	—
Sx	—	0,10	—	0,09	—	0,08	—	0,08	—	0,06	—	—	—
V, %	—	16,0	—	13,8	—	12,6	—	12,9	—	13,6	—	—	—
S	—	0,53	—	0,47	—	0,41	—	0,41	—	0,45	—	—	—

Аналізуючи динаміку вмісту гумусу за 24 роки досліджень встановлено, що з 25 районів області рівень його вмісту збільшився у 12 районах. Збільшення показника вмісту варіює у межах 0,02–0,81%. Найбільше збільшення показника вмісту гумусу спостерігалось у В.-Багачанському від 3,59% до 4,40% (+0,81%), Полтавському від 3,30% до 3,80% (+0,50%) та Новосанжарському від 3,10% до 3,44% (+0,34%) р-нах. У всіх районах спостерігається істотне скорочення обстежених площ (6,4–50,2 тис. га), особливо у Глобинському (–50,2 тис. га), Семенівському (–42,8 тис. га) та Новосанжарському (–40,3 тис. га).

Водночас у 13 районах області спостерігається тенденція до зниження вмісту гумусу в ґрунтах (0,01–4,10%), зокрема у Чутівському (–4,10%), Семенівському (–3,50) та Решетилівському (–3,20%). У чотирьох районах ґрунти за ступенем забезпеченості перейшли до нижчої градації: у Гадяцькому, Кобеляцькому та Котелевському р-нах із підвищеного до середнього вмісту, а у Машівському — з високого до підвищеного вмісту. У трьох районах ґрунти за ступенем забезпеченості перейшли до вищої градації: у В.-Багачанському з підвищеного до високого вмісту, а у Лубенському та Оржицькому — з середнього до підвищеного вмісту. Тобто, якщо у VII турі переважали ґрунти з підвищеним вмістом гумусу, то в XI турі збільшилася частка ґрунтів із середнім вмістом, що свідчить про погіршення гумусного стану ґрунтів в області. Ця тенденція є тривожною, оскільки вона вказує на поступове зниження родючості ґрунтів та їх потенціалу для забезпечення високих урожаїв. Тому важливо впроваджувати ефективні заходи щодо підвищення вмісту гумусу та забезпечення стабільної родючості ґрунтів у майбутньому.

Однією з актуальних екологічних проблем є деградація органічної речовини в родючих ґрунтах, зокрема в чорноземах. Цей процес має не лише регіональний, а й загальнодержавний характер, адже зменшення вмісту гумусу фіксується практично на всій території чорноземного поясу України.

Втрати органічної речовини є істотними та безпосередньо впливають на агрономічну ефективність ґрунтів. Для компенсації продуктивних втрат гумусу та підтримання бездефіцитного балансу необхідно щороку вносити в середньому 9–10 т/га органічних добрив [1; 8]. Основним стримувальним чинником досягнення внесення такої кількості органічних добрив є постійне скорочення поголів'я худоби, не тільки у сільськогосподарських підприємствах, а й в господарствах населення.

Для збільшення внесення органічної речовини в Полтавській обл. в останні роки більш широко застосовується побічна продукція та рослинні рештки сільськогосподарських культур [14]. У 2019–2020 рр. було внесено 1297,8 тис. т побічної продукції. Одним із суттєвих джерел відновлення гумусового стану ґрунту є внесення соломи та інших органічних решток шляхом їх приорування. Систематичне використання соломи як органічного добрива стимулює розвиток ґрунтової мікрофлори, що, своєю чергою, сприяє поліпшенню поживного балансу та біологічної активності ґрунтового середовища.

ВИСНОВКИ

Порівняно з VII туром (1996–1990 рр.) агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення у XI турі (2016–2020 рр.) середньозважений вміст гумусу в ґрунтах Полтавської обл. залишався в межах підвищеного рівня забезпеченості (3,33%). Площа обстеження в XI турі становила 665,8 тис. га.

Стабілізація вмісту гумусу у ґрунті зумовлена трансформацією структури посівних площ та впровадженням технологій мінімального обробітку ґрунту, які останніми роками набули значного поширення.

Для забезпечення відтворення родючості ґрунтів, зокрема підвищення вмісту гумусу в умовах кризових явищ аграрного виробництва, необхідно здійснювати комплекс заходів: вносити органічні добрива; оптимізувати співвідношення просяних культур у сівозмінах; мінімізувати механічний обробіток ґрунту; максимально

використовувати побічну продукцію сільськогосподарських культур; вирощувати сидеральні культури з подальшим їх зароблянням у ґрунт.

Важливо також враховувати місцеві агрокліматичні умови та адаптувати агро-

технічні заходи відповідно до специфіки кожного регіону. Тільки за умови комплексного підходу до управління родючістю ґрунтів можна забезпечити їх стале використання та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ласло, О. О., Олєпір, Р. В., & Диченко, О. Ю. (2024). Оцінка продуктивності ґрунтів за вмістом гумусу. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Сер.: Сільськогосподарські науки*, 3(44), 38–42. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-3.6>.
2. Tkachenko, V., & Trofymenko, P. (2020). Humus content for different use of sod podzolic sandy loam soil and CO₂ emissions lost. *Scientific Reports NUBiP Ukraine*, 8(4), № 2, 76–87. DOI: <https://doi.org/10.31548/dopovid2020.02.007>.
3. Tanchyk, S. P., Tsentylo, L. V., & Tsyuk, O. A. (2022). Balance of nitrogen, phosphorus, potassium in the soil depending on farming systems in crop rotation. *Agrology. NUBiP Ukraine*, 5, № 3. 92–96. URL: <https://agrologyjournal.com/index.php/agrology/article/view/108/109>.
4. Karbivska, U., Masyk, I., & Butenko, A. (2022). Nutrient Balance of Sod-Podzolic Soil Depending on the Productivity of Meadow Agrophytocenosis and Fertilization. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(2). 70–77. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/144957>.
5. Litvinov, D. V., Litvinova, O. A., Dehodiuk, S. E., & Dmitrenko, O. V. (2020). Influence of systematic fertilizer on biological activity of gray forest soil. *Plant and Soil Science*, 11(3). 97–104. DOI: <https://doi.org/10.31548/agr2020.03.097>.
6. Примак, І. Д., Войтовик, М. В., Устинова, Г. Л., Ображій, С. В., & Панченко, О. Б. (2025). Біологізація систем удобрення зерно-просапної сівозміни у Правобережному Лісостепу України. *Агробіологія*, 1. 130–140. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2025-195-1-130-140>.
7. Shevtsova, L. K., Khaidukova, K. P., & Kuzmenko, N. N. (2020). Long term organo mineral fertilization influence on sod podzolic soil fertility: humus balance, crop productivity, humic substances. *Agrovisnyk*, 8. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-02>.
8. Khomenko, T., Tonkha, O., & Pikovska, O. (2023). Humus and nitrogen content of sod podzolic soil under the influence of biopreparations for potato cultivation. *Plant and Soil Science. NUBiP Ukraine*, 14, № 1. 82–95. DOI: <https://doi.org/10.31548/plant1.2023.82>.
9. Яцук, І. П., & Балюк, С. А. (Ред.). (2019). *Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення*. Київ.
10. ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначення органічної речовини (2005). [Чинний від 2005-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
11. Звіт про виконання проектно-технологічних та науково-дослідних робіт (2006). Полтава. Полтавський центр «Облдержродючість».
12. Звіт про виконання проектно-технологічних та науково-дослідних робіт (2011). Полтава. Полтавський центр «Облдержродючість».
13. Звіт про виконання проектно-технологічних та науково-дослідних робіт (2016). Полтава. Полтавська філія ДУ «Держґрунтохорона».
14. Звіт про виконання проектно-технологічних та науково-дослідних робіт (2021). Полтава. Полтавська філія ДУ «Держґрунтохорона».

Дата першого надходження рукопису до редакції: 13.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.12.2025

Дата публікації: 27.02.2026

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДООЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД ДЛЯ ЗРОШЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ЗМІН КЛІМАТУ

О.Ф. Рильський¹, Ю.Ю. Петруша², Н.М. Притула¹,
К.О. Домбровський¹, М.Д. Безуглий³

¹Запорізький національний університет (м. Запоріжжя, Україна)

e-mail: rylsky@ukr.net; ORCID: 0000-0002-9631-1828

e-mail: prytulanataliam@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8949-0824

e-mail: dombrov1717@ukr.net; ORCID: 0000-0001-6965-6989

²Національний університет «Запорізька політехніка»

(м. Запоріжжя, Україна)

e-mail: Yulia.ZNU@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3041-2877

³Державний біотехнологічний університет (м. Харків, Україна)

e-mail: bezugly_m@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1659-3029

Зміни клімату і виробнича діяльність людини мають загальнопланетарний характер та істотно впливають на всі складові біосфери. Одним із найуразливіших компонентів біосфери є Вода і людство вже страждає від дефіциту питної води і зниження її якості, нестачі водних ресурсів для ведення господарської діяльності загалом та сільськогосподарського виробництва, зокрема. Тому існують об'єктивні причини для розробки новітніх технологій і системи практичних заходів із пошуку нових водних джерел та зменшення обсягів води на виробництво одиниці продукції. Як додаткове джерело водних ресурсів, автори пропонують використовувати стічні води (після міських очисних споруд), попередньо доочищені в штучно-природних системах, а потім направляти їх на зрошення сільськогосподарських угідь (насамперед, на півдні України). Для такого штучно створеного шляху води до малих річок треба застосовувати яри, балки, штучно прориті канали, модифіковані греблі малих річок із використанням носіїв біоти, систем Solar-bi та особливостей місцевого ландшафту. Одним із найважливіших за значенням для виживання людей напрямів використання води є зрошення. Інтенсивне землеробство в південних регіонах України можливе тільки за штучного зрошення, тому що реалізація високого рівня генетичного потенціалу сучасних гібридів і сортів сільськогосподарських культур можлива лише за оптимального водозабезпечення рослин. Система зрошення, що базувалася на традиційних технологіях поливу полів дощувальними машинами та, на незначних площах, поверхневого краплинного зрошення, значно постраждала за руйнації агресором Каховської греблі. Тому принципово важливим є вибір стратегії відновлення зрошення найбільшої в Україні Каховської зрошувальної системи у повоєнний період. На підставі власних результатів використання новітньої технології — внутрішньогрунтового краплинного зрошення рослин трубопроводами на глибині 30–40 см, що отримані в умовах посушливого клімату Запорізької обл., автори запропонували широкомасштабне впровадження цієї технології в Україні взагалі та у Каховській зрошувальній системі, зокрема. Наведені економічні розрахунки демонструють значні переваги даного методу порівняно з традиційними: майже вдвічі зменшується споживання води на одиницю рослинної продукції і на 20–30% збільшується урожайність сільськогосподарських культур. Проведені розрахунки допомогли авторам висунути гіпотезу щодо істотного зменшення площі водосховища під час відновлення Каховського гідровузла.

Ключові слова: доочищення стічної води, малі річки, біоплато, біоконвеєр, крапельне зрошення, Каховська система зрошення.

ВСТУП

Зміна клімату планети Земля сьогодні є беззаперечним явищем. Ця зміна безпосередньо впливає на всі структурні компоненти біосфери та зв'язки між ними, і на людську популяцію як складову біосфери. Надважливими і небезпечними є зміни в гідросфері як на локальних територіях, так і в біосфері загалом.

Зміни в гідросфері — це не тільки перерозподіл об'ємів води в різних областях біосфери, це прямий вплив змін клімату на найважливіший компонент життя — Воду. Сьогодні об'єми води, що випадають з опадами на окремих територіях — це не тільки природний чинник, пов'язаний зі зміною клімату, але й антропогенний чинник, який набув планетарного характеру.

Дискусії, роздуми, дослідження наукової спільноти про первинність домінантного впливу природних чи антропогенних чинників на зміни клімату мають бути замінені на розробку практичних заходів, які знизять небезпеку для людини через катастрофічний дефіцит питної води і припинять зростання смертності через «вбивства» людей за рахунок збільшення міських островів тепла.

Про проблему дефіциту води в Україні треба вести серйозну розмову вже сьогодні, бо динаміка дефіциту прискорюється щоразу під впливом зміни клімату. Не менш важливим, ніж питання дефіциту воду, є питання якості. З особливою гостротою проблема якості та дефіциту води стоїть для південних та південно-східних областей нашої країни.

Мета дослідження — покращити якість води в малих і великих річках України. Повернути якість води до першого класу чистоти в р. Дніпро. Використати потенціал доочищеної води (N, P, K, органічні речовини) за підземного крапельного зрошування сільськогосподарських культур.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Згідно з класифікацією ООН за запасами води, що формуються на території країни та є доступними для використання,

Україна є однією з малозабезпечених водними ресурсами країн Європи. Наприклад, водозабезпеченість населення в Австралії становить 7,7 тис. м³/людину, в Естонії — 7 тис. м³/людину, Великій Британії — 5,0 тис. м³/людину, а в Україні — лише 1,1 тис. м³/людину. За цим показником Україна знаходиться на 111 місці серед 152 країн світу, а серед 20 європейських країн посідає 17 місце. Значна частина українських територій навіть класифікується як критично малозабезпечена водними ресурсами (Миколаївська, Запорізька, Херсонська, Одеська обл.). Водночас саме південні області є найбільшими споживачами води. Динаміка дефіциту води прискорюється під впливом змін клімату та антропогенного чинника [1; 2].

Крім того, Україна має нерівномірний територіальний розподіл водних ресурсів, обмеженість водних ресурсів власного формування (50 млрд м³/рік), зокрема 21 млрд м³/рік підземних вод питної якості є захищеними від прямого техногенного забруднення (крім ґрунтових вод). За багаторічними дослідженнями в Україні ресурси поверхневого стоку становлять 95,2 млрд м³/рік, з яких місцевий стік — 54,7 млрд м³/рік, а решта — приплив. У маловодний рік ресурси поверхневого стоку сягають приблизно 75% від зазначених показників. Приплив здійснюється з Білорусі (58% від загального обсягу припливу), Росії (26%), Молдови, Угорщини, Польщі [1; 3].

Водні ресурси України займають площу близько 24,2 тис. км², що становить 4% від загальної території держави (603,7 тис. км²). До них належать річки, озера, водосховища, ставки та канали. Річкова мережа країни є відносно розрідженою (у середньому 0,34 км на 1 км²), тут відсутні великі природні водойми, а запаси підземних вод обмежені. Болота, які колись виконували функцію природного регулятора водності річок, нині значною мірою осушені. Тому, основними джерелами водних ресурсів України є місцевий і транзитний стік річок, запаси озер, штучних водойм та підземних горизонтів. Експерти підкреслюють, що Україна

характеризується значним антропогенним тиском на водні джерела й дефіцитом прісної води [4]. Значне покращання стану водних ресурсів має принести перехід України на новий басейновий принцип управління водними ресурсами, на думку І.В. Шуми-гай та М.В. Боярин [5; 6].

Прогнозований обсяг підземних вод України становить 61 689 тис. м³ на добу, проте їх розподіл по території є нерівномірним: найбільші запаси зосереджені на півночі та заході країни. Неєкологічне ведення сільського господарства, а також забруднення водних об'єктів промисловими підприємствами, у поєднанні з глобальним потеплінням та кліматичними змінами, призвели до зникнення тисячі малих річок, значного скорочення водності основних річкових систем та руйнування водних і прибережних екосистем [4; 7].

Вирішення проблеми якості води не можна розглядати окремо від питання дефіциту води. Як показує історія цих проблем, вони були завжди взаємопов'язаними і взаємозалежними. Для України основним джерелом питної та технологічної води є р. Дніпро. Від якості води в цій річці напряму залежить якість здоров'я людей, а також тривалість життя.

З радянських часів склалося так, що вода після очищення в міських біологічних очисних спорудах (починаючи з Києва, і далі Черкаси, Кременчук, Кам'янське, Дніпро, Запоріжжя та багато менших міст) безпосередньо через декілька сотень метрів або декілька кілометрів (Кам'янське – 5,7 км; Київ – 8,1 км; Запоріжжя: ЦОС-1 – 3,7 км, ЦОС-2 – 200 м; Дніпро – 400 м; Черкаси – 500 м) скидається в русло р. Дніпро. За висловом проф. П.І. Гвоздяка «*поєднали криниці з туалетами*» [8]. Зрозуміло, що за різних причин очищені стоки не завжди відповідають вимогам нормативно-правових документів. Тому сьогодні вода в р. Дніпро є III-го класу чистоти, і з великим наближенням може використовуватися в якості питної.

В Україні такими вченими, як П.І. Гвоздяк [8], Л.А. Саблій [9], С.В. Скок [10; 11], А.В. Шепель [12; 13] пропонуються різні

методи очищення та доочищення води, і переважно для подальшого її використання в зрошувальних системах. Так, С.В. Скок рекомендує доочишувати стічну воду після Херсонських очисних споруд на простих, поодиноких інфільтраційних спорудах та біоплато [14]. Втім такий підхід може бути достатнім, щоб використати воду на полях зрошення, але недостатнім для скиду в річки.

У 2017 р. Україна посіла перше місце в рейтингу розораних країн світу з орною площею 33,5 млн га. Станом на 2022 р. розораність території України сягала 53,9%, а сільгоспугідь – 78,2%. Для порівняння: у Польщі ці показники становлять 36,5% і 75,1%, у Німеччині – 34,1 й 71, у США – лише 17,5% та 38,9%. За кліматичними зонами найбільш розораною є степова зона – 81,2%, у Лісостепу цей показник сягає 80,8, а на Поліссі – 65,7%. Найвищий рівень розораності території зафіксовано в Кіровоградській обл. – 69,6%. До п'ятірки регіонів-лідерів також входять Миколаївська, Запорізька, Дніпропетровська та Вінницька обл. [15].

Зважаючи на найбільшу площу розораних земель в Європі й пов'язаний із цим ефект підвищеної температури над поверхнею розораних великих площ землі, Україною розораних великих площ землі, Україною може стати на прямий шлях до утворення «теплових островів» [16] не тільки в урбанізованих регіонах країни, але й на великих територіях, задіяних у сільськогосподарському виробництві. Висока температура повітря і ґрунту призводить до значної втрати врожаю і зневоднення ґрунтів, що, своєю чергою, впливає на зневоднення малих річок, а далі і великих – Дніпра, Дунаю, Десни, Прип'яті, Південного Бугу, Дністра, Сіверського Донця.

Надзвичайно важливим напрямом використання води малих і великих річок та внутрішніх і створених людиною водойм України є зрошення сільськогосподарських угідь. Важко переоцінити значення зрошення для вирощування зернових, олійних, бобових, овочевих і баштанних культур, фруктів і винограду у південних регіонах нашої держави. Основним джерелом води

для зрошення до війни було, безумовно, Каховське водосховище, греблю якого було зруйновано агресором у 2023 р. [17].

Наслідки руйнації греблі Каховського гідровузла для аграрного виробництва півдня України було детально проаналізовано такими вченими, як В.І. Пічура, І.П. Лопушинський, І.В. Саніна [17–19], а також у доповіді одного з авторів даної статті на конференції, що була організована Запорізьким національним університетом у червні 2023 р. [20]. Тому наразі тільки нагадаємо один із головних висновків тієї доповіді — *«збалансований розвиток агропромислового комплексу півдня України можливий тільки за умови відновлення зрошення»*.

Значне підвищення врожайності сільськогосподарських культур у інших регіонах держави можливе за рахунок використання води, що проходить доочистку після міських очисних споруд. Оскільки значна частина зрошувальних систем постраждала від військових дій і ці руйнації продовжуються, то відновлення зрошення після війни практично буде означати створення нової системи. Тому закономірно виникає питання: яку технологію зрошення потрібно буде застосувати у майбутньому? Нагадаємо, що основні методологічні засади зрошення базувалися на технологічних розробках 50–60-х років ХХ ст. і основним методом зрошення в Україні був полив полів дощувальними машинами. Чи не єдиним удосконаленням цієї технології було обмежене використання сучасних дощувальних машин закордонного виробництва, яке відбувалося у першому десятилітті ХХІ ст. Головним недоліком застосування дощувальних машин є великі непродуктивні втрати води, бо тільки на випаровування витрачалося до 70% води, що подавалася на поля.

В останнє довоєнне десятиріччя українські аграрії почали використовувати поверхневе крапельне зрошення, за якого вода подається до рослин через систему трубок, що розміщують у міжрядді посівів або посадок сільськогосподарських культур. Це більш ефективний метод засто-

сування води, але він знайшов обмежене використання у виробництві і переважно тільки у садівництві та виноградарстві. За вирощування польових культур основним методом залишається дощувальне зрошення.

Водночас, існує ще один метод зрошення — підгрунтове або, з нашої точки зору, правильно називати його внутрішньогрунтове краплинне зрошення (ВГКЗ), коли вода подається безпосередньо до кореневої системи рослин через трубки, що постійно знаходяться у ґрунті завглибшки 30–40 см. Хоча сам метод був винайдений ще в 1930-х роках ізраїльським інженером С. Блассом, його комерційне випробування відбулося тільки на початку 1960-х. Не зважаючи на досить тривалу історію винайдення ВГКЗ, його широке комерційне використання стало можливим тільки у ХХІ ст. Це пов'язано з розвитком сучасних технологій виготовлення полімерних трубопроводів та автоматизованих систем подачі води до рослин [21].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження було застосовано загальноприйняті теоретичні методи: аналіз, синтез, систематизацію та узагальнення даних із відкритих наукових джерел та результати власних досліджень.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На основі отриманих даних авторами запропоновано ефективний захід, який допоможе запобігти розвитку всіх вищенаведених негативних явищ. Для його реалізації необхідно поєднати потреби в поливній воді на великих територіях із системами доочищення стічної води після всіх обласних і районних центрів.

Із зруйнуванням Каховської греблі та за впливу військових дій у Херсонській, Запорізькій, Дніпропетровській і Донецькій обл. наразі стало особливо важливим, щоб після деокупації територій цих областей питання дефіциту води не стало несподіванкою.

Ідея авторів полягає в тому, що необхідно повністю використовувати доочищені стічні води (після біологічної очистки) для поливу сільськогосподарських земель у весняно-літній період під час інтенсивної вегетації сільськогосподарських культур.

Сьогодні очищені стічні води у всіх великих містах України скидаються у великі річки, зокрема в Дніпро. Це абсолютно недопустимо, адже Дніпро є основним джерелом питної води нашої держави.

Потрібно, щоб стічна вода після біологічного очищення в міських очисних спорудах пройшла стадію природно-штучного доочищення (рис. 1).

Вода від очисних споруд міста має пройти шлях через системи доочищення, потім потрапити в малі річки і далі, шляхом фільтрації через ґрунти сільськогосподарських земель, до русла великої річки.

Проходячи через штучно створені біоплато в штучних ставках і руслах вода повільно тече багатокілометровими звивистими шляхами до русла Дніпра та інших річок. Для такого штучно створеного шляху води до малих річок треба використовувати яри, балки, штучно прориті канали із застосуванням носіїв біоти, систем Solar-bi, особливостей місцевого ландшафту. Таке штучне «розтягування» шляху води від очисних споруд до русла річки — це найкраще використання принципу «біоконвеєра», запропонованого проф. П.І. Гвоздяком [8; 22].

Після систем доочищення стічних вод буде відбуватися не тільки покращання якості води до необхідних параметрів, але й резервування великих об'ємів води, що

можуть бути застосовані за вегетативного періоду у сільськогосподарських рослин, сприяючи підвищенню врожаю. Використання доочищеної стічної води на великих площах сільськогосподарських земель треба здійснювати через системи крапельного підземного зрошування, а також за допомогою смугової технології культивування полікультур на одній ділянці. Така технологія поливу дає максимальне підведення води до кореневої системи рослин невеликими регульованими порціями та сприяє мінімальному випаровуванню вологи. Крім того, це дасть змогу максимально використовувати потенціал доочищеної води (рослини отримують азотні, фосфатні та розчинні органічні речовини зі стічної води), економити добрива, забезпечити рівномірне зволоження ґрунту, покращити врожай та зменшити ріст бур'янів.

Після міських очисних споруд стічна вода, що скидається в Дніпро (з обласних центрів), має такі фізико-хімічні параметри: завислі речовини — 15–20 мг/дм³; БСК₅ — 5,0–6,5; ХСК — 70,0–85,0; азот амонійний — 0,71–0,79; азот нітритний — 0,20–0,27; азот нітратний — 35,0–38,0; розчинений кисень — 6,99–8,15; фосфати — 6,0–7,0; сульфати — 46,5–56,4; нафтопродукти — 0,3–0,5; СПАР — 0,3–0,5 мг/дм³ [23].

Головна вимога до якості води, після проходження всіх систем доочищення, — це відсутність у воді важких металів. Більшість інших елементів, що потраплять у ґрунти, будуть використані рослинами та іншою ґрунтовою біотою в конструктивному і енергетичному метаболізмі, або

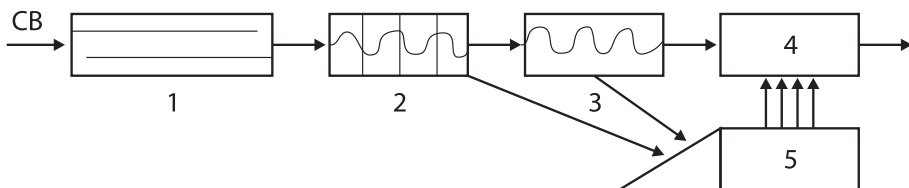


Рис. 1. Ланцюг доочищення стічної води від міських очисних споруд до русла великої річки:

- 1 — міські очисні споруди; 2 — штучні і природні системи доочищення води мозаїчного типу; 3 — малі річки з локальними системами доочистки; 4 — великі річки; 5 — сільськогосподарські землі

перетворені в хелатні комплекси. Після фільтрації через ґрунт вода в малі, а надалі у великі річки, буде потрапляти з поліпшеною якістю, що і є кінцевою метою запропонованого підходу покращання якості води в річках, та застосування її в сільському господарстві. Це дасть змогу наповнити річки України якісною водою, що пройшла етапи природно-штучного самоочищення.

Досвід інших вчених, наприклад, О.В. Лапань, Л.Е. Тимурова, М.О. Клименко [24–26] та наш досвід [27] використання штучно створених біоплато (рис. 2) в очисних спорудах «Мотор Січ» (для доочищення води), а також штучних носіїв у р. Капустяніці (для доочищення води після промислового шламонакопичувача), вказує на те, що шлях води по системах доочищення має бути довгим (3–4 км, а краще більше). Тоді утворюється стійка система трофічних ланцюгів між гідробіонтами.

Така глибока доочистка води процесами самоочищення і є додатковим джерелом якісної води для сільськогосподарського використання.

Метод внутрішньогрунтового краплинного зрошення має істотні переваги порівняно з дощувальним поливом (ДП) і поверхневим краплинним зрошенням (ПКЗ). Як показують чисельні дослідження закордонних авторів [28–30], цей метод знижує реальне споживання води на 30–50% порівняно з методами ДП і ПКЗ за однакового

рівня врожайності та забезпечує найвищу ефективність використання зрошувальної води за рахунок подачі її безпосередньо у кореневу зону та мінімізації витрат за рахунок випаровування і стоку. Ці переваги сприяли стрімкому впровадженню ВГКЗ у виробництво. Так, у 2023 р. такі системи застосовувалися на площі 3,7 млн га, тоді як у 2021 р. такі площі становили всього 2,6 млн га. Переважна частина цих площ зосереджена в аграрно розвинутих країнах: США, країнах ЄС (Іспанія, Франція, Італія), Австралії та Ізраїлі.

На жаль, в Україні внутрішньогрунтове краплинне зрошення поки що має вкрай обмежене використання і загальна площа, де воно застосовується, не перевищує 1000 га. Ми здійснювали дослідження використання ВГКЗ у компанії «СВАМ», яка розміщується у с. Миколай-Поле Запорізької обл. Засновником і керівником цієї компанії є В.О. Матросенков, один із піонерів використання цього методу в Україні. У довоєнні роки ним отримувалися рекордні врожаї кукурудзи (до 16 т/га) та соняшника (до 4,7 т/га) на площі близько 300 га за умови виконання всіх технологічних вимог.

Важливою перевагою сучасних технологій ВГКЗ є можливість внесення мінеральних добрив через трубопроводи подачі води безпосередньо до кореневої системи рослин. Азотні добрива вносяться у формі безводного аміаку за підключення цис-



Рис. 2. Створення штучних біоплато:

- а – щойно змонтовані плотики зі штучним носієм «ВІЯ»;
б – біоплато через 2 міс. після встановлення

терни з газоподібним аміаком до системи зрошення, а фосфорні — таким самим методом, у формі ортофосфорної кислоти. Такий метод не тільки гарантує майже 100%-ву доставку поживних речовин до рослин, але і є значно дешевшим від традиційних методів внесення добрив у вигляді азотних чи фосфорних солей. Так, вартість 1 кг діючої речовини азоту дешевше в 1,5 раза, а 1 кг діючої речовини фосфору — втричі, що зменшує собівартість 1 т врожаю на 15–20%.

Важливим елементом підвищення врожайності є і особливості вегетативного росту рослин за умов використання ВГКЗ. Як показують наші спостереження, за застосування такого методу зрошення істотно змінюється формування кореневої системи. Майже всі корені формуються навколо трубопроводу з водою і розчиненими у ній добривами завглибшки 30–60 см, загальна маса кореневої системи коротша в 3–4 рази і легша в 1,5–2 рази від такої у рослин, що вирощуються за традиційними технологіями. Тому, більша частка поживних речовин використовується для росту надземної частини рослин і подальшого збільшення врожайності.

Досвід застосування ВГКЗ у компанії «СВАМ» чітко вказує, що високий кінцевий результат може бути досягнутий тільки за умови комплексного підходу щодо виконання технологічних вимог вирощування сільськогосподарських культур. Прогресивна технологія внутрішньогрунтового зрошення дійсно забезпечує оптимальні умови водного живлення рослин і здешевлює внесення основних мінеральних добрив, що є базовою складовою отримання високого врожаю. Крім того, підбір сортів і гібридів сільськогосподарських культур, збалансоване живлення всіма необхідними мінеральними елементами, вибір методів захисту рослин від бур'янів, хвороб та шкідників також відіграють надзвичайно важливу роль для отримання високого рівня рентабельності. За умов збалансованого виконання усіх технологічних умов зростання врожайності порівняно зі зрошенням дощувальними машинами сягало 60% для

кукурудзи (від 10 до 16 т/га) і 47% для сояшника (від 3,2 до 4,7 т/га).

Як відзначено нами вище, метод внутрішньогрунтового краплинного зрошення має істотні переваги порівняно з методами дощувального поливу та поверхневого крапельного зрошення. Втім цей метод має істотний недолік: це висока вартість матеріалів, обладнання та робіт із монтажу системи. Середні витрати становлять 3,5–4 тис. дол. США залежно від комплектації обладнання, що у 2–2,5 рази перевищує вартість інших технологій. Для створення системи ВГКЗ на мінімально доцільній площі 100 га потрібна інвестиція в розмірі 16–17 млн грн за курсом НБУ на день написання даної статті. Тому, складається враження, що великий обсяг інвестицій, що потрібні для впровадження ВГКЗ на значних площах, є основним стримувальним чинником для українського аграрного бізнесу. Однак більш ретельний економічний аналіз пояснює, що такі переваги ВГКЗ, як зменшення до 50% обсягу води на одиницю продукції та підвищення врожайності на 20–30, а в окремих випадках і на 50%, дають додатковий річний прибуток з одного гектара у розмірі 600–1000 дол./га. Такий додатковий прибуток надає змогу повернути початкові інвестиції за 4–6 років, що є дуже добрим показником для аграрного бізнесу. За умов, що якісні матеріали і обладнання мають працювати не менше 14 років, а останні розробки уже гарантують і 20 років експлуатації, інвестиції даватимуть прибуток у розмірі 150–350% за період повної амортизації обладнання. Ці розрахунки показують, що для широкого впровадження методу ВГКЗ аграріям потрібні довготермінові кредити на 5–6 років на прийнятних умовах кредитування. Якщо усвідомити, що проблема зрошення у південних регіонах має не тільки велике значення для сільського господарства, але й визначатиме розвиток переробної і харчової промисловості та впливатиме на соціальний статус українського села півдня, то для широкомасштабного введення новітнього методу ВГКЗ потрібна розробка відповідної державної програми розвитку

зрошення на кшталт такої, що було зроблено українськими вченими у 50-х роках ХХ ст. під час будівництва Каховської системи.

Подальше використання ВГКЗ аграріями України потребує кратного зростання кількості досліджень у цій галузі, до чого ми і закликаємо наукову спільноту нашої держави.

І останнє, на що хотілося би звернути увагу колег науковців і керівників галузі, що будуть ухвалювати рішення щодо відновлення функціонування Каховського гідровузла. Обсяг води, що накопичувався у Каховському водосховищі, визначався, насамперед, потребою водних ресурсів на зрошення майже 1,5 млн га у Криму, Херсонській, Запорізькій та Дніпропетровській обл. Обсяг води, що накопичувався у водосховищі, встановив площу водної поверхні, яка дорівнювала майже 220 тис. га.

Якщо обрати основною іригаційною технологією майбутнього внутрішньогрунтове краплинне зрошення та використання доочищеної стічної води, то обсяги води для зрошення тих самих площ, можуть бути вдвічі меншими. А це дає змогу істотно зменшити площу Каховського водосховища за збереження площ зрошення, що поверне державі десятки тисяч гектарів українських чорноземів. Цю пропозицію просимо вважати гіпотезою, бо проблема

потребує більш глибокого наукового аналізу, вимагає виконання значного обсягу проектних робіт і будівництва великої кількості гребель.

ВИСНОВКИ

Для повернення води в головних річках держави до природної якості, а також у середніх і малих річках, автори запропонували заборонити прямий скид води після очисних споруд в русло річок, а провести очищену стічну воду через багатокілометрові системи доочищення, і тільки після цього скидати воду у водойми, та широко використовувати як джерело води для зрошення сільськогосподарських угідь.

Необхідно доочищення води здійснювати використовуючи штучно-природну систему мозаїчного типу, де біоплато чергуються з каналами, в яких змонтовані системи з штучними носіями для іммобілізації мікробіоти, ставками-накопичувачами, і лише потім подавати воду на сільськогосподарські землі. Такі штучно-природні системи дають змогу не тільки набагато глибше очистити воду, але й запобігти зараженню ґрунтів яйцями гельмінтів.

Внутрішньогрунтове зрошення має стати основним методом зрошення на всій території України і бути базовою технологією за відновлення роботи Каховського гідровузла.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кичко, І. І., Маргасова, В. Г., Виговська, В. В., Дерій, Ж. В., Приступа, А. Л., & Холодницька, А. В. (2023). *Безпека водокористування: фактори впливу та еколого-економічний механізм реалізації: моногр.* Чернівці: НУ «Чернівецька політехніка».
2. Мірошніченко, В. В. (2021). Водозабезпеченість населення України: рівень, проблеми та напрями їх розв'язання. *Наукові записки НАУКМА. Економічні науки*, 6(1), 99–104. DOI: <https://doi.org/10.18523/2519-4739.2021.6.1.99-104>.
3. Авраменко, Н. Л., Сагайдак, І. С., & Чорна, Т. М. (2018). *Економіка водокористування: стан, проблеми, перспективи: моногр.* Київ: ТОВ «7БЦ».
4. Врадій, О. І. (2023). Вплив рівня мінералізації питної води на вміст в ній важких металів. *Сільське господарство та лісівництво*, 31, 192–208. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-4-14>.
5. Шумигай, І. В., & Душко, П. М. (2025). Особливості управління водними ресурсами за басейновим принципом. *Вода для майбутнього: управління, збереження, інновації: збірник тез XIII Міжнародної конференції «Безпека водокористування: фактори впливу та еколого-економічний механізм реалізації: моногр.»* Чернівці: НУ «Чернівецька політехніка».
6. Боярин, М. В. (2025). *Оптимізація екологічного стану річково-басейнових екосистем верхів'я Прип'яті* [Автореф. дис. д-ра сільськогосподарських наук, Волинський національний університет ім. Лесі Українки]. URL: <https://nuwm.edu.ua/activity/science/council/permd4710405/zakhystdysertatsiiazdobuttiastupeniadoktorasilskohospodarskykh nauk/>.
7. Томільцева, А. І., Яцик А. В., Михайленко, Л. Є., Барановська, В. Є., Курилюк, М. С., Мокін, В. Б., ... Юречко, Ю. О. (2017). *Екологічні основи управління водними ресурсами.* Київ: Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування.

8. Гвоздяк, П. І. (2019). *Біохімія води. Біотехнологія води (автомонографія)*. Київ: Видавничий дім «Києво-Могилянська академія».
9. Sabliy, L., Kuzminskiy, Y., Zhukova, V., Kozar, M., & Sobczuk, H. (2019). New approaches in biological wastewater treatment aimed at removal of organic matter and nutrients. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 26(2), 331–343. DOI: <https://doi.org/10.1515/eces-2019-0023>.
10. Скок, С. В. (2020). Вплив зливових та каналізаційних стічних вод на якість річки Дніпро в зоні дії Херсонської урбосистеми. *Вісник Уманського національного університету садівництва*, 2, 122–129. DOI: <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2020-2-122-129>.
11. Скок, С. В. (2021). Науково-технологічний аспект удосконалення процесів очистки стічних вод в межах урбосистеми міста Херсон. *Водні біоресурси та аквакультура*, 1(9), 216–227. DOI: <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.16>.
12. Шепель, А. В. (2025). Використання стічних вод для поливу сільськогосподарських культур. *Вода для майбутнього: управління, збереження, інновації: збірник тез XIII Міжнарод. наук.-практ. конф.* (с. 305–309). Київ: Інститут водних проблем і меліорації НААН. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg2025>.
13. Шепель, А. В. (2025). Інноваційні рішення краплинного зрошення в умовах зміни клімату та водного дефіциту. *Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії: зб. наук. пр.* (с. 12–15). Кропивницький — Херсон: ХДАЕУ.
14. Скок, С. В. (2021). Оцінка придатності стічних вод для зрошення сільськогосподарських культур. *Аграрні інновації*, 5, 75–79. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.5.12>.
15. Демченко, О. В. (2024). Екологічна характеристика сільських територій України: сучасні реалії. *Економіка та суспільство*, 66, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-20>.
16. Гуделл, Д. (2024). *Палюче тепло вже нас найперше*. Рівне: Видавель Тетяна Кідрук.
17. Пічура, В. І., Потравка, Л. О., & Білошкурченко, О. С. (2025). Дослідження наслідків руйнації каховської дамби та осушення водосховища для населення України. *Водні біоресурси та аквакультура*, 1(17), 218–247. DOI: <https://doi.org/10.32782/wba.2025.1.20>.
18. Лопушинський, І. П., & Проніна, О. В. (2024). Підлив Каховської ГЕС: наслідки для екологічної безпеки України. *Вісник ХНТУ*, 1, 372–377. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.52>.
19. Саніна, І. В., & Люта, Н. Г. (2023). Екологічні наслідки підливу греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінеральні ресурси України*, 2, 50–55. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55>.
20. Рильський, О. Ф., Безуглий, М. Д., Домбровський, К. О., & Лапченкова, М. Ю. (2024). Негативні наслідки осушення Каховського водосховища на водні та наземні екосистеми внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС. *«Russia–Ukraine War: Consequences for the World»* (с. 111–113). Dnipro: FOP Marenichenko V.V. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/02/МАКЕТ-ZBIRNIKA-Conference-Proceedings-February-1-2-2024.pdf>.
21. Шатковський, А. П., & Журавльов, О. В. (2021). *Наукові основи технологій краплинного зрошення сільськогосподарських культур: моногр.* Херсон: Гельветика.
22. Гвоздяк, П. І. (2014). До соті річниці активованого мулу. Біоконвеєр: «українська модифікація» технології активованого мулу. *Водопостачання та водовідведення*, 1, 29–32.
23. Муніципальний енергетичний план Запоріжжя 2014–2030 (2014). URL: https://zr.gov.ua/upload/editor/1-1-_municipalnij_energetichnij_plan_zaporizhzhya.pdf.
24. Лапань, О. В., & Міхеєв, О. М. (2019). Біоплато для очищення водних об'єктів від важких металів. *Доповіді Нац. акад. наук України*, 9, 77–81. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.09.077>.
25. Тимурова, Л. Е., Файчук, В. В., Катков, М. В., & Пашкевич, Л. П. (2025). Нова система використання біоплато для очистки річок гірської зони формування стоку. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2, 32–38. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-32-38>.
26. Клименко, М. О., Рильський, О. Ф., Варжель, О. В., Домбровський, К. О., & Петруша, Ю. Ю. (2024). *Екотехнології очистки стічних вод: навч. посіб.* Рівне: НУВГП.
27. Dombrovskiy, K. O., Rylskiy, A. F., Gvozdiak, P. I., Sherstoboieva, O. V., & Petrusha, Y. Y. (2020). Distribution of inorganic nitrogen compounds in purification of storm wastewater of the engine-building manufactory. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 112–118. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/112>.
28. Guo, J., Zhang, X., & Li, X. (2023). Meta-analysis of crop yield and water use efficiency under subsurface vs. surface drip irrigation. *Sustainability*, 15(22), 15716–15732. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152215716>.
29. Thamer, Y. T., Thamer, R. R., & Al-Rumaidhy, E. S. (2018). Effect of drip irrigation depths on growth and yield of maize (*Zea mays* L.). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 93(2), 163–168. DOI: <https://doi.org/10.56093/ijas.v93i2.132048>.
30. Kaliley, V., & Shatkovskiy, A. (2022). Water regime and efficiency of growing sunflower hybrids depending on the elements of drip-irrigation technology. *Land Reclamation and Water Management*, (2), 75–80. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202202-343>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 22.12.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.02.2026
 Дата публікації: 27.02.2026

ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ СТРУКТУРИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ АКТИВНОСТІ МІКРОБІОМУ ҐРУНТУ

А.А. Бунас, О.В. Шерстобоева, К.І. Бондаренко, М.В. Дворецький

Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: bio-206316@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4806-7004

e-mail: ovsher@ukr.net; ORCID: 0000-0001-8239-0847

e-mail: kirill.bondarenko666@gmail.com; ORCID: 0009-0002-3429-0897

e-mail: dvoreckij7@gmail.com; ORCID: 0009-0002-9324-7696

Окреслено глобальний контекст, у якому мікробіом розглядають як критичний біо-індикатор «здоров'я ґрунту» та продовольчої безпеки, що відображено в міжнародних екологічних стратегіях та нормативних актах. Проаналізовано масштаби застосування пестицидів у світі та Україні, показано їхній негативний вплив на структуру мікробних угруповань, метаболічну активність та стабільність екосистем. Встановлено, що хімічні засоби захисту здатні порушувати функціональні мережі мікробіоти, формувати резистентні популяції, знижувати біорізноманіття та впливати на цикли C і N, що посилює екологічні ризики. Показано, що альтернативою для відновлення та цілеспрямованого корегування мікробіомів агроценозів є біологічний захист, який передбачає використання PGPR бактерій, мікроміцетів, та вірусних агентів. Однією з переваг біопрепаратів є їх здатність активувати мікробні мережі, заповнюючи вільні ніші й відповідно забезпечуючи стійкість та резильєнтність ґрунтового середовища. Крім того, відновлення мікробіому не є автоматичним процесом, тому потребує системного контролю й науково обґрунтованого моніторингу. Метою роботи було узагальнення сучасних наукових підходів до оцінки структури та функціональної активності ґрунтових мікробіомів на основі культуральних, молекулярних, метагеномних і біохімічних методів з урахуванням тенденцій біологічного контролю, зниження пестицидного навантаження та відновлення ґрунтової біоти. Сформовано цілісне бачення переваг і недоліків культуральних, молекулярних і метагеномних методів кількісної та структурної оцінки мікробіомів, аргументовано доцільність використання інтегрованих індексів «здоров'я ґрунту» та екологічного моделювання для прогнозування довгострокової стійкості агроекосистем. Наведені дані огляду формують методологічну основу для системного моніторингу та науково обґрунтованого управління мікробіомами в умовах сталого землеробства.

Ключові слова: біологічний захист, біопрепарати, health soil, qPCR, PLFA, емісія CO₂, мікробна біомаса, ґрунт.

ВСТУП

Мікробіом — це сукупність мікроорганізмів, які живуть у певному середовищі з мікробними структурами та речовинами, які вони продукують. Мікробіоми, котрі специфічні за своїм складом та функціями можна зустріти в організмі людини, тварин, рослин, ґрунтах, океанах та інших середовищах. Ці поєднання мікроорганізмів у кожному середовищі є унікальними.

Мікробіом ґрунту складається з ґрунтової мікробіоти, а також мікробних структур, генетичних елементів та реліктової ДНК.

Всі мікроорганізми ґрунту зазвичай поділяють на чотири основні групи (бактерії, гриби, археї та протисти), саме вони становлять приблизно 80% біомаси Планети. Чисельність прокариот (бактерій і архей) оцінюють щонайменше $4\text{--}6 \cdot 10^{30}$ КУО/ґ ґрунту [1]. Процес формування родючості ґрунту найбільшою мірою залежить від життєдіяльності мікроорганізмів, які є стародавніми ґрунтоутворювачами, що діяли задовго до появи вищих рослин і тварин. Відомо, що міжмікроорганізмні взаємодії з'явилися щонайменше 3,5 млрд років тому, а рослинно-мікроорганізмні виникли не більше як 450 млн років тому [1; 2].

Останнім часом на міжнародних конференціях та симпозиумах у контексті поняття «health soil» дедалі частіше наголошують на важливості підтримки і формування біорізноманіття ґрунту, а саме мікроорганізмів. Це пов'язано не лише з тим, що ґрунтові мікроорганізми визначають основні показники «health soil», продовольчої безпеки та глобальних змін клімату, а безпосередньо впливають на формування імунітету і здоров'я людей.

Інтенсивне застосування хімічних засобів захисту в рослинництві змінює структуру та функції мікробіоценозів, що має як негайні (наприклад, зниження активності нітрифікації), так і відстрочені наслідки (зміни стабільності біоценозів). Відповідно до екологічних стратегій (*Farm to Fork Strategy*, *EU Soil Monitoring Law*) та директив ЄС (*EU Soil Strategy for 2030*) мікробіом визначається як вирішальний біоіндикатор і об'єкт управління. Незалежно від походження, природні чи штучно сформовані мікробіоценози агроєкосистем, саме вони формують функціональну основу біологічної продуктивності та ґрунтової екологічної рівноваги, визначаючи колообіг елементів, трофічні взаємодії, рівень фітопатогенного тиску та здатність рослин до толерантності, епізоотії у шкідників сільськогосподарських культур тощо.

Отже, сучасні біологічні засоби захисту (біоінсектициди, біофунгіциди, біодобрива) пропонують альтернативні або комплементарні рішення, але їх вплив на функціонування і структуру мікробіоценозів, зміни резистомів, ферментативних профілів і мікробних взаємодії потребують системного оцінювання. Метааналізи та систематичні огляди демонструють, що використання пестицидів та агрохімікатів здатні спричинити істотні й кумулятивні порушення ґрунтових функцій, які підкреслюють необхідність застосування кількісних методів для об'єктивного моніторингу цих змін [3].

Метою роботи є узагальнення сучасних наукових підходів до оцінки структури та функціональної активності ґрунтових мікробіомів в агроценозах на основі куль-

туральних, молекулярних, метагеномних і біохімічних методів з урахуванням глобальних тенденцій біологічного контролю, зниження пестицидного навантаження та відновлення ґрунтової біоти.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Упродовж останнього десятиліття наукова парадигма еволюювала від описового аналізу таксономічного складу мікробних угруповань до інтегрованого підходу, що поєднує структурні, функціональні, просторові та динамічні характеристики мікробіомів [4; 5]. В. Скляр [6] акцентує увагу саме на тому, що ґрунтові мікробіоми, як природні, так і штучно сформовані є ключовою складовою біорізноманіття педосфери, а їх функціонування важливе для екосистемної стійкості. Р. Nannipieri зі співавт. [7] показали, що ферментативна активність є чутливим індикатором змін у ґрунтовому середовищі та відображає інтегрований метаболічний потенціал мікробних спільнот. М.Д. Wallenstein і Е.К. Hall [8] наголошують, що поєднання біохімічних методів з аналізом експресії функціональних генів (метатранскриптоміка) дає змогу перейти від оцінки потенційної функції до аналізу реально реалізованих процесів у ґрунті. Такий підхід є особливо важливим для агроценозів, де мікробна активність істотно змінюється під впливом агротехнічних заходів. J.K. Jansson і K.S. Hofmockel [4] зазначають, що саме системний аналіз допомагає встановити функціональні зв'язки між мікробіомами й екосистемними сервісами, зокрема регуляцією вуглецевого балансу та емісії парникових газів.

В умовах біологізації сільського господарства зростає інтерес до штучно сформованих мікробіомів і мікробних консорціумів, спрямованих на оптимізацію живлення рослин та підвищення їх стійкості [9]. Р. Trivedi та співавт. [10] підкреслюють, що ефективність таких інтервенцій значною мірою визначається сумісністю введених мікроорганізмів із автохтонним мікробіомом та його функціональною організацією.

Це зумовлює необхідність попередньої комплексної оцінки природного мікробіому агроценозу. В. Волкогон [11] зауважує, що застосування біопрепаратів доцільно оцінювати не лише за приростом урожайності, а й за змінами ферментативної активності та мікробної біомаси ґрунту. О. Дем'янюк та ін. [12] встановили істотні зональні відмінності у функціональній активності мікробіомів ґрунтів України, що підтверджує необхідність регіоналізованих підходів до їх оцінки.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Згідно з даними FAO, в 2023 р. [13] використано 3,73 млн т за діючими речовинами пестицидів, це у середньому навантаження по світу становило 2,4 кг/га, в Європі цей показник сягав 1,59 кг/га, в Океанії — 5,64 кг/га. В Україні, відповідно до даних Держстату [14], в 2021 р. сільгоспвиробниками використано 840,1 т пестицидів (фунгіциди і бактерициди — 147,9 т; гербіциди — 595,5; інсектициди та акарициди — 30,2; регулятори росту рослин — 64,9; інші — 1,6 т), у середньому це 1,4 кг/га. Пестициди знижують функціональну активність та різноманітність ґрунтових біот (ефект розміром від слабкого до помірного — залежно від класу, дози та частоти застосування). Дослідження показують, що різноманітність сумішей застосованих пестицидів посилює негативний ефект на функції мікробіоти [15]. Доведено, що фунгіциди найчастіше впливають на грибну компоненту, змінюють співвідношення мікроміцети/бактерія, відновлення може бути повільним; більшість фунгіцидів знижують «ґрунтове дихання» і загальну біологічну активність ґрунту [16].

Стосовно результатів використання гербіцидів вчені отримують різні суперечливі дані досліджень. З одного боку, гербіциди на основі діючої речовини glyphosate, фіксують зсуви у складі мікробіоти та зміни функцій; інші діючі речовини викликають слабкі або тимчасові ефекти [17]. Інсектициди на основі неонікотиноїдів можуть знижувати чисельність деяких груп та впливати на ґрунтові безхребетні, що опо-

середковано діє на мікробіологічні процеси.

Однак застосування пестицидів та агрохімікатів супроводжується істотними ризиками: призводить до відбору резистентних популяцій мікроорганізмів із деградацією ґрунтової мікробіоти, зниження біорізноманіття, накопичення й потрапляння потенційно токсичних елементів і метаболітів у ґрунтові води та харчові продукти створює загрози для довкілля й здоров'я людини (лікарська токсичність, забруднення водних мас), висока вартість препаратів і залежність від зовнішніх ринків роблять систему нестійкою у довготривалій перспективі [18]. Тому, хімічні засоби захисту рослин здатні порушувати «disease-suppressive» властивості ґрунтів, надовго змінюючи гомеостаз між усіма складовими екосистеми. Відповідно, хімічні методи мають використовуватися селективно з урахуванням доз, часових вікон, чергування діючих речовин і моніторингу резистентності мікроорганізмів. Відновлення мікробіоценозу після застосування пестицидів та агрохімікатів можливе і залежить від початкової різноманітності, фізико-хімічних властивостей ґрунту, наявності джерел реінюляції (сусідні необроблені ділянки), а також — мікроорганізмів, здатних деградувати відповідні пестициди. Деякі таксони можуть швидко відновлюватися, тоді як інші — залишатися пригніченими довго.

Альтернативним, ефективним та еколого-безпечним доповненням хімічним препаратам є біологічний метод захисту агроценозів. З огляду на довгострокову сталість агроекосистем, біологічні методи мають великі перспективи як компонент стійкого управління [19]. Згідно із Законом України «Про державне регулювання сфери захисту рослин» (№ 4147-ІХ від 17.12.2024) «Біологічний метод захисту рослин» — метод захисту рослин від шкідливих організмів за допомогою агентів біологічного захисту рослин та/або продуктів їх життєдіяльності. Відповідно до того ж Закону, агентом біологічного захисту є природний ворог, антагоніст, конкурент чи інший організм, який застосо-

вують для боротьби із шкідливими організмами.

Відомо, що використання біологічного захисту допомагає не лише знизити ураження агроценозів фітопатогенними мікроорганізмами та фітофагами на 75–90%, а мінімізує контамінацію врожаю, знижує пестицидне навантаження. Зазвичай серед агентів біопрепаратів зустрічаються бактерії (*Pseudomonas*, *Bacillus*), мікроміцети (*Trichoderma*, *Beauveria*, *Metarhizium*), вірусні та бактеріальні фаги, які діють через конкурентну взаємодію за джерело живлення, виробництво антимікробних та антигрибних метаболітів, індукцію системної резистентності рослин тощо. У більшості випадків застосування біопрепаратів тимчасово змінює локальну таксономічну структуру (збільшення таксонів, пов'язаних із введеним агентом); індукуює корисні функціональні зміни шляхом підвищення ферментативної активності ґрунту чи самої рослини (наприклад нітрофікації, фосфатолітичної активності, пероксидазної активності); у деяких випадках – приводить до зниження локальної різноманітності за домінування внесеного штаму (залежно від норми використання і препаративної форми). Ефективність цих біопрепаратів залежить від типу препарату, мікроорганізму-агента, його селективності, препаративної форми, цільового об'єкта впливу.

Попри значні переваги, біологічні препарати на основі мікроорганізмів мають і певні обмеження. Саме серед обмежень доцільно наголосити на тому, що ефективність у полі може варіювати під впливом ґрунтових і кліматичних умов, існують проблеми зі стабільністю та формуляцією продуктів, масштабним виробництвом та стандартизацією штамів мікроорганізмів; у деяких випадках агенти біопрепаратів взаємодіють з місцевою мікробіотою не передбачувано, або їхня активність виявляється недостатньою за високого фону патогенів у агроценозі. Також є регуляторні й сертифікаційні бар'єри для ринку біологічних засобів.

Однак варто пам'ятати, що мікробіота ґрунту – це саморегульована система,

що формується на рівні ґрунтових агрегатів і мікрозон, які включають переважно рослинні рештки, гумусові комплекси й мінерали. Відповідно змінюється таксономічний склад і фізіологічна різноманітність ґрунтових мікроорганізмів. Мікробна біомаса – це важливий компонент органічної речовини ґрунту, кількісно і якісно варіює залежно від низки чинників, зокрема типу ґрунту, ступеня його окультурення, інтенсивності експлуатування, застосованих агротехнологій, пестицидів та агрохімікатів, кліматичних чинників. Тобто середовище існування мікроорганізмів за господарського використання ґрунтів набуває карбооліготрофних властивостей, які, обмежуючи утворення мікробної біомаси, знижують і продуктивність ґрунту.

Дослідники вважають, що здатність екосистеми підтримувати гомеостаз, визначається складністю поліфункціональних зв'язків та видовим різноманіттям ґрунтових мікроорганізмів, яку традиційно оцінюють із використанням екологічних індексів Шеннона і Сімпсона. Структура ґрунтового мікробного угруповання здатне змінюватися у відповідь на зміну параметрів навколишнього середовища, тому може слугувати діагностичним критерієм. Важливими показниками стану мікробіоценозу ґрунту є співвідношення чисельності мікроорганізмів певних еколого-трофічних груп, яке відображає спрямованість мікробіологічних процесів, що відбуваються в ґрунті, в напрямі деградації або відновлення його родючості [20]. Наприклад, посилення у структурі мікробіоценозу співвідношення мікроміцетів: бактерій у ґрунті використовуються як індикатори повернення екосистеми до природного стану. Також співвідношення бактерій і мікроміцетів у ґрунтовій мікробній біомасі дає уявлення про акумуляції або секвестрування карбону ґрунтами, а отже також може характеризувати їх газопродукційні властивості і бути чинником регулювання емісії CO₂ і N₂O. Крім того, в екологічних дослідженнях ґрунтів широко застосовують окремі групи мікроорганізмів як тест-об'єкти. У більшості робіт для ін-

дикації сприятливого екологічного стану ґрунтового середовища використовують бактерії роду *Azotobacter*. Особливо чутливим щодо негативної дії природних та антропогенних чинників є вид *Azotobacter chroococcum*.

До традиційних підходів для кількісної оцінки життєздатних мікроорганізмів ґрунту і рослинних тканин належать культуральні методи. А саме підрахунок колонієутворювальних одиниць (КУО = CFU) на селективних середовищах. Цей підхід є найдоступнішим та інформативним для оцінки чисельності основних еколого-трофічних і таксономічних груп мікроорганізмів, що дає можливість оцінити базовий та функціональний мікробіом досліджуваної ніші. До недоліків належать: погана гомогенізація досліджуваного зразка; помилка в приготуванні розведень; неправильно відібрані чашки для підрахунку колоній (для мінімізації цього недоліку обирають чашки, де виросло колоній від 30 до 300); не відображають частину мікробного угруповання (некультивовані форми, *viable but non-culturable* (VBNC), *unculturable pool*) зазвичай такі мікроорганізми становлять від 0,01% до 1% за кількістю, але за таксономією цей показник може бути вище [21].

Отже, культуральні методи це досить економічні методи порівняно з іншими, які допомагають швидко оцінити ризики, визначити зменшення еколого-трофічних груп, спостерігати і фіксувати зміну стратегії мікробіоценозу. Втім, коли постає питання безпосередньо оцінки таксономічного та видового різноманіття мікробіоценозу, доцільно спиратись на результати досліджень молекулярними методами qPCR, ddPCR.

Real-time PCR (qPCR) кількісна ПЛР у реальному часі, котра дає змогу отримати абсолютну або відносну кількість копій цільової послідовності (таксономічний маркер або функціональний ген). Застосовують для моніторингу внесених штамів мікроорганізмів; кількісної оцінки функціональних генів (*nifH* (фіксація азоту), *amoA* (нітрифікація), *bphA* (деструкція

ароматичних сполук, біоремедіація) тощо); виявлення патогенів у ґрунті [22]. Основною перевагою методу є швидкість, висока чутливість, оптимальний метод під час моніторингу конкретних генів інтродукованих штамів мікроорганізмів. До недоліків методу відносять високу чутливість до інгібіторів у ґрунті, є випадки, коли результати не надійні й потрібно корегувати методику, і найголовніше, що цей метод не дає прямої інформації про метаболічну активність мікробіому [23].

Droplet digital PCR (ddPCR) — цифрова крапельна ПЛР, яка допомагає абсолютно кількісно визначати число копій ДНК або генів без потреби в стандартних кривих, на відміну від qPCR. Перевагою методу є висока точність і чутливість визначення низьких концентрацій нуклеїнових кислот або рідкісних генів мікроорганізмів у ґрунтових мікробіомах; моніторинг функціональних генів мікробіоти (*nifH*, *amoA*, *rpoA*, *phoD*, *bphA* та ін.), кількісна оцінка генів резистентності до пестицидів та антибіотиків (ARGs); визначення частки живих/активних клітин. Недоліки — низька продуктивність порівняно з qPCR за великої кількості зразків; не замінює метагеноміку/ампліконне секвенування; вимагає чіткого розділення флуоресцентних кластерів та оптимізації порогу; висока вартість обладнання та реактивів (порівняно з qPCR у 3–5 разів дорожче).

D. Wang із колегами [24] проведено порівняльне дослідження ddPCR та qPCR. Показано, що метод ddPCR мав вищу точність, повторюваність, чутливість та стабільність у кількісному визначенні бактерій (16S rRNA) і грибів (ITS), ніж qPCR.

Ще одним різновидом методів є кількісна метагеноміка та *absolute quantification*. Кількісна метагеноміка (*quantitative metagenomics*, qMG/qmNGS) дає можливість оцінити абсолютну чисельність генів/таксонів у зразку за використання внутрішніх стандартів і нормалізації. Цей підхід має великий потенціал для агроекологічного моніторингу, хоч і вимагає кваліфікований персонал, ретельну, спеціальну підготовку зразків, вартісне обладнання та значні ви-

трати на проведення дослідження, секвенування та біоінформатичних конвеєрів [25].

Дослідження мікробіому ґрунту з точки зору його функціонування має особливу наукову та практичну значущість. Саме функціональна складова мікробіомів відображає перебіг біогеохімічних процесів, що визначає стійкість і продуктивність агроєкосистем, а не лише таксономічний склад мікробіому. Оцінку функціональної активності мікробіому агроценозів виявляють за мікробною біомасою (регидраційний метод, CFE, PLFA), інтенсивністю емісії діоксиду вуглецю, ферментативними активностями.

Оскільки мікробна біомаса є важливим, живим і лабільним компонентом органічної речовини ґрунту та його природним мікробним потенціалом. Відповідно цей показник широко використовували під час оцінювання як стану мікробіоценозу, так і ґрунту. Швидкість оборотності мікробної біомаси становить 0,5–2 роки, а органічної речовини ґрунту понад 20 років, тому це дає можливість застосувати значення змін, які відбуваються з мікробною біомасою, в оцінюванні стану органічної речовини ґрунту. Регидраційний метод визначення вмісту мікробної біомаси в ґрунті має відносно високу чутливість, економічно доступний порівняно з іншими, допомагає фіксувати саме ті клітини мікробіому, які метаболічно активні, а не загальний запас як мертвої, так і живої біомаси. Цей метод є індикатором істинної біологічної активності ґрунту без розподілу на таксономічні складові мікробіому [26].

Метод Chloroform fumigation extraction (CFE) дає змогу оцінити загальний запас живої мікробної біомаси у ґрунті, але не показує, які саме групи — бактерії, гриби, актиноміцети домінують. Метод застосовують для оцінки впливу нових агротехнологій та заходів (органічне землеробство, мінімальний обробіток, рекультивация) на живу біомасу ґрунту. Вважається, що цей метод оптимально використовувати в поєднанні з визначеннями ферментативних активностей [27].

Метод Phospholipid fatty acid analysis (PLFA) або визначення профілю фосфоліпідних жирних кислот мікроорганізмів — допомагає оцінити загальну біомасу та співвідношення груп мікроорганізмів у зразку. Метод базується на тому, що фосфоліпіди мембран мікроорганізмів швидко розкладаються після загибелі. Тому аналіз PLFA у свіжому зразку ґрунту відображає лише живу частину мікробної спільноти та дозволяє кількісно визначити групи у мікробному угрупованні (частка гриби/бактерії, частка грам-позитивні/грам-негативні бактерії, стрептоміцети). Варто зазначити, що даний аналіз не дає можливості визначити види мікроорганізмів [28]. Перевагами методу є кількісна, функціонально-орієнтована інформація про зміни у співвідношенні груп мікроорганізмів після запровадження агрозаходів чи застосування певних пестицидів чи агрохімікатів. Однак є і певні недоліки, а саме значна трудоемність дослідження 1 зразка, наявність хроматографічної лабораторії з дорогим обладнанням; реактивами; певний «фон» PLFA може походити від решток рослин чи мертвих клітин, що потребує вчасного аналізу зразка і кваліфікованого персоналу.

Програмою стандартного моніторингу ґрунтів України запропоновано такі біодіагностичні показники: активність процесу азотфіксування, нітрифікаційна, амоніфікаційна і денітрифікаційна здатність, активність ферментів пероксидази, поліфенолоксидази, дегідрогенази, інвертази, а також сумарна біологічна активність за показником емісії діоксиду карбону. Втім такі показники біологічної активності ґрунту носять лише рекомендаційний характер. Також рекомендовано низку інтегрованих індексів та показників, а саме мультикомпонентні індекси, що комбінують таксономічні (різноманіття), кількісні (абсолютні копії генів) і функціональні (дихання, ензимні активності) показники в єдиний «індекс здоров'я ґрунту». Такі індекси дають можливість краще відображати агроєкосистемні послідовності та прогнозувати довгострокові зміни. Запропоновано чима-

ло методичних підходів і схем розрахунку індексів стану ґрунту, значення яких зіставляються із рівнями техногенного навантаження і / або категоріями якості навколишнього природного середовища. Також широко застосовується математичне моделювання біологічних процесів у ґрунті.

Сучасні підходи до вивчення ґрунтової мікробіоти у системах інтенсивного землеробства показують, що будь-яке використання хімічних або біологічних засобів захисту рослин неминуче викликає структурні й функціональні зрушення у мікробних угрупованнях. Перед внесенням засобів захисту рослин рекомендованим є створення базової «карти мікробіоти» конкретного агроценозу: визначення домінуючих таксонів бактерій (*Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Firmicutes*) і грибів (*Ascomycota*, *Basidiomycota*), а також ключових функціональних груп — азотфіксаторів, целюлозоруйнівних та антагоністичних мікроорганізмів. Під час застосування важливо контролювати таргетні групи мікроорганізмів за допомогою qPCR та біоіндикаторних тестів (наприклад, інтенсивність ферментів β-глюкозидази й уреаз). Наприклад, дослідження в Китаї продемонстрували, що внесення азоксистробіну знижує активність уреаз на 25–30% у перші 10 днів після обробки, що свідчить про пригнічення амоніфікаторів. Після використання слід оцінювати швидкість відновлення мікробних угруповань. Згідно з даними довготривалих експериментів у Німеччині, повне повернення мікробіоти до вихідного стану може тривати 2–3 роки, особливо у ґрунтах із низькою органічною речовиною [29]. Водночас поєднання половинних доз фунгіциду тебуконазолу з біопрепаратом на основі *Trichoderma harzianum* в експериментах у Польщі сприяло ефективному контролю фузаріозів і водночас збереженню чисельності фосфатмобілізуючих бактерій [30]. До того ж доведено, що слід уникати одночасного застосування фунгіцидів із біопрепаратами, що містять гриби-антагоністи (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*), оскільки азоли та

стробілурини пригнічують їх ріст у ґрунті. Тому рекомендовано чергування: у фазі активного росту рослин — хімічний захист, а на етапі відновлення ґрунтової біоти — біологічні інокулянти. Через те дослідження мікробіому агроєкосистем мають системний і багаторічний характер з урахуванням як кліматичних показників, так і технологічних заходів.

ВИСНОВКИ

Агрофітоценози є складними екосистемами, стійкість яких значною мірою визначається складом і функціональною активністю ґрунтового мікробіому. Культуральні методи залишаються доцільними для базового моніторингу життєздатних еколого-трофічних груп і біоіндикації екологічного стану ґрунту, проте не відображають некультивовану частину мікробіоти. Молекулярні методи (qPCR, ddPCR) є пріоритетними для кількісного контролю цільових таксонів і функціональних генів, зокрема в умовах пестицидного навантаження та за моніторингу інтродукованих мікроорганізмів. Кількісна метагеноміка є найінформативнішою для комплексної оцінки структури й функціонального потенціалу мікробіомів, проте значні часові та фінансові витрати дають змогу застосовувати лише за проведення фундаментальних досліджень. Функціональні показники (мікробна біомаса, ферментативна активність, емісія CO₂) є чутливими індикаторами екологічних порушень і відновних процесів та мають ключове значення для оцінки стійкості агроєкосистем. Найперспективнішим напрямом є використання інтегрованих індексів «здоров'я ґрунту», що поєднують таксономічні, кількісні та функціональні параметри і допомагають прогнозувати довгострокові зміни мікробіоти за різних систем землеробства.

Отже, визначення структури та функціонального стану мікробіому в агроценозах — це складний процес, який вимагає поєднання кількісних, функціональних та таксономічних підходів. Відповідно, залежно від поставлених завдань та можливостей вчені мають обирати ті репрезента-

тивні методи, які дадуть можливість оцінити екологічні ризики та прогнозувати

розвиток досліджуваних процесів у агро-екосистемах.

ЛІТЕРАТУРА

- Nadeu, E., Dijk, R., & Hiller, N. (2023). The Soil Microbiome: its contribution to soil health and One Health. *Institute for European Environmental Policy, Brussels*, 33. URL: <https://ieep.eu/wp-content/uploads/2023/12/The-Soil-Microbiome-ESAD-IEEP-2023.pdf>.
- Tecon, R., & Or, D. (2017). Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. *FEMS Microbiology Reviews*, 41(5), 599–623. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsre/fux039>.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., ... Thukral, A. K. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, 1, 1446. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1>.
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nat. Rev. Microbiol.*, 18(1), 35–46. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>.
- Delgado-Baquerizo, M., Oliverio, A. M., Brewer, T. E., Benavent-Gonzalez, A., Eldridge, D. J., Bardgett, R. D., ... Fierer, N. (2018). A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 359(6373), 320–325. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.9516>.
- Skliar, V., Bortnik, A., Zubtsova, I., Klymenko, H., & Vakal, A. (2025). Soil microbiomes as component of pedosphere biodiversity and factor in formation of crop yields. *Scientific Horizons*, 28(1), 100–109. DOI: <https://doi.org/10.48077/scihor1.2025.100>.
- Nannipieri, P., Trasar-Cepeda, C., & Dick, R. P. (2018). Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. *Biol. Fertil. Soils*, 54, 11–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1245-6>.
- Wallenstein, M. D., & Hall, E. K. (2012). A trait-based framework for predicting when and where microbial adaptation to climate change will affect ecosystem functioning. *Biogeochemistry*, 109, 35–47. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9641-8>.
- Shayanthan, A., Ordonez, P. A. C., & Oresnik, I. J. (2022). The Role of Synthetic Microbial Communities (SynCom) in Sustainable Agriculture. *Front. Agron.*, 4, 89–307. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.896307>.
- Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2020). Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nat Rev Microbiol.*, 18(11), 607–621. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00490-8>.
- Волкогон, В. В. (2024). Роль мікроорганізмів у первинних процесах формування родючості ґрунтів. *Сільськогосподарська мікробіологія*, 39, 3–21. DOI: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.39.3-21>.
- Demyanyuk, O., Shatsman, D., & Symochko, L. (2020). Structure and Dynamics of Soil Microbial Communities of Natural and Transformed Ecosystems. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 76(4), 97–105. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.4.23508>.
- Pesticides use and trade. 1990-2023. (2025). (Україна). URL: <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/pesticides-use-and-trade-1990-2023>.
- Застосування пестицидів під урожай сільськогосподарських культур 2021 року. (2021). (Україна). URL: https://lg.ukrstat.gov.ua/sinf/shoz/shoz_zastos_pestyc_2021.
- Ni, B., Xiao, L., Lin, D., Zhang, T., Zhang, Q., Liu, Y., ... Zhu, Y. (2025). Increasing pesticide diversity impairs soil microbial functions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 122(2), e2419917122. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2419917122>.
- Wang, Z., Yun, S., An, Y., Shu, L., Li, Sh., Sun, K., & Zhang, W. (2025). Effect of fungicides on soil respiration, microbial community, and enzyme activity: A global meta-analysis (1975–2024). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117433>.
- Kepler, R. M., Epp Schmidt, D. J., Yarwood, S. A., Cavigelli, M. A., Reddy, K. N., Duke, S. O., ... Male, J. E. (2020). Soil Microbial Communities in Diverse Agroecosystems Exposed to the Herbicide Glyphosate. *Appl Environ Microbiol.*, 86, 17–44. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01744-19>.
- Thalassinou, G., Petropoulos, S. A., Grammenou, A., & Antoniadis, V. (2023). Potentially Toxic Elements: A Review on Their Soil Behavior and Plant Attenuation Mechanisms against Their Toxicity. *Agriculture*, 13(9), 1684. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13091684>.
- Rowinska, P., Gutarowska, B., Janas, R., & Szulc, J. (2024). Biopreparations for the decomposition of crop residues. *Microbial Biotechnology*, 17(8). DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14534>.
- Бунас, А. А., Шерстобоева, О. В., Ткач, Є. Д., Мовчан, І. П., & Дворецький, В. В. (2025). Роль штучно сформованого мікробіому ґрунту в циклі вуглецю. *Сільськогосподарська мікробіологія*, 41, 3–18. DOI: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.41.3-18>.
- Vuolo, F., Novello, G., Bona, E., Gorrasi, S., & Gamalero, E. (2022). Impact of Plant-Beneficial Bacterial Inocula on the Resident Bacteriome: Current Knowledge and Future Perspectives. *Microorganisms*, 10(12), 2462. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122462>.
- Duff, A. M., Giles, M., Ganasamurthy, S., Santos, A., Morales, S. E., & Brennan, F. (2025). Counting soil microbial communities: the impact of qPCR platform and mastermix on accuracy and precision. *FEMS Microbiology Ecology*, 101(8), 73. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaf073>.
- Xue, R., Stirling, E., Zhao, K., Wang, Y., Ye, Sh., Xu, J., & Ma, B. (2024). Putting cell size into per-

- spective: Soil bacterial diversity and predictive function. *Geoderma*, 443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116804>.
24. Wang, D., Wang, S., Du, X., He, Q., Liu, Y., Wang, Z., ... Deng, Y. (2022). ddPCR surpasses classical qPCR technology in quantitating bacteria and fungi in the environment. *Mol. Ecol. Resour.*, 22(7), 2587–2598. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13644>.
25. Wang, C., Yang, Y., Xu, X., Wang, D., Shi, X., Liu, L., ... Zhang, T. (2025). The quest for environmental analytical microbiology: absolute quantitative microbiome using cellular internal standards. *Microbiome*, 13, 26. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40168-024-02009-2>.
26. Bagheri-Novair, S., Mirseyed Hosseini, H., Etesami, H., Razavipour, T., Asgari Lajayer, B., & Astatkie, T. (2020). Short-term soil drying-rewetting effects on respiration rate and microbial biomass carbon and phosphorus in a 60-year paddy soil. *Biotech.*, 10(11), 492. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02486-w>.
27. Oren, A., Rotbart, N., Borisover, M., & Bar-Tal, A. (2018). Chloroform fumigation extraction for measuring soil microbial biomass: The validity of using samples approaching water saturation. *Geoderma*, 319, 204–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.007>.
28. Zhang, S., Jiao, X., Kang, H., & Yu, W. (2025). Efficiency evaluation of phospholipid fatty acid method based on lipid standards: methanol failed to recover a majority of phospholipids yet eluted unexpected glycolipid. *Front. Microbiol.*, 16, 1587425. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1587425>.
29. Swaine, M., Bergna, A., Oyserman, B., Vasileiadis, S., Karas, P. A., Screpanti, C., & Karpouzas, D. G. (2025). Impact of pesticides on soil health: identification of key soil microbial indicators for ecotoxicological assessment strategies through meta-analysis. *FEMS Microbiol Ecol.*, 101(6), fiaf052. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaf052>.
30. Streletskii, R., Astaykina, A., Krasnov, G., & Gorbato, V. (2022). Changes in Bacterial and Fungal Community of Soil under Treatment of Pesticides. *Agronomy*, 12(1), 124. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010124>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 15.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.01.2026
Дата публікації: 27.02.2026

SUCCESSIONAL DYNAMICS OF SOIL MICROBIAL COMMUNITIES UNDER ANTHROPOGENIC IMPACT: APPROACHES TO MATHEMATICAL MODELING

Y. Kravchenko, I. Beznosko

*Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: yuriykravchenko2017@gmail.com; ORCID: 0009-0002-0521-9768
e-mail: beznoskoirina@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2217-5165*

У статті узагальнено сучасні наукові підходи до вивчення та моделювання сукцесії ґрунтових мікроорганізмів в антропогенних екосистемах, зокрема в українських агроценозах в умовах зміни клімату та воєнного впливу. Показано, що ґрунтова мікробіота є ключовим регулятором циклів карбону, азоту та інших елементів живлення, а сукцесійні зміни мікроорганізмів визначають родючість ґрунту, його стабільність і здатність до самовідновлення. Проаналізовано внесок провідних іноземних і українських учених у розроблення концепцій мікробної сукцесії, зокрема trait-based моделей, мікробно-орієнтованих моделей типу MIMICS, підходів, що враховують мікробну біомасу у процесах ґумусоутворення, а також концепції функціональної сукцесії. Особливу увагу приділено впливу антропогенних чинників — інтенсивного землеробства, хімізації, змін землекористування, глобального потепління та воєнних дій — на траєкторію мікробної сукцесії. Показано, що забруднення ґрунтів важкими металами, вибуховими залишками, паливно-мастильними матеріалами спричиняє регресивну сукцесію, спрощення структури мікробіоценозу та порушення екосистемних функцій. Узагальнено результати досліджень українських учених щодо трансформації мікробних спільнот за різних систем землеробства, ролі мікроорганізмів у циклі азоту, фітопатогенних і антагоністичних грибів, а також можливостей керованої сукцесії через застосування біологічних препаратів. Розглянуто основні методи моделювання мікробної сукцесії: класичні математичні моделі (Моно, Лотки—Вольтерри, регресійні підходи), мережевий аналіз, стохастичні та нульові моделі асемблювання, а також сучасні методи машинного навчання (Random Forest, Gradient Boosting, нейронні мережі, MaxEnt). Обґрунтовано доцільність їх використання для прогнозування деградації та відновлення ґрунтів, оцінювання екологічного стану агроекосистем і розроблення практичних рекомендацій щодо рекультивувати земель, уражених антропогенним і воєнним впливом. Отримані результати та узагальнені підходи до моделювання сукцесії ґрунтових мікроорганізмів сприятимуть глибшому розумінню механізмів функціонування ґрунтових екосистем за умов інтенсивного антропогенного та воєнного навантаження. Використання сучасних математичних і комп'ютерних моделей дасть змогу підвищити точність прогнозування змін мікробіоценозів, своєчасно ідентифікувати ризики деградації ґрунтів і науково обґрунтувати заходи щодо їх відновлення. У практичному вимірі це сприятиме розробленню екологічно безпечних технологій землеробства, оптимізації застосування біологічних препаратів, збереженню родючості ґрунтів і продовольчої безпеки України, а також формуванню наукових основ відновлення агроекосистем у районах, постраждалих від воєнних дій.

Ключові слова: ґрунтова мікробіота, антропогенні екосистеми, агроценози, функціональні характеристики мікроорганізмів, біорізноманіття, зміна клімату, воєнне забруднення, відновлення ґрунтів, біоіндикація.

INTRODUCTION

In modern conditions, Ukraine faces large-scale problems of soil degradation and pollution caused by the accumulation of heavy metals, petroleum products, explosive residues, toxic compounds, and mechanical de-

struction of the soil cover as a result of military operations. Such impacts lead to changes in the structure of soil microorganisms, a decrease in biodiversity, and disruption of natural succession processes.

Modeling succession of soil microorganisms in anthropogenically polluted ecosys-

tems is an important scientific approach to understanding the patterns of micro-biocenosis restoration, predicting changes in their quantitative and qualitative composition under the influence of various factors, and assessing the stability of ecosystems. The results obtained can be used to develop effective strategies for the recultivation and restoration of agrocenoses, as well as to minimize environmental risks in regions contaminated as a result of military operations.

The purpose of this work is to conduct a literature review of modern approaches to modeling succession of soil microorganisms in anthropogenically polluted ecosystems in order to assess the impact of major anthropogenic factors on the functioning of soil microbial communities.

ANALYSIS OF RECENT RESEARCH AND PUBLICATIONS

A large number of foreign scientists [1–3] are engaged in the study of microbial succession in soils and the analysis of the biological, chemical, and physical characteristics of soil. International research often focuses on the development of complex microbially explicit models used to analyze the physiological properties of microorganisms to predict carbon and nutrient cycles.

William Withers [4] is one of the main developers of the MIMICS (MICrobial-MINeral Carbon Stabilization) model (Fig. 1).

This model uses functional groups of microorganisms (copiotrophs and oligotrophs) to model the dynamics of soil organic carbon and its stabilization. This, in turn, affects the succession of microorganisms under conditions of anthropogenic impact and climate change. Wieder also analyzed how microbial communities change each other over the years and proved that soil carbon dynamics depend not only on climate, but also on how efficiently microbial communities convert plant residues into their own biomass (Microbial Growth Efficiency) [5].

Stuart Grandy and Cynthia Kellenbach collaborated with W. Wieder [6; 7] in the development and application of the MIMICS model. Their work focused on the role of microbial biomass and necromass in the formation of soil organic matter. Prior to the research of Kellenbach and Grunzi, it was believed that humus was mainly undigested plant residues. In their work, they proved that stable organic matter (SOM) in soil consists mainly of the «bodies» of dead microorganisms. During the decomposition of plant residues, some groups of microbes (fast colonizers) are replaced by others (more efficient ones). Each generation leaves behind necromass, which «sticks» to soil minerals, creating carbon reserves.

Scientists who have made a significant contribution to the study of microorganisms and their succession are Peter Van Bodeen

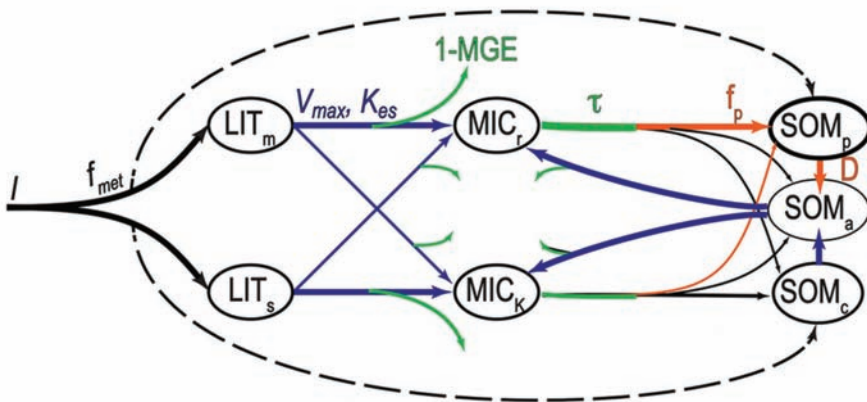


Fig. 1. MIMICS (MICrobial-MINeral Carbon Stabilization) model (William Withers, 2015) [26]

and Ivan Janssens [8–10], who in their works reveal the essence of the integration of microbial functional traits into large-scale ecosystem models, as well as the response of the soil microbiome to anthropogenic influences and various types of changes in the environment. Van Bodegem was one of the first to use a «trait-based approach» to microbial communities [11]. His works explain why traditional succession is less important for the climate than functional succession, i.e., what microorganisms that replace each other do. He argues that it is not necessary to know the names of all bacteria to predict ecosystem processes. The most important thing is to know their strategies: growth rate, stress resistance (drought, temperature), and resource consumption to maintain life. In these studies, succession is viewed as a continuous process of filtering traits by the environment. For example, when land use changes, there is a succession shift towards microorganisms with higher «survival» costs, which in turn reduces the rate of organic decomposition.

Ivan Janssens [11] is one of the most cited ecologists in the world. His contribution concerns how anthropogenic factors (warming, nitrogen pollution) affect natural microbial succession. Janssens has shown that excess nitrogen, which is produced by fertilizer application or emissions into the environment, changes the trajectory of microbial succession in forest soils. Instead of active decomposers, groups that slowly decompose resistant organic matter (lignin) begin to dominate, leading to an unexpected accumulation of carbon in the soil. He used natural soil warming in Iceland to study how long-term warming changes microbial communities. His work proves that succession under warming conditions leads to the depletion of available carbon, after which microbiological activity drops sharply (the community adaptation effect).

Carlos Guerra and Manuel Delgado-Baquero [12; 13] analyze and predict the impact of climate change and anthropogenic influences on soil microorganisms, which is an important tool for understanding microbial succession. One of their most famous joint

works is devoted to predicting how the soil microbiome will change by 2100. In this work, the process is viewed as a large-scale temporal succession caused by global changes.

They found that the succession path of many ecosystems leads to «uniformity.» Unique local communities are being replaced by a limited set of common microbial species. These scientists were able to prove that climate change is a more powerful driver of global «succession» than changes in land use (e.g., deforestation) [14].

Delgado-Bacuerizo [15] developed a concept highlighting that the composition of microbial communities (the result of succession) is more important for soil functions than simply the number of species. He showed that when external conditions change (e.g., increased aridity in deserts), microbial networks are restructured. This can be viewed as «regressive succession,» where complex networks of interactions break down, ultimately leading to a loss of the soil's ability to retain carbon and nitrogen.

Zhang Xia [16] is developing models of microbial decomposition of soil organic carbon that mimic the physiological transitions of microorganisms (active or dormant state) in response to changes in the environment that are characteristic of anthropogenic systems. One of Zhang Xia's most important recent works (co-authored with a group led by Zhang Kerong, published in *Global Change Biology*) is a large-scale meta-analysis of more than 5,000 soil samples from around the world. The researchers have shown [17; 18] that regardless of the type of ecosystem (forest, meadow, or primary succession after a glacier), microbial communities become more similar in composition over time (converge).

In the early stages, the dynamics are mainly determined by «species addition» (colonization). In later stages, «species replacement» (the displacement of some groups by others) dominates.

Zhang confirmed that during succession, the soil microbiome transitions from r-strategists (copiotrophs that grow rapidly on simple carbohydrates) to K-strategists (oligo-

trophs that slowly decompose stable organic matter).

In Ukraine, research in similar areas is traditionally conducted at the Institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine (especially in the fields of soil science, microbiology, and agroecology), as well as at agricultural universities.

Beznosko's research [19] (in particular, within the framework of her work at the Institute of Agroecology and Nature Management of the National Academy of Agrarian Sciences) focuses on how anthropogenic pressure and different farming systems change the «microbial agrocenosis» of the soil. According to the author's work, a change in cultivation technology (from intensive to organic) significantly transforms the structure of the soil microbiota. The key group that responds to mineral fertilizers is nitrogen cycle microorganisms, namely ammonifiers and amylolytic microorganisms. Ammonifiers are bacteria that break down organic nitrogen compounds into ammonia. With intensive technologies, their numbers can grow, but an imbalance is often observed. Amylolytic microorganisms use mineral forms of nitrogen. Studies show that adding straw together with a compensatory dose of nitrogen stimulates this group, which promotes faster mineralization of plant residues.

As for the impact on ecological-trophic groups, the number of organotrophs, i.e., microorganisms that feed on organic matter, in organic farming systems (using manure and green manure) is significantly higher in terms of quantity and biodiversity compared to areas of intensive crop cultivation. Beznosko's studies often record changes in the pedotrophic coefficient, which indicates whether humus is accumulating or being «burned» by microorganisms.

Intensive technologies (excessive use of pesticides, monoculture) also lead to the accumulation of phytopathogenic fungi (e.g., *Fusarium* spp., *Alternaria* spp.). With environmentally safe technologies, the proportion of antagonistic fungi (e.g., fungi of the genus *Trichoderma* spp.) increases, which suppress plant diseases naturally.

Patika [20] is a leading expert in the field of soil microbiology and biologization of agriculture. Her work is devoted to the study of the functional stability of soil microbial complexes, the dynamics of microbial processes in agrocenoses, and the influence of biological products on microbial succession. The author actively researches changes in microbial communities in the root zone of plants (rhizosphere). He studies how the continuous cultivation of a single crop disrupts natural succession. The cultivation of only one crop leads to the accumulation of phytotoxic forms of microorganisms (for example, some species of fungi of the genus *Fusarium* spp.). Beneficial groups (nitrogen fixers, phosphate mobilizers) are also suppressed, leading to soil degradation. His work analyzes how different farming systems change the vector of microbial community development. Organic farming promotes the formation of succession with a predominance of microfungi and humus stabilization. With intensive technologies, when high doses of mineral fertilizers and pesticides are used, a «simplification» of succession is observed, in which biodiversity is reduced, leading to system instability.

A significant part of the work is devoted to the restoration of soils contaminated with heavy metals or pesticides [20; 21]. Patika investigates how the introduction of specific destructive strains triggers the process of secondary succession, in which the normal structure of the microbiocenosis is gradually restored after technogenic shock.

The study of the dynamics of soil microbial communities, their role in the transformation of nitrogen and phosphorus, as well as their response to various types of anthropogenic stress is characteristic of Nagorna's research [21].

Kovalenko and Kozyrev [22] are actively researching microbiological processes in the soils of Eastern Ukraine, in particular, the reaction of the microbial complex to the re-cultivation of disturbed lands and the formation of microbial succession in technogenic territories. One of the main aspects of their work is the study of the decomposition processes of stubble of such crops as wheat, corn,

and sunflower. They are investigating how the introduction of biodestructors changes the sequence of microorganisms: from pioneer fungi to cellulolytic bacteria. The introduction of biodestructors accelerates mineralization and prevents the accumulation of pathogens. Optimizing this process allows nutrients to be returned to the soil more quickly, which is a form of controlled microbial succession.

These scientists also studied the effect of fertilizer irrigation on microbial communities. In the Southern Steppe region, irrigation radically changes environmental conditions. The works of Kovalenko and Kozryev show how moisture changes the dominant ecological and trophic groups of microorganisms, and how mineral fertilizers can simplify the structure of microbial communities by suppressing beneficial microbiota (e.g., nitrogen fixers) and triggering succession processes that lead to humus degradation.

Important research has been done by Volokhon [23]. He is primarily known as a practicing microbiologist, and under his leadership, conceptual models for managing microbial processes have been developed at the Institute of Agricultural Microbiology (Chernihiv). In his work «Microbial Preparations in Agriculture. Theory and Practice,» he substantiates models of the influence of biological preparations on the direction of microbiological processes. He uses coefficients (for example, the mineralization-immobilization coefficient) that allow us to assess how the state of the soil will change when microbial succession changes under the influence of fertilizers.

Iutynska [24] is engaged in the development of various parameters for modeling the functional structure of the microbiocenosis. She proposed using the Shannon index and other mathematical indicators of biodiversity to model the stability (resistance) of soil systems to anthropogenic stress. Her models allow predicting whether the microbial community will return to its original state after stress.

Polupan [25], although better known as a soil scientist, laid the foundation for modeling soil ecogenesis, where microbial succession

is the main driver. He developed models of humus formation in which microbiological activity acts as a key variable. Using this model allows us to predict the rate of carbon accumulation or loss in different climatic zones of Ukraine.

The study of soil microorganism succession is very relevant, given many aspects, especially the constant change in climate. Global warming and extreme droughts in recent years are significantly changing the trajectory of microbial succession. Rising temperatures accelerate the succession of r-strategists (bacteria that rapidly decompose organic matter). The acceleration of r-strategist succession leads to carbon that should have been stored in the soil for decades being rapidly released into the atmosphere in the form of carbon dioxide. Frequent fluctuations between drought and heavy rainfall deplete microbial communities. Succession simply does not have time to reach a stable stage (climax), leaving the soil biologically impoverished and vulnerable to erosion. Changes in climatic conditions have led to the appearance of microorganisms in Ukrainian agrocenoses that were previously characteristic of more southern latitudes. Thermophilic fungi and bacteria are beginning to dominate succession processes, causing new diseases in agricultural crops. New organisms can displace native species of nitrogen fixers or phosphate mobilizers. This destroys symbiotic relationships that have developed over centuries, causing cultivated plants to lose their natural immunity and require more chemical fertilizers and pesticides.

As for the impact of military operations, in Ukraine they have put unprecedented pressure on soil ecosystems. Contamination with heavy metals (lead, cadmium, mercury), explosive residues, and fuels and lubricants creates conditions for «regressive succession.» Explosives are toxic to most soil microbes. Succession stops or shifts toward the dominance of only those few species that can survive in conditions of chemical pollution. Shell craters mix the genetic horizons of the soil. Deep layers with dead microbiota end up on the surface, completely destroying the vertical succession structure of the microbiome.

If destructive bacteria disappear in succession, toxic compounds do not decompose. As a result, they enter plants and, subsequently, the human body along with food. Research on this topic is important now because without understanding how succession occurs in contaminated soil, it is impossible to calculate how many years it will take for black soil to recover on its own (it could be decades or even centuries). Knowledge of succession mechanisms allows scientists to transfer to contaminated soil precisely those microorganisms that will be the first to restore it and prepare the soil for the return of vegetation. Atypical species of microorganisms in agroecosystems are a direct threat to crop yields. Monitoring succession helps to identify the threat of new disease outbreaks in a timely manner. Microbial succession is the foundation of ecosystem restoration. The study of microbial succession is also important because of:

Ecosystem functionality – soil microorganisms (bacteria, fungi, archaea, algae) play a central role in the cycle of nutrients (nitrogen, phosphorus, sulfur), decomposition of organic matter, soil formation, and detoxification. Any change in the species composition and activity of microorganisms (i.e., in succession) directly affects soil fertility and plant nutrition.

Resilience (resistance) – succession changes show how well an ecosystem can withstand stressors (resistance) and recover from them (resilience). Anthropogenic ecosystems, such as agricultural fields, are less stable than natural ones, and studying succession helps to understand their adaptive capabilities.

The use of microorganisms as bioindicators is one of the most promising areas of agroecology. Since microbiota has high metabolic activity and rapid generational turnover, it responds to pollution or changes in agricultural technologies much faster than chemical indicators of soil or plant condition. The use of microorganisms as bioindicators is one of the most accurate ways to assess the state of an agroecosystem. Since microorganisms have a tremendous reproduction rate and direct contact with the environment, they

respond to pollution much faster than plants or animals.

Soil microbiota acts as the «immune system» of the agroecosystem. Their response to stress (pesticides, heavy metals, salinization) manifests itself on three levels:

- *sensitivity* – even low concentrations of toxins alter the growth rate of bacteria;
- *functionality* – the intensity of soil respiration and enzymatic activity changes;
- *structure* – some species (sensitive) disappear and others (resistant) dominate.

Analysis of microbial composition allows you to:

- diagnose «soil fatigue» before crop yields begin to decline;
- assess the effectiveness of recultivation (whether life in the soil is restored after cleaning);
- adjust fertilizer application based on the actual state of the biota, not just chemical tests.

The work of contemporary Ukrainian scientist Simochko [26] is a significant contribution to understanding how fertilizers and anthropogenic pressure transform the microbial landscape. Microbial soil indication is based on the analysis of succession structure: the redistribution of populations indicates the extent to which the ecosystem is capable of self-recovery or the stage of degradation it is at. In his research, Simochko emphasizes that the application of different types of fertilizers (mineral versus organic) creates a specific «microbial response.» Intensive use of mineral fertilizers leads to an outbreak of bacteria that rapidly mineralize organic matter (copiotrophs), but at the same time inhibits the development of nitrogen-fixing bacteria and beneficial fungi. The change in the ratio between bacteria, actinomycetes, and fungi serves as a marker of soil «health.» For example, a sharp increase in the proportion of phytotoxic fungi of the genus *Fusarium* spp. or *Penicillium* spp. signals the degradation of the agroecosystem. Microbiologists use the following indicators to assess contaminated agroecosystems:

- *microbial biomass* – a sharp decrease in the total mass of microbes indicates toxic effects (heavy metals, pesticides);

- *microbial metabolic rate* – if microorganisms expend too much energy on respiration compared to biomass accumulation, this is a sign of ecosystem stress.
- *enzyme activity* – catalase and dehydrogenase are markers of metabolic intensity.

Successional changes as a marker of anthropogenic load are highlighted in the works of Simochko and other microbiologists [26], which reveal the concept of «adaptive restructuring» of the microbiocenosis. When a pollutant enters the agroecosystem, succession changes its natural course. At the elimination stage, sensitive species (symbiotes, specialized destructors) die out. At the stage of dominance of resistant forms, microorganisms

that are able to use the pollutant as a food source or are resistant to it multiply. At the simplification stage, a «poor» community with low biodiversity is formed, which is unable to perform all ecosystem functions (for example, the nitrogen cycle is interrupted).

A large number of methods and models can be used to study and model microbial succession, depending on the research task, available data, and desired results. Trait-based models are the most relevant approach for anthropogenic systems (Fig. 2) because they model not specific species but their survival strategies (e.g., the MIMICS model).

This model is based on the division of microorganisms into groups: copiotrophs

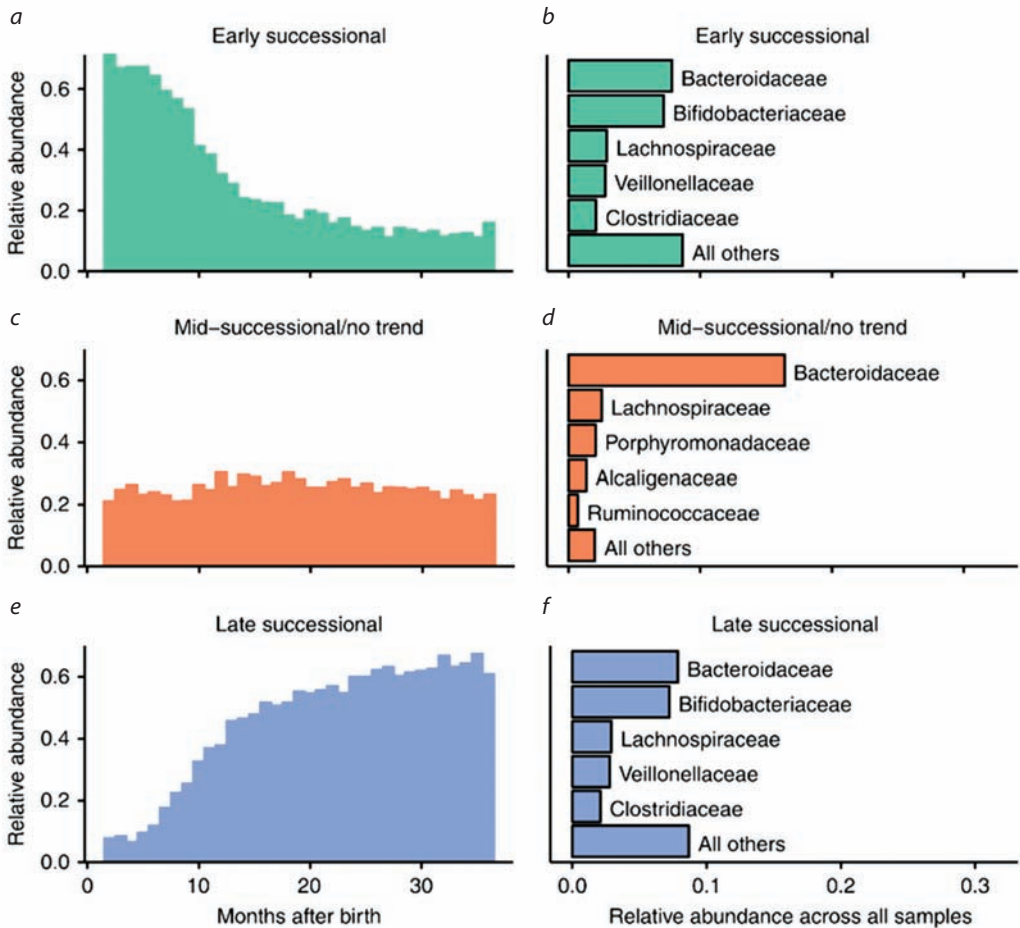


Fig. 2. Trait-based models [27]

(r-strategists that grow rapidly on fertilizers) and oligotrophs (K-strategists that survive in poor soils). These models allow us to predict how the application of high doses of nitrogen fertilizers will shift succession towards humus mineralization.

Mathematical modeling of population dynamics (Lotka-Volterra & Monod) is also common. These are classic methods used to describe interactions between groups of microorganisms in a contaminated environment. The Monod equation describes the growth rate of microbes depending on the concentration of the substrate (e.g., oil pollution or pesticides). Lotka-Volterra models are used to model competition between «native» species and invasive (atypical) species that have appeared due to climate change. The main application of these methods is to calculate the time it takes for beneficial microbiota to displace pathogenic microbiota after the introduction of biological products.

Network analysis is also widely used to model the succession of microorganisms. This

method allows us to model not only the number of microorganisms, but also the strength of the connections between them. Interaction networks are constructed based on DNA sequencing data. In anthropogenic systems, these networks often become «fragile.» This method can be used to model the impact of military pollution. If the network breaks down into separate modules, this predicts complete degradation of the ecosystem.

Stochastic and deterministic assembly models help to understand whether the change in the microbiome is random or regular. One example of these models is zero models (Fig. 3), which allow us to assess the extent to which succession after military shock is determined by the random introduction of new species (dispersal) and the extent to which it is determined by environmental selection.

These models can be used to assess the self-recovery potential of soil. If «randomness» dominates succession, the soil needs artificial introduction of microorganisms (inoculation).

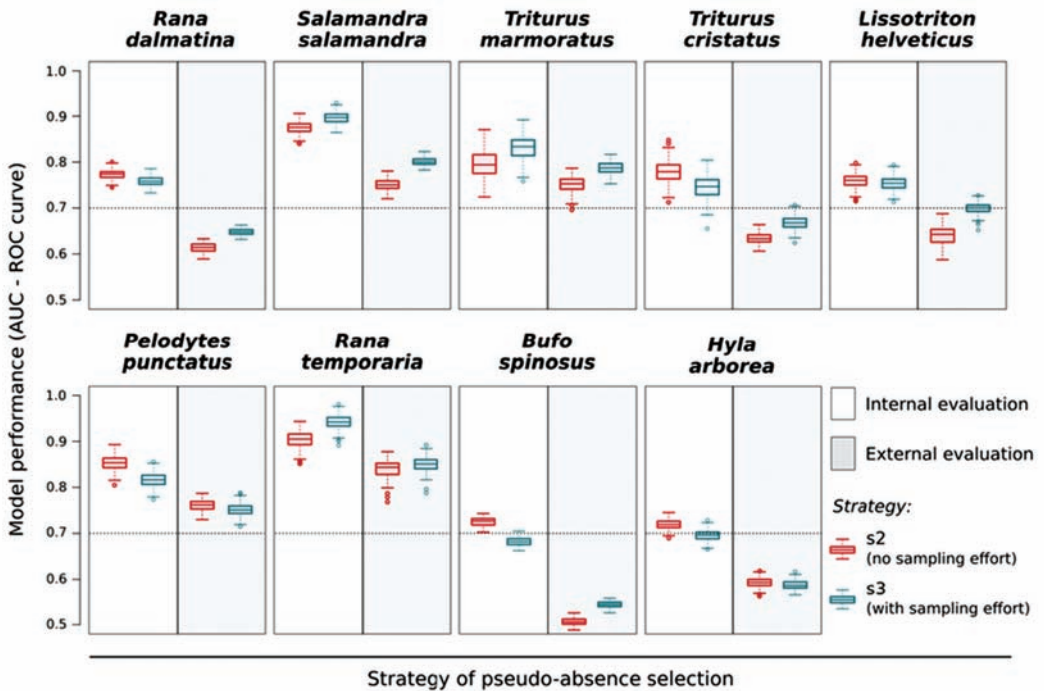


Fig. 3. Null models for assessing new species [28]

A modern method for modeling is machine learning models. Machine learning methods (Fig. 4) allow determining the stage of restoration or degradation of the soil by analyzing its «microbial fingerprint.»

The most popular model in soil biology is Random Forest (Fig. 4, a). It allows determining «indicator taxa» – microorganisms that most strongly indicate the age of succession or the level of pollution. Gradient Boosting

models (XGBoost, CatBoost) (Fig. 4, b) are used to predict how quickly a community will change under the influence of climate. These models are very accurate in conditions where the data has complex nonlinear relationships.

In the context of climate change, it is important to know which new species (including pathogens) will appear in agroecosystems. Max-Ent (Maximum Entropy Modeling) – this

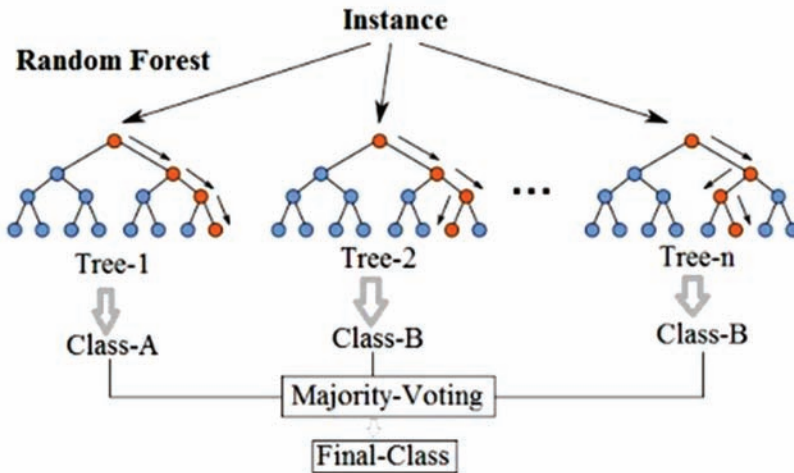


Fig. 4, a. Random Forest model [29]



Fig. 4, b. XGBoost model [30]

model has traditionally been used for macroecology, but has now been adapted for microorganisms. The model predicts the probability of a species appearing at a specific geographical point based on climate data.

Artificial neural networks (ANN) can model complex ecological niches, predicting how a 1.5°C warming will change the ratio of bacteria and fungi in succession.

The classic method for modeling microbial succession is multiple linear regression (MLR). It can be used to establish a relationship between time (succession stage) and physicochemical soil parameters (acidity level, nitrogen content, temperature). Using a linear multiple regression model, it is possible to predict the total microbial biomass depending on the content of heavy metals and organic carbon. The research data are presented in the works of scientists such as Iutyńska and Simochko for toxicity assessment.

Nonlinear and polynomial regression are also actively used. Succession is not always linear. In the early stages after contamination (e.g., military), there is a sharp decline in biodiversity, followed by a slow recovery. Therefore, in such cases, it is advisable to use these models to simulate succession.

Thus, in connection with the war, which causes constant chemical and physical contamination of soils, destruction of its layers, deterioration of the physiological properties of the soil, as well as due to the negative impact of economic activity, there is an acute issue of restoring and preserving the physiological properties of soils and their fertility. It is important to predict stable and safe conditions for growing crops. Mathematical models make it possible to develop a set of methods for assessing the ecological state of agroecosystems affected by economic activity,

especially military action. They also make it possible to predict the future state of ecosystems, identify factors that influence their restoration, and develop recommendations for restoring soil ecosystems. The ecological and economic effect of implementing these models includes restoring agroecosystems with the help of microorganisms, reducing the harmful impact of various types of pollution on the environment, and restoring the physiological properties and fertility of soils.

CONCLUSION

The analysis of the literature shows that the succession of soil microorganisms is a fundamental mechanism for the functioning and restoration of anthropogenic ecosystems, since it is the microbiota that determines the intensity of nutrient cycling, the stabilization of organic carbon, the resistance of soils to stress, and their fertility. Under conditions of increased anthropogenic pressure, climate change, and military action, microbial succession often becomes regressive, leading to a simplification of the structure of microbiocenoses, disruption of ecosystem functions, and soil degradation. That is why the study and modeling of these processes are extremely important, as they allow not only to objectively assess the ecological state of soils and predict their future changes, but also to scientifically substantiate effective measures for recultivation, biologization of agriculture, and controlled restoration of agroecosystems. The use of modern mathematical, network, and machine models allows us to move from describing the consequences of degradation to actively managing microbial processes, which is critically important for preserving soil fertility, the ecological stability of agricultural landscapes, and food security in Ukraine, especially in areas affected by war.

REFERENCES

1. Fan, K., Delgado-Baquerizo, M., Guo, X., Wang, D., Zhu, Y.-G., & Chu, H. (2021). Biodiversity loss reduces the orderliness of microbial networks under anthropogenic stress. *mSystems*, 6(2), e00045-21. DOI: <https://doi.org/10.1128/mSystems.00045-21>.
2. Li, J., & Zhang, Y. (2022). Polynomial regression models for predicting microbial community succession in response to complex organic pollutants. *Water Research*, 215, 118245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118245>.
3. Delgado-Baquerizo, M., Guerra, C. A., Cano-Díaz, C., Egidi, E., Wang, J. T., Eisenhauer, N., & Maestre, F. T. (2020). The proportion of soil-borne pathogens increases with warming at the global scale. *Nature Cli-*

- mate Change*, 10(6), 550–554. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0759-3>.
4. Wieder, W. R. (2024). Representing soil carbon dynamics with microbial and mineral controls in the Community Land Model (CLM5). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16, e2024MS004874. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024MS004874>.
 5. Wieder, W. R., Kyker-Snowman, E., & Bonan, G. B. (2022). Predicting soil carbon responses to global change: Challenges and opportunities for microbial models. *Global Change Biology*, 28(11), 3460–3472. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16189>.
 6. Kallenbach, C. M., Wallenstein, M. D., Schipka, M., & Grandy, A. S. (2022). Microbial physiology and necromass formation: Rethinking soil organic matter stability. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108643>.
 7. King, A. E., Grandy, A. S., Augustine, D. J., & Derner, J. D. (2020). Grazing intensity and climate history coexist to dictate soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 142, 107693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107693>.
 8. Van Bodegom, P. M., & Janssens, I. A. (2024). Scaling microbial physiological traits from cells to ecosystems in Earth system models. *Biogeosciences*, 21(4), 1045–1062. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-1045-2024>.
 9. Van Bodegom, P. M. (2021). Integrating microbial functional traits into Earth system models: *Challenges and opportunities*. *Global Change Biology*, 27(9), 1812–1825.
 10. Verbruggen, E., Janssens, I. A., & Vicca, S. (2021). Soil microbial responses to drought: A trait-based perspective. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(10), 912–923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.006>.
 11. Walker, T. W., & Janssens, I. A. (2022). Microbial temperature sensitivity and biomass turnover in a warming world. *Nature Climate Change*, 12, 934–941. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01464-3>.
 12. Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D. J., Liu, Y. R., Sokoya, B., Cano-Díaz, C., Abades, S., & Maestre, F. T. (2020). Global footprints of succession and climate change on edge effects of soil microbial communities. *Communications Biology*, 3, 712. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01387-3>.
 13. Guerra, C. A., Bardgett, R. D., Caon, L., Crowther, T. W., Delgado-Baquerizo, M., Montanarella, L., & Eisenhauer, N. (2021). Tracking, targeting, and conserving soil biodiversity. *Science*, 371(6526), 239–241. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abd7926>.
 14. Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D. J., Maestre, F. T., Karunarathne, S. B., Trivedi, P., Reich, P. B., & Singh, B. K. (2020). Microbiome restoration strategies could ameliorate the effects of global change on soil functions. *Science Translational Medicine*, 12(559), eaaz1435. DOI: <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aaz1435>.
 15. Delgado-Baquerizo, M., Reich, P. B., Trivedi, P., Eldridge, D. J., Abades, S., Alfaro, F. D., & Singh, B. K. (2020). Multiple ecosystem functions are positively associated with soil microbial diversity. *Nature Ecology & Evolution*, 4(2), 210–220. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1084-4>.
 16. Zhang, X. (2024). Functional gene succession in soil microbiomes during long-term ecosystem development. *ISME Communications*, 4(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s43705-024-00343-9>.
 17. Zhang, X., Ji, X., & Liu, W. (2021). Successional dynamics of soil microbial communities and their network complexity in response to environmental changes. *Microbiology Spectrum*, 9(2), e00321-21. DOI: <https://doi.org/10.1128/Spectrum.00321-21>.
 18. Zhang, X., Wang, W., Xu, Z., Zhang, S., Yao, P., Zhang, J., & Zhang, K. (2022). Global soil microbial communities converge during ecosystem development. *Global Change Biology*, 28(21), 6436–6449. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16366>.
 19. Beznosko, I., Havryliuk, L., Mazur, S., Gorgan, T., Mosiychuk, I., Bashta, O., ... Turovnik, J. (2023). Formation of the population of micromycetes in the leaf microbiome of cereal crops using different cultivation technologies. *Journal of Ecological Engineering*, 24(11), 236–248. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/171648>.
 20. Патика, М. В., Тонха, О. Л., Сінченко, В. М., Гончар, А. М., & Патика, Т. І. (2019). Особливості формування структурово-функціонального складу мікробіому чорнозему щільного в Степу України. *Мікробіологічний журнал*, 81(4), 90–106. DOI: <https://doi.org/10.15407/microbiolj81.04.090>.
 21. Левішко, А. С., & Маменко, П. М. (2025). Мікробні добрива та шляхи оптимізації ефективності їх застосування у рослинництві. *Агроєкологічний журнал*, 2, 109–122. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2025.333832>.
 22. Гадзало, Я. М., Вожегова, Р. А., & Лікар, Я. О. (2023). Ефективність застосування мікробних препаратів деструкторів на рослинних рештках у процесі їх мінералізації після збирання. *Аграрні інновації*, 19, 24–33. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.4>.
 23. Волкогон, В., Дімова, С., Волкогон, К., & Сидоренко В. (2020). Ефективність мікробних препаратів за різних систем удобрення сільськогосподарських культур. *Вісник аграрної науки*, 98(6), 5–13. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovissnyk.202006>.
 24. Iutynska, G. O., Yamborko, N. M., & Valerko, R. A. (2022). Information-entropic indicators of the state of soil microbial communities under various agrotechnological loads. *Microbiology & Biotechnology*, 3, 35–46.
 25. Polupan, V., & Sidletskyi, V. (2018). Genetic algorithm usage for optimization of saturator operation. *Ukrainian food journal*, 7(4), 754–762.
 26. Demyanyuk, O. S., Symochko, L. Y., & Mostoviak, I. I. (2020). Soil microbial diversity and activity in different climatic zones of Ukraine. *Regul. Mech. Biosyst.*, 11(2), 338–343. DOI: <https://doi.org/10.15421/022051>.
 27. Ning, D., Yuan, M., Wu, L., Zhang, Y., Lin, Q., Tu, Q., & Zhou, J. (2020). A quantitative framework for revealing relative abundances of ecological processes

- shaping microbial communities. *The ISME Journal*, 14(2), 491–506. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0539-3>.
28. Parviainen, M., Marmion, M., Luoto, M., Thuiller, W., & Heikkinen, R. K. (2009). Using summed individual species models and state-of-the-art modeling techniques to identify threatened plant species hotspots. *Biological Conservation*, 142(11), 2501–2509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.05.030>.
29. Medium. URL: <https://williamkoehrsen.medium.com/random-forest-simple-explanation-377895-a60d2d>.
30. Sokol, N. W., Whalen, E. D., Jilling, A., Kallenbach, C. M., & Grandy, A. S. (2023). Global review of agricultural practices and soil microbial biomass dynamics. *Global Change Biology*, 29(4), 1120–1135. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16533>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 11.11.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.01.2026
 Дата публікації: 27.02.2026

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ЗА ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ

В.А. Болоховська¹, О.В. Нагорна¹, Л.А. Янсе^{2,3},
В.В. Бородай^{2,4}, Д.О. Яковенко^{1,2}

¹Біотехнологічна компанія BTU (м. Київ, Україна)
e-mail: valent2006@ukr.net; ORCID: 0009-0005-2728-4589
e-mail: olganova2008@ukr.net; ORCID: 0009-0001-6628-9383

²Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: d.yakovenko@btu-center.com; ORCID: 0000-0008-8239-7684

³Національна академія аграрних наук України (м. Київ, Україна)
e-mail: liliya.janse@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2567-5907

⁴Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)
e-mail: veraboro@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8787-8646

У статті висвітлено ефективність внесення Азотохелпу і Граундфіксу щодо формування продуктивності пшениці озимої в умовах Правобережного Лісостепу України. Встановлено, що застосування біопрепаратів істотно підвищує адаптивний потенціал пшениці озимої та покращує ростові процеси. Висота рослин, біомаса та площа листової поверхні зросли на 8,3–51,5% порівняно з контролем на етапі осіннього кушення (ВВСН 22–25). Це забезпечило оптимальний стан посівів перед перезимівлею, що підтверджується високою кореляцією між біометричними параметрами осіннього розвитку рослин та подальшою врожайністю ($r=0,75-0,90$). Максимальна ефективність формування зернової продуктивності відзначена за передпосівного внесення суміші препаратів Азотохелпу і Граундфіксу, а також за поєднання обробки насіння Азотохелпом (1,5 л/т) + позакореневе підживлення (0,5 л/га) у фазі весняного кушення, що забезпечило збільшення кількості зерен у колосі до 28,0–28,9 шт. та зростання маси 1000 насінин на 6,0% (до 49,2–49,4 г). Доведено синергійний ефект сумісного застосування Азотохелпу та Граундфіксу, що зумовило найвищий приріст урожайності — 16,06% відносно контролю. Біологічна дія препаратів спрямована на збалансований перерозподіл асимілянтів, що підтверджується зниженням коефіцієнта співвідношення побічної продукції до основної до рівня 0,84–0,87 (проти 0,96 на контролі). Кореляційний аналіз показав визначальну роль довжини колоса ($r=0,90$), кількості зерен ($r=0,85$) та маси 1000 насінин ($r=0,89$) у формуванні виходу зерна. Застосування комбінованої обробки препаратами Граундфікс та Азотохелп насіння та посівів позитивно вплинуло на якісні характеристики зерна. Натурна маса зросла в середньому на 9,6 г/л, склоподібність — до 58,7%. Вміст сирової клейковини підвищився на 10,4–11,8%. Формування продуктивності рослин пшениці озимої за внесення під передпосівну культивування Азотохелп (3 л/га), Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га), обробка насіння Азотохелпом (1,5 л/т) та у нормі (0,5 л/га) у фазі весняного кушення в середньому за роки досліджень виявились найбільш ефективними. Отримані результати доводять доцільність використання Азотохелпу та Граундфіксу у технології вирощування пшениці озимої.

Ключові слова: біопрепарати, *Triticum aestivum* L., урожайність, біометричні показники, якість зерна.

ВСТУП

Оптимізація мінерального живлення відіграє значну роль у формуванні продуктивності пшениці озимої (*Triticum aesti-*

um L.). Надмірне внесення мінеральних добрив призводить до значного екологічного навантаження та зниження рентабельності виробництва [1; 2]. Значна частка доданого мінерального азоту втрачається внаслідок процесів вилугування та де-

нітрифікації, а 70–90% мінерального фосфору трансформується у зв'язані форми, недоступні для рослин [3].

Численні дослідження використання біопрепаратів на основі поліфункціональних рідстимулювальних бактерій (PGPB) підтверджують можливість скорочення норм мінеральних азотних добрив без втрат урожайності та якості зерна, що відповідає принципам сталого землеробства [4–8]. Водночас ефективність застосування біостимуляторів істотно визначається умовами вирощування, що зумовлює необхідність їх дослідження з урахуванням специфіки окремих ґрунтово-кліматичних зон.

Мега досліджень — оцінка впливу поліфункціональних біопрепаратів Граундфікс та Азотохелп на формування продуктивності та якості зерна пшениці озимої в умовах Правобережного Лісостепу України.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Застосування біопрепаратів сприяє повнішій реалізації біологічного потенціалу врожайності та підвищує адаптивні властивості пшениці озимої в різних природно-кліматичних зонах України, що проявляється зростанням довжини колоса, маси зерен у колосі та маси 1000 зерен і відображається на врожайності [9; 10]. Так, обробка насіння пшениці озимої біопрепаратом Органік-Баланс монофосфор у нормі 1,0 л/т сприяла підвищенню приросту у середньому до 0,56 т/га (10,4%) [10].

Встановлено, що застосування комплексного препарату, який об'єднує азотфіксувальні та фосфатмобілізувальні бактерії, забезпечує приріст урожайності пшениці озимої до 9,44% (0,5–0,7 т/га) [8]. Передпосівна інокуляція комплексом мікроорганізмів *Azotobacter vinelandii* 7 АІ, *A. chroococcum* 8 АІ та *Bacillus megaterium* 39 АІ продемонструвала позитивний вплив на врожайність пшениці [11].

Т.О. Грабовська та Г.Г. Мельник [12] дослідили, що обробка насіння та посівів біопрепаратами ФітоХелп, МікоХелп, Біокомплекс-БТУ в агроценозі пшениці озимої забезпечила підвищення маси 1000 зе-

рен на 10,2–16,7%, маси зерна з колоса на 9,3–14,5%, урожайності зерна на 17,1–26,1% порівняно з контролем, покращила якісні показники насіння, що зумовлює використання біопрепаратів в органічному землеробстві. В іншому дослідженні показано, що середня маса зерна впродовж чотирьох років була вищою (+17,07%) за інокуляції *A. chroococcum*, ніж на контрольному варіанті [13].

За комплексного використання багатофункціональних мікробних біопрепаратів (Мікофренд, Граундфікс та Екостерн) спостерігається прискорення фізіологічного розвитку рослин пшениці озимої та поліпшення морфогенетичних параметрів, значне зростання вмісту рухомого фосфору, біологічної активності ґрунту, зниження ураження жовтою іржею, піренофорозом [14].

В.Я. Хоміна, Д.В. Шейко [15] довели, що внесення Триходерміну, Агату 25 К та ПМК-ЗР за різних способів їх застосування, сприяло підвищенню якості насіння, а також встановили сортову реакцію пшениці озимої на масу 1000 насінин, уміст білка, уміст сирі клейковини.

Доведено позитивний вплив допосівного оброблення насіння пшениці озимої біопрепаратами Фітоцид, р. та БіоМаг, р. на польову схожість рослин, їх пролонгований ефект на формування елементів структури врожаю (в середньому продуктивна куцистість зросла на 10,3%, озерненість колоса — на 12,2%, маса зерна з колоса — на 8,3%). Виявлено фунгістатичний ефект біопрепаратів відносно збудників кореневих гнилей, а найвищу антифунгальну дію спостерігали за композитного використання біопрепаратів, технічна ефективність щодо корневих гнилей становила 51,8%. Спільне застосування високих доз мінеральних добрив та бактеріальних інокулянтів призвело до значного збільшення вмісту N, P, K та білка в насінні пшениці, вплинуло на її врожайність [16; 17].

Поєднання PGPM із різними механізмами дії у консорціуми посилює їх ефективність та адаптивність у польових умовах порівняно з одноштамовими інокулян-

тами, покращує ріст, довжину та біомасу коренів/пагонів, підвищує вміст хлорофілу, каротиноїдів, фенолів, флавоноїдів та розчинного цукру у посівах зернових культур [18].

Проведений аналіз наукових джерел свідчить, що дослідження строків внесення та норм вітчизняних біопрепаратів на основі РГРВ, їхніх мікробних консорціумів, як елементів у технології вирощування пшениці озимої, є актуальним питанням.

МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження здійснювалися в умовах дослідного поля Хмельницької ДСГДС ІКСГП НААН (с. Самчики, Старокостянтинівський р-н, Хмельницька обл., північно-західна частина Правобережного Лісо-степу України) протягом 2020–2022 рр.

Ґрунт дослідної ділянки — чорнозем слабоопідзолений середньосуглинковий, середньопотужний, малогумусний на лісовому суглинку бурувато-пального забарвлення. Облікова площа ділянки — 40 м², повторність — чотириразова, розміщення ділянок — систематичне. Вміст гумусу (за Тюриним) — 2,8–2,9%, рН — 5,8–6,2, гідролітична кислотність — 0,019–0,023 г/кг, валові запаси нітрогену — 0,153–0,163%, фосфору — 0,136–0,149%, лужногідролізованого нітрогену — 0,17–0,193 г/кг, рухомі форми фосфору та калію (за Чириковим) — відповідно 0,208–0,226 та 0,08–0,12 г/кг.

У досліді вивчалися елементи технології вирощування пшениці озимої сорту Богдана: застосування біодобрив Граундфікс та Азотохелп (Азотофіт) (біотехнологічна компанія ВТУ, Україна). Дослідження проводили за такою схемою: 1 — контроль; 2 — Граундфікс (3 л/га), під передпосівну культивуацію; 3 — Азотохелп (3 л/га), під передпосівну культивуацію; 4 — Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га), під передпосівну культивуацію; 5 — Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння; 6 — Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння + Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кушення; 7 — Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного ку-

шення на мінеральному фоні N₉₀P₆₀K₆₀. Попередником була соя. Норма висіву насіння — 5 млн шт./га.

До складу біопрепарату Граундфікс входять мікроорганізми: *Bacillus velezensis* (*B. subtilis*), *B. subtilis*, *Priestia megaterium* (*B. megaterium* var. *phosphaticum*), *Agrobacterium pusense* (*Azotobacter chroococcum*), *Agr. salinitolerans* (*Enterobacter*), *Paenibacillus polymyxa* (титр 0,5–1,5·10⁹ КУО/см³). Основою біопрепарату Азотохелп (Азотофіт) є азотфіксувальні бактерії *Agrobacterium pusense* (*Azotobacter chroococcum*) та біологічно активні продукти їхньої життєдіяльності (титр 1,0·10⁹ КУО/см³).

Досліди з біопрепаратами було закладено в останній декаді вересня — першій половині жовтня, фоліарне внесення Азотохелпу (0,5 л/га) проводили у фазі ВВСН 21–29, збирання та облік урожаю пшениці озимої — в останній декаді липня. Дослідження виконували згідно зі загальноприйнятими методиками проведення досліджень у землеробстві [19–21].

Статистичну обробку даних здійснювали, використовуючи програму Microsoft Office Excel® 2010 для Microsoft Windows®. Середні значення порівнювали за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA) з $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Застосування біопрепаратів стимулювало ріст та розвиток рослин на ранніх етапах органогенезу. Загалом, висота, маса рослин, довжина коренів, кількість листків на рослинах та площа листкової поверхні збільшилась у середньому на 8,3–51,5% порівняно з контрольним варіантом. Найефективнішим перед зимовим періодом виявились варіанти зі внесенням Азотохелпу (3 л/т) під передпосівну культивуацію та обробкою Азотохелп насіння (1,5 л/т) + обробкою рослин у фазі весняного кушення (0,5 л/га) (табл. 1).

За їх дії у фазі розвитку ВВСН 22–25 висота рослин перевищила контрольний варіант у середньому на 16,7%, довжина коренів — на 31,8%, а кількість листків

Таблиця 1. Біометричні показники рослин пшениці озимої (2021–2023 рр.)

Варіант	Висота рослини, см	Маса рослини, г	Довжина кореня, см	Кількість листків на рослині, шт.	Площа листового апарату 1 рослини, см ²
<i>Фаза росту рослин ВВСН 22–25</i>					
1*	8,4	0,3	4,4	4,03	29,4
2	9,2	0,4	5,0	4,17	36,3
3	9,7	0,5	5,6	4,77	43,6
4	9,5	0,4	5,2	4,67	39,3
5	9,6	0,4	5,4	4,37	39,3
6	9,9	0,4	6,0	4,70	43,9
7	8,7	0,4	5,0	4,40	34,0
НІР₀₅	0,9	0,07	0,8	0,50	3,8
<i>Фаза росту рослин ВВСН 25–32</i>					
1	17,6	1,7	5,8	7,73	129,0
2	19,3	2,2	6,6	9,33	168,4
3	19,9	2,5	6,2	10,77	205,3
4	19,2	2,5	7,1	10,83	200,7
5	19,5	1,8	6,8	8,47	165,5
6	19,9	2,6	7,5	10,00	172,9
7	18,0	2,4	6,6	9,47	136,8
НІР₀₅	1,88	0,22	0,9	1,0	16,8

Примітки: 1 – контроль; 2 – Граундфікс (3 л/га), під передпосівну культивуацію; 3 – Азотохелп (3 л/га), під передпосівну культивуацію; 4 – Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га), під передпосівну культивуацію; 5 – Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння; 6 – Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння + Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кущення; 7 – Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кущення.

на рослині, за варіантів 3,6 та варіантом Граундфікс (1,5 л/т) + Азотохелп (1,5 л/т) під передпосівну культивуацію – на 20,0%, площу листової поверхні – на 48,8%. Решта варіантів – відповідно на 8,9; 26,1; 8,3 і 26,6% порівняно з контролем.

На масу рослин найбільше вплинув варіант зі внесенням Азотохелпу (3 л/т) під передпосівну культивуацію, за якого цей по-

казник був вищим від контролю на 51,5%, у решти варіантів із біопрепаратами – на 15,9%.

На момент входження в зимовий період у фазі розвитку ВВСН 22–25 біопрепарати позитивно вплинули як на розвиток та ріст рослин, так у подальшому і на продуктивність культури (коефіцієнти кореляції (r) становили 0,75–0,90 (*табл. 2*).

Таблиця 2. Показники кореляційних зв'язків між біометричними показниками рослин та врожайністю пшениці озимої за впливу мікробних препаратів (фаза розвитку ВВСН 22–25, 2021–2023 рр.)

Показники структури врожаю	Кореляція, (r)	Рівняння регресії, (y)
Висота рослини, см	0,88±0,10	$y = 0,5021x + 1,709$
Довжина кореня, см	0,85±0,10	$y = 0,5287x + 3,6072$
Маса рослини, г	0,75±0,13	$y = 4,3902x + 4,5463$
Кількість листків на рослині, шт.	0,87±0,10	$y = 0,9744x + 2,041$
Площа листового апарату, см ² /рослину	0,90±0,09	$y = 0,0543x + 4,3114$

Найвищий показник кореляційного зв'язку ($r=0,90\pm 0,09$) між біометричними показниками рослин та врожайністю пшениці озимої спостерігали за впливу біопрепаратів на площу листової поверхні. Це можна пояснити різним механізмом дії мікроорганізмів, які є основою біопрепаратів Граундфікс та Азотохелп, а саме поліпшенням енергетичного обміну в клітинах, зміцненням механічних тканин листків, збільшенням їх площі.

Застосування біопрепаратів Азотохелп та Граундфікс підвищило адаптивний потенціал та життєздатність рослин, сприяло кращій перезимівлі пшениці озимої. Найбільший відсоток збереження рослин пшениці озимої на час відновлення/вегетації відмічено у варіанті з обробкою насіння Азотохелп (1,5 л/т) та обробкою рослин Азотохелп (1,5 л/т) + обробкою рослин Азотохелп (0,5 л/га) у фазі весняного кушення (рис. 1).

За ефективністю щодо життєздатності рослин після зимового періоду до ньо-

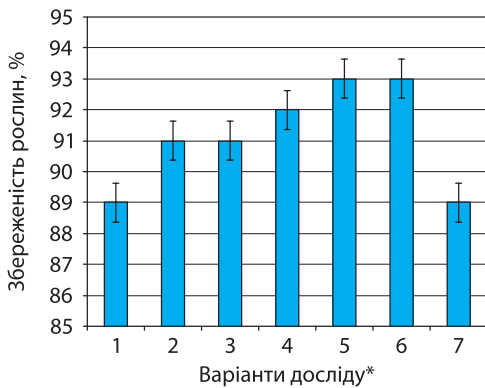


Рис. 1. Вплив різних способів внесення біопрепаратів Граундфікс та Азотохелп на життєздатність рослин після зимового періоду

Примітки: 1 – контроль; 2 – Граундфікс (3 л/га), під передпосівну культивування; 3 – Азотохелп (3 л/га), під передпосівну культивування; 4 – Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га), під передпосівну культивування; 5 – Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння; 6 – Азотохелп (1,5 л/т), обробка рослин + Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кушення; 7 – Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кушення.

го наближався варіант із Граундфіксом (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га).

Відомо, що ефективність біопрепаратів пов'язана з біологічною активністю мікроорганізмів, що є їх основою, та інших складових препаратів [22]. Аналогічні дані отримано М. Göbel et al. [22], у дослідженнях яких, за використання під передпосівну культивування в агроценозі пшениці озимої консорціуму *Pseudomonas brassicacearum*, *Bacillus amyloliquefaciens* та *Trichoderma harzianum* сумісно з немікробними стимуляторами, встановлено позитивний вплив на метаболізм рослин, підвищення їх стійкості після зимового періоду та пригнічення збудника септоріозу рослин. Сприятливий вплив біопрепаратів щодо стійкості протягом зимового періоду виявлено і в інших дослідженнях [14; 16; 23].

Ефективність застосування під передпосівну культивування окремо Азотохелпу та сумісно з Граундфіксом, а також Азотохелпу для обробки насіння (1,5 л/т) + рослин (0,5 л/га) у фазі весняного кушення (ВВСН 25–32) перевищувало ефективність решти варіантів у середньому вдвічі.

Максимальний стимулювальний ефект Азотохелпу спостерігали на утворення маси рослин (порівняно з контролем маса рослин збільшилась на 50,0–51,5% як восени, так і навесні (див. табл. 1). Це свідчить про кращу водозабезпеченість і тургесцентність, що сприяє стабілізації клітинних мембран, накопиченню розчинних вуглеводів і зменшенню ушкоджень від низьких температур, виходу більшого відсотку життєздатних рослин навесні.

Навесні, у фазі розвитку ВВСН 25–32 (весняне кушення) найефективнішими виявились внесення під передпосівну культивування Азотохелпу (3 л/т) та Граундфіксу (1,5 л/т) + Азотохелп (1,5 л/т), а також Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння + (0,5 л/га), обробка рослин у фазі весняного кушення. Ці процеси в подальшому позитивно вплинули і на формування продуктивності рослин, показники кореляції (r) між біометричними показниками у фазі розвитку ВВСН 25–32 та врожайністю колювались у межах 0,77–0,84 (табл. 3).

Встановлено, що, за використання Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га) під передпосівну культивуацію, в ризосфері рослин створюється збалансований консорціум азотфіксувальних, фосфор- і каліймобілізувальних, рістстимулювальних мікроорганізмів, ефективність якого опосередковано впливає на покращання біометричних показників та підвищення продуктивності пшениці озимої [24].

У фазі росту ВВСН 83–89 зафіксовано збільшення густоти рослин і продуктивних стебел у варіантах із використанням біопрепаратів. Найбільша кількість рослин на 1 м² та кількість продуктивних стебел сформувалась за впливу окремого внесення Азотохелпу (відповідно 270,1–272,6 порівняно з 264,0 рослин на 1 м² на контролі та 483,0–493,3 проти 468,8 стебел на 1 м² (табл. 4).

Це зумовлює посилення процесів कुщення та кращу реалізацію генетичного потенціалу рослин за умов оптимізації живлення. Виявлено активізацію ростових процесів за дії біопрепаратів, зумовлену поліпшенням азотного живлення, збільшенням доступних форм фосфору та калію, покращенням фітогормонального балансу. Висота рослин була найбільшою за передпосівного додавання Азотохелпу та Граундфіксу – 100,8–101,1 см порівняно з 91,8 см на контрольному варіанті. У решти варіантів (2,5,6 та 7) – 95,3–97,2 см.

Найвираженіший ефект щодо збільшення довжини колоса встановлено за впливу Азотохелпу, внесеного різними способами (під передпосівну культивуацію окремо – варіант 3 та сумісно з Граундфіксом – варіант 4, з обробкою насіння та рослин у фазі весняного кущення – варіант 6) –

Таблиця 3. Показники кореляційних зв'язків між біометричними показниками рослин та врожайністю пшениці озимої за впливу мікробних препаратів (фаза розвитку ВВСН 25–32, 2021–2023 рр.)

Показники структури врожаю	Кореляція, (r)	Рівняння регресії, (y)
Висота рослини, см	0,83±0,11	$y = 0,2887x + 0,8693$
Довжина кореня, см	0,77±0,13	$y = 0,4376x + 3,4583$
Маса рослини, г	0,78±0,12	$y = 0,684x + 4,8373$
Кількість листків на рослині, шт.	0,84±0,11	$y = 0,2332x + 4,1529$
Площа листового апарату, см ² /рослину	0,81±0,12	$y = 0,0886x + 48,795$

Таблиця 4. Вплив біопрепаратів на морфометричні показники пшениці озимої (фаза росту ВВСН 83–89, 2021–2023 рр.)

Варіант досліду	Кількість рослин на 1 м ²	Кількість продуктивних стебел на 1 м ²	Висота рослин, см	Довжина колоса, см	Кількість зерен у колосі, шт.	Абсолютна маса 1000 насінин, г
1*	264,0±35,9	468,8±16,3	91,8±1,4	6,6±0,3	26,4±1,2	47,1±0,1
2	265,4±36,3	476,1±14,8	97,2±1,3	7,1±0,3	27,9±1,4	48,7±0,9
3	270,1±34,9	483,0±11,6	100,8±3,0	7,3±0,1	28,0±0,6	49,3±0,8
4	267,9±34,2	478,6±11,2	101,1±4,0	7,5±0,2	28,9±1,1	49,0±0,7
5	264,7±36,4	479,4±19,0	95,3±1,6	7,2±0,2	27,6±0,7	49,4±0,9
6	272,6±34,3	493,3±12,5	96,2±1,9	7,3±0,1	27,8±0,3	49,2±1,1
7	271,6±35,9	485,4±11,0	94,4±1,2	7,4±0,2	26,9±1,2	49,1±0,7

Примітки: 1 – контроль; 2 – Граундфікс (3 л/га), під передпосівну культивуацію; 3 – Азотохелп (3 л/га), під передпосівну культивуацію; 4 – Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га), під передпосівну культивуацію; 5 – Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння; 6 – Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння + Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кущення; 7 – Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кущення.

більше на 11,4–13,6% щодо контролю. За внесення Азотохелпу та Граундфіксу під передпосівну культивуацію (варіанти 3,4) краще відбувались процеси наливу зерна та зменшення редуції квіток, що спричинило значну кількість зерен у колосі (28,0–28,9 шт. порівняно з контролем – 26,4 шт.). Абсолютна маса 1000 насінин була найбільшою за впливу різних способів внесення Азотохелпу – 49,2–49,4 порівняно з 47,1 г на контролі.

Важливим чинниками формування зернової продуктивності є довжина колоса, кількість зерен у колосі та абсолютна маса 1000 насінин. Показники кореляції (*r*) між вище переліченими показниками та продуктивністю пшениці озимої за впливу біо-

препаратів становили відповідно 0,90±0,09, 0,85±0,10 та 0,89±0,09, що свідчить про сильну кореляцію (табл. 5).

Біологічна врожайність пшениці озимої варіювала за роками досліджень, однак у середньому найкращими виявились варіанти з комплексним внесенням Граундфіксу (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га) (варіант 4), обробкою насіння Азотохелп (1,5 л/га) + Азотохелп (0,5 л/га) у фазі весняного кушення (варіант 6) та внесення Азотохелпу (3 л/га) під передпосівну інокуляцію (варіант 3), за дії яких біологічна урожайність сягала відповідно 6,65, 6, 63 і 6,55 т/га (табл. 6).

Найвищою врожайність була за сумісної дії поліфункціональних біопрепара-

Таблиця 5. Показники кореляційних зв'язків між елементами структури врожаю та продуктивністю пшениці озимої за впливу біопрепаратів

Показники структури врожаю	Кореляція, (<i>r</i>)	Рівняння регресії, (<i>y</i>)
Кількість рослин на 1 м ²	0,58±0,16	$y = 0,53x - 78,355$
Кількість продуктивних стебел на 1 м ²	0,72±0,14	$y = 0,2964x - 78,743$
Висота рослин, см	0,80±0,12	$y = 0,7473x - 8,5437$
Довжина колосу, см	0,90±0,09	$y = 9,6538x - 5,7934$
Кількість зерен у колосі, шт.	0,85±0,10	$y = 3,3167x - 27,969$
Абсолютна маса 1000 насінин, г	0,89±0,09	$y = 3,5441x - 109,34$

Таблиця 6. Біологічна врожайність пшениці озимої за впливу біопрепаратів, т/га

№ п/п	Варіант досліджу	Роки			Середнє	Приріст (±) до контролю, т/га	Приріст (±) до контролю, %	
		2021	2022	2023				
1	Контроль	5,34	5,99	5,85	5,73	–	–	
2	Граундфікс (3 л/га)	під передпосівну культивуацію	5,84	6,65	6,49	6,33	0,60	10,41
3	Азотохелп (3 л/га)		6,05	6,76	6,84	6,55	0,82	14,31
4	Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га)		6,27	6,95	6,73	6,65	0,92	16,06
5	Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння	6,15	6,41	6,67	6,41	0,68	11,87	
6	Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння + Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кушення	6,22	6,89	6,79	6,63	0,90	15,76	
7	Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кушення	5,78	6,75	6,38	6,30	0,57	10,01	
НІР₀₅		0,08	0,11	0,18				

тів Граундфіксу та Азотохелпу (приріст урожаю був на 16,06% більшим за контроль), що пояснює їх синергічний ефект, збалансований перерозподіл асимілянтів від стебла до колоса. У варіантах 6 і 3 приріст урожаю до контролю становив 15,76 і 14,31% відповідно.

Ефективність сумісного поєднання бактерій із різним механізмом дії щодо зернових культур доведено в роботах Б.О. Палазюка зі співавт. [8] та Т. Kaur et al. [18]. Аналогічну ефективність спостерігали M.L. Nguyen et al. [24], в дослідженнях яких встановлено вплив *Bacillus velezensis* на активізацію процесів росту та розвитку пшениці озимої та ярої, збільшення врожайності зерна на 14,9%, порівняно з контролем. Однак, активність їх штамів бактерій змінювалась залежно від умов років досліджень.

Згідно з дослідженнями Л. Присяжнюк та ін. [25], ґрунтово-кліматична зона вирощування та взаємодія факторів зона × рік істотно впливають на врожайність пшениці озимої — відповідно 73 і 21%, на вміст білка та клейковини — відповідно 49 і 64%, тоді як умови вегетаційного періоду — на 21 й 28%, а генотип — на 5 та 4%. За розрахунками Б.О. Палазюка зі С.О. Юрченко [8], кліматичні умови року досліджень мали 40,4% впливу, а використання біопрепаратів за вегетації — 17,7%.

Веgetаційні періоди 2020–2023 рр. відзначалися істотною варіабельністю гідротермічних умов, що вплинуло на продуктивність пшениці озимої. Впродовж 2020–2021 рр. сприятливі умови на початкових етапах розвитку та достатній запас вологи у травні поєднувалися з сильними безсніжними морозами взимку та нестабільними опадами під час формування репродуктивних органів, що зумовило зниження врожайності. Найвищі показники продуктивності в 2021–2022 рр. зумовлені достатнім запасом вологи у зимово-весняний період і сприятливими умовами перезимівлі, що нівелювало вплив осінньої посухи та суховіїв у період наливу зерна. Веgetаційний період 2022–2023 рр. характеризувався пізніми строками сівби, аномально теплою зимою,

надлишком вологи восени та влітку і дефіцитом опадів у травні, що зумовило дещо нижчу врожайність порівняно з попереднім роком. У середньому за 2021–2023 рр. встановлено стабільний позитивний вплив біопрепаратів Азотохелп та Граундфікс на формування продуктивності культури за мінливих гідротермічних умов.

Ще одним значним елементом біологічної врожайності є формування побічної продукції (соломи), що має важливе господарське значення. Біопрепарати Азотохелп та Граундфікс сприяли активізації мікробіому ризосфери, наростанню вегетативної маси рослин за рахунок покращання азотного та фосфорного живлення, стимуляції процесів фотосинтезу, фітогормональної регуляції. Встановлено, що за впливу різних способів внесення Азотохелпу та Граундфіксу, коефіцієнт співвідношення побічної до основної продукції був найменшим у варіантах 3; 5 та 6 і становив у межах 0,84–0,87 (на контролі — 0,96) (рис. 2).

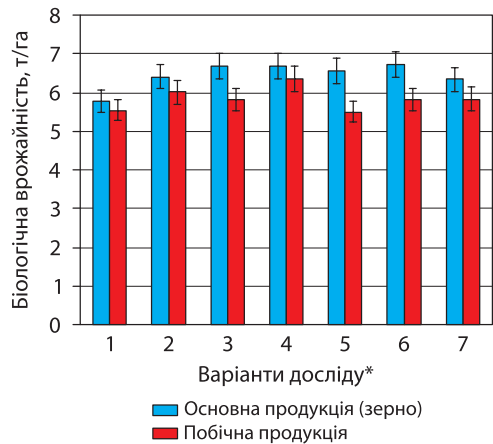


Рис. 2. Вплив різних способів внесення біопрепаратів Граундфікс та Азотохелп на формування побічної продукції

Примітки: 1 — контроль; 2 — Граундфікс (3 л/га), під передпосівну культивуацію; 3 — Азотохелп (3 л/га), під передпосівну культивуацію; 4 — Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га), під передпосівну культивуацію; 5 — Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння; 6 — Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння + Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кущення; 7 — Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного кущення.

Таблиця 7. Показники якості зерна пшениці озимої за дії біопрепаратів (2021–2023 рр.)

№ п/п	Варіант досліджу	Маса 1000 насінин, г	Склоподібність, %	Натурна маса, г/л	Вміст сирової клейковини, %
1	Контроль	47,0±0,1	46,3±6,3	759,3±1,7	15,2±0,8
2	Граундфікс (3 л/га)	49,7±0,9	57,7±6,7	769,0±1,0	17,0±0,2
3	Азотохелп (3 л/га)				
4	Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га)				
5	Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння	50,0±1,0	52,7±5,7	771,7±4,3	16,1±0,2
6	Азотохелп (1,5 л/т), обробка насіння + Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного куцнення	49,5±1,3	54,3±12,3	776,3±7,7	16,7±0,5
7	Азотохелп (0,5 л/га), у фазі весняного куцнення	49,5±0,3	54,3±11,3	764,3±2,7	16,0±0,2

У середньому за роки досліджень відмічено позитивну дію біопрепаратів на показники якості зерна пшениці озимої, їх зростання порівняно з контролем. За дії біопрепаратів Граундфікс та Азотохелп поліпшуються умови наливу зерна, ефективність використання асимілянтів. Активізації процесів азотфіксації посилює синтез білків, впливає на продовження періоду активного фотосинтезу. За рахунок цього, маса 1000 насінин за дії біопрепаратів збільшилася в середньому на 6,0% (табл. 7).

Найвищим цей показник був за дії Азотохелп 1,5 л/т обробка насіння (50,0 г порівняно з 47,0 г на контрольному варіанті). Важливим показником якості є склоподібність зерна. Найбільшим це значення виявилось за дії Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га) (58,7%) та окремо Граундфіксу 3 л/га (57,7%), що перевищувало контроль на 19,4%, у решти варіантів – на 17,0%.

Це зумовлено кращим накопиченням білково-крохмального комплексу та більш рівномірним дозріванням зерна за дії біопрепаратів. Їх вплив проявився і у формуванні більш виповненого, щільного зерна кращої товарної якості, зростанні натурної маси зерна.

Найвищі показники натурної маси були у варіанті з Азотохелпом (1,5 л/т), обробка насіння + Азотохелп (0,5 л/га),

обробка рослин у фазі весняного куцнення – 771,7–776,3 порівняно з 759,3 г/л на контрольному варіанті. В середньому за дії усіх досліджуваних варіантів з біопрепаратами, натурна маса зерна була в середньому більшою на 9,6 г/л від контролю.

За впливу біопрепаратів спостерігали і посилення білкового обміну та засвоєння азоту, вміст сирової клейковини у варіантах зі внесенням під передпосівну культивування окремо Граундфіксу (3 л/га), Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га) та обробка насіння Азотохелпом (1,5 л/т) був вищим за контроль на 10,4–11,8%.

Отже, за дії біопрепаратів спостерігали комплексне покращання показників якості зерна пшениці озимої, було сформовано зерно з поліпшеними хімічними та фізичними властивостями.

ВИСНОВКИ

У процесах формування продуктивності рослин пшениці озимої в середньому за роки досліджень найбільш ефективними виявились внесення під передпосівну культивування Азотохелп (3 л/га), Граундфікс (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га), обробка насіння Азотохелп (1,5 л/т) та у нормі (0,5 л/га) у фазі весняного куцнення.

Встановлено, що застосування біопрепаратів Азотохелп та Граундфікс істотно

підвищує адаптивний потенціал озимої пшениці висота рослин, біомаса та площа листової поверхні зросли на 8,3–51,5% порівняно з контролем на етапі осіннього кушення (ВВСН 22–25). Це забезпечило оптимальний морфологічний стан посівів перед перезимівлею, що підтверджується високою кореляцією між параметрами осіннього розвитку та подальшою врожайністю ($r=0,75-0,88$).

Застосування під передпосівну культивування Азотохелпу у нормі 3 л/га та Граундфіксу (1,5 л/га) + Азотохелп (1,5 л/га), обробка насіння Азотохелп у нормі (1,5 л/т) + обробка рослин Азотохелп (0,5 л/га) у фазі весняного кушення підвищило адаптивність рослин до умов перезимівлі, створило передумови для формування високої продуктивності посівів, позитивно вплинуло на біометричні показники пшениці озимої в осінній та весняний періоди, які в середньому були на 8,3–48,8% і 7,7–50,0% більшими за контроль. У подальшому їх вплив на ростові процеси дещо уповільнився за рахунок перерозподілу асимілянтів у бік наливу зерна.

Максимальна ефективність формування зернової продуктивності відзначена за

передпосівного внесення суміші препаратів, а також за поєднання обробки насіння Азотохелп (1,5 л/т) + позакореневе підживлення (0,5 л/га) у фазі весняного кушення (збільшення кількості зерен у колосі до 28,0–28,9 шт. та зростання маси 1000 насінин на 6,0% (до 49,2–49,4 г)).

Біологічна дія препаратів спрямована на збалансований перерозподіл асимілянтів, що підтверджується зниженням коефіцієнта співвідношення побічної продукції до основної до рівня 0,84–0,87 (проти 0,96 на контролі). За комбінованої обробки насіння та посівів натурна маса зроста в середньому на 9,6 г/л (максимум – 776,3 г/л), показники склоподібності становили 58,7%, вміст сирової клейковини підвищився на 10,4–11,8%, що свідчить про активізацію азотно-го обміну та посилення біосинтезу білків за дії мікробіологічних агентів.

Встановлено синергічний вплив за сумісного внесення біопрепаратів Граундфікс 1,5 л/га + Азотохелп 1,5 л/га, формування розвинутої кореневої системи та площі листової поверхні. Це зумовило максимальну врожайність (6,65 т/га) та найкращі показники якості зерна (склоподібність 58,7%, вміст клейковини 16,8%).

ЛІТЕРАТУРА

- Chen, Q., Song, Y., An, Y., Lu, Y., & Zhong, G. (2024). Soil microorganisms: their role in enhancing crop nutrition and health. *Diversity*, 16(12), 734. DOI: <https://doi.org/10.3390/d16120734>.
- Herrero, J., Ramírez-Santos, A., Díaz-Santos, E., & Torres-Cortés, G. (2025). Biofertilizers for Enhanced Nitrogen Use Efficiency: Mechanisms, Innovations, and Challenges. *Nitrogen*, 6(4), 111. DOI: <https://doi.org/10.3390/nitrogen6040111>.
- Ghorbani, M. (2025). Recycled Nitrogen for Regenerative Agriculture: A Review of Agronomic and Environmental Impacts of Circular Nutrient Sources. *Agronomy*, 15(11), 2503. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15112503>.
- Fukami, J., Nogueira, M. A., Araujo, R. S., & Hungria, M. (2016). Accessing inoculation methods of maize and wheat with *Azospirillum brasilense*. *AMB Express*, 6, 3. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-015-0171-y>.
- Artyszak, A., & Gozdowski, D. (2021). Is It Possible to Maintain the Quantity and Quality of Winter Wheat Grain by Replacing Part of the Mineral Nitrogen Dose by Growth Activators and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)? *Sustainability*, 13(11), 5834. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13115834>.
- Mandal, S., Anand, U., López-Bucio, J., Radha, Kumar, M., Lal, M. K., Tiwari, R. K., & Dey, A. (2023). Biostimulants and environmental stress mitigation in crops: A novel and emerging approach for agricultural sustainability under climate change. *Environmental research*, 233, 116357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116357>.
- Jindo, K., Goron, T. L., Pizarro-Tobías, P. Sánchez-Monedero, M., Audette, Y., Deolu-Ajayi, A., ... Tortosa, G. (2022). Application of biostimulant products and biological control agents in sustainable viticulture: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 932311. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.932311>.
- Палазюк, Б. О., & Юрченко, С. О. (2025). Формування урожайності пшениці м'якої озимої залежно від сортових властивостей та впливу біостимуляторів на основі ризобактерій. *Аграрні інновації*, 27(4), 167–174. DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2025.32.24>.
- Yakovenko, D. O., Boroday, V. V., & Bolokhovska, V. A. (2025). Directionality of microbiological processes in the rhizosphere of winter wheat under the influence of biological products Azotohelp® and Groundfix®. In: *Modern Agronomy Trends: Innovation, Sustainable Development and the Future of Agriculture: monograph*.

- (pp. 434–458). Riga: Baltija Publishing. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-588-4-18>.
10. Дацько, А., Хоменко, Т., Новохацький, М., Квасницька, Л., & Умрихін, Н. (2022). Ефективність мікробних препаратів за обробки насіння пшениці озимої. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 31(45), 121–129. DOI: [http://doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31\(45\)-11](http://doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-11).
 11. Левішко, А. С., Гуменюк, І. І., & Цвігун, В. О. (2025). Ефективність комплексної обробки насіння пшениці озимої. *Сільськогосподарська мікробіологія*, 41, 45–55. DOI: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.41.45-55>.
 12. Грабовська, Т. О., & Мельник, Г. Г. (2017). Вплив біопрепаратів на продуктивність пшениці озимої за органічного виробництва. *Аеробіологія*, 1, 80–85. URL: https://agrobiologiya.btsau.edu.ua/sites/default/files/visnyku/agrobiologiya/grabovska_1_2017.pdf.
 13. Kumar, S., Satyavir, D., Sindhu, S., & Kumar, R. (2021). Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.10.0094>.
 14. Нікорич, В. А. (2025). Роль біопрепаратів у компенсації дефіциту вегетації та економічній ефективності пізньої сівби озимої пшениці. *Науковий вісник Чернівецького університету. Сер.: Біологія (Біологічні системи)*, 17(2), 302–312. DOI: <https://doi.org/10.31861/biosystems2025.02.302>.
 15. Хоміна, В. Я., & Шейко, Д. В. (2023). Елементи біологізації як засіб поліпшення технологічних показників та якісного складу зерна пшениці озимої в умовах західного Лісостепу. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, 2(39), 35–40. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2>.
 16. Поспелова, Г. Д., Коваленко, Н. П., Поспелов, С. В., Литвиненко, С. О., & Сиваш, К. С. (2024). Ефективність застосування біопрепаратів на пшениці озимій. *Scientific Progress & Innovations*, 27(4), 37–42. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2024.27.04.07>.
 17. Latkovic, D., Maksimovic, J., Dinic, Z., Pivic R., Stanojkovic, A., & Stanojkovic-Sebic, A. (2020). Case study upon foliar application of biofertilizers affecting microbial biomass and enzyme activity in soil and yield related properties of maize and wheat grains. *Biology*, 9(12), 452. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology9120452>.
 18. Kaur, T., Devi, R., Kumar, S., Sheikh, I., Kour, D., & Yadav, A. N. (2022). Microbial consortium with nitrogen-fixing and mineral-solubilising attributes for growth of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Heliyon*, 8(4), e09326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09326>.
 19. Демидов, О. А. (2023). *Технологія вирощування насіння пшениці озимої: методичні рекомендації*. Центральне: Миронівський інститут пшениці ім. В.М. Ремесла.
 20. Лівандовський, А. А., & Хоменко, Т. М. (2016). *Методика проведення експертизи сортів рослин групи зернових, круп'яних та зернобобових на придатність до поширення в Україні* (С. О. Ткачик, Ред.). Вінниця: Український інститут експертизи сортів рослин.
 21. Киенко, З. Б., & Присяжнюк, Л. М. (2016). *Методика проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення в Україні. Методи визначення показників якості продукції рослинництва* (С. О. Ткачик, Ред.). Вінниця: Український інститут експертизи сортів рослин.
 22. Göbel, M., Dulal, S., Sommer, L., Sommer, L., Weinmann, M., Mamun, A., ... Bradáčová, K. (2024). Protective potential of selected microbial and non-microbial biostimulants against Zymoseptoria tritici leaf blotch in winter wheat as affected by the form of N supply. *Front Plant Sci*, 15, 1407585. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1407585>.
 23. Михайлюк, Д. В., & Правдива, Л. А. (2025). Вплив елементів технології вирощування на виживаність та зимостійкість пшениці озимої в умовах Правобережного Лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, 3(48), 67–72. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-3.8>.
 24. Nguyen, M. L., Glaes, J., Spaepen, S., Bodson, B., du Jardin, P., & Delaplace, P. (2019). Biostimulant effects of Bacillus strains on wheat from in vitro towards field conditions are modulated by nitrogen supply. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182, 325–334. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201700610>.
 25. Присяжнюк, Л., Хоменко, Т., Ляшенко, С., & Мельник, С. (2022). Фактори вирощування впливають на продуктивність нових сортів м'якої озимої пшениці. *Вивчення та охорона сортів рослин*, 18(4), 273–82. DOI: <https://doi.org/10.21498/2518-1017.18.4.2022.273989>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 10.11.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.12.2025
 Дата публікації: 27.02.2026

ВПЛИВ БІОЛОГІЧНИХ ПРЕПАРАТІВ НА ПОСІВНІ ЯКОСТІ НАСІННЯ ГІСОПУ ЛІКАРСЬКОГО

І.В. Сашко¹, Н.В. Приведенюк²

¹Полтавський державний аграрний університет (м. Полтава, Україна)
e-mail: ihor.sashko@pdau.edu.ua; ORCID: 0009-0002-4411-8425

²Дослідна станція лікарських рослин Інституту агроєкології і природокористування НААН
(с. Березоточа, Полтавська обл., Україна)
e-mail: privedenyuk1983@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0748-8083

Метою досліджень було оцінити вплив передпосівної обробки насіння гісопу лікарського (*Hyssopus officinalis* L.) біологічними препаратами та органо-мінеральним добривом на основні показники його посівних якостей. Об'єктом дослідження слугувало насіння сорту «Blankyt». У досліді використовували мікробіологічні препарати на основі грибів-антагоністів *Trichoderma lignorum* і *Trichoderma virens*, а також ризосферних бактерій *Pseudomonas fluorescens*. Додатково застосовували органо-мінеральне добриво ШЕДРОДАР К ТМ та варіант комплексної обробки, що поєднував усі зазначені препарати. Контролем було насіння, оброблене дистильованою водою. Передпосівну обробку насіння здійснювали шляхом зволоження у відповідних робочих розчинах із подальшою експозицією протягом 24 год та підсушуванням до сухого стану. Пророщування проводили в чашках Петрі у кліматичній камері за температури $24 \pm 1^\circ\text{C}$ упродовж 14 діб. Визначали енергію проростання, схожість насіння та довжину проростків за загальноприйнятими методиками. Результати досліджень засвідчили, що застосування мікробіологічних препаратів істотно впливало на посівні якості насіння гісопу лікарського. Найвищу енергію проростання (73%) забезпечувала обробка насіння препаратом на основі *Trichoderma lignorum*. Використання *Trichoderma virens* сприяло досягненню максимальної схожості насіння (92%) та істотному збільшенню довжини проростків до 31,2 мм. Внесення лише органо-мінерального добрива характеризувалося обмеженим впливом на досліджувані показники. Найбільшу довжину проростків (32,2 мм) зафіксовано у варіанті комплексної обробки, що свідчить про синергічний ефект досліджуваних препаратів і позитивний вплив на інтенсивність початкового росту рослин. Отримані результати підтверджують доцільність використання біологічних препаратів для підвищення якості посівного матеріалу гісопу лікарського.

Ключові слова: *Hyssopus officinalis* L., *Trichoderma lignorum*, *Trichoderma virens*, *Pseudomonas fluorescens*, органо-мінеральне добриво, схожість насіння, енергія проростання, довжина проростків.

ВСТУП

Передпосівна обробка насіння є одним із ключових елементів сучасних технологій вирощування сільськогосподарських і лікарських культур, оскільки саме на початкових етапах онтогенезу закладаються передумови для формування продуктивного та стійкого рослинного організму. Якість насіння, рівень його схожості та енергія проростання значною мірою визначають густоту посівів, рівномірність сходів і подальший розвиток рослин, що в підсумку безпосередньо впливає на врожайність, а також на якість отриманої продукції [1–4].

Особливої актуальності ці питання набувають у контексті вирощування лікарських і ароматичних культур, для яких стабільність біохімічного складу та екологічна безпека сировини мають першочергове значення.

В умовах інтенсифікації агровиробництва та зростання вимог до екологічної безпечності технологій дедалі більшої уваги надають біологічним методам стимулювання проростання насіння і захисту рослин. Передпосівна інюкуляція насіння мікробіологічними препаратами та застосування органо-мінеральних добрив розглядаються як ефективна альтернатива або доповнення

до хімічних засобів, оскільки вони сприяють активізації фізіолого-біохімічних процесів, покращують засвоєння поживних елементів і знижують негативний вплив абіотичних та біотичних стресів. Використання корисних мікроорганізмів на ранніх етапах розвитку рослин допомагає формувати сприятливу мікробіоту навколо проростка, що позитивно позначається на його рості та розвитку [4–8].

Особливий інтерес у цьому контексті становлять гриби-антагоністи та ризосферні бактерії, здатні поєднувати стимулювальну та захисну дію. Їх застосування в системі передпосівної обробки насіння відкриває нові можливості для підвищення посівних якостей і забезпечення стабільних сходів без надмірного антропогенного навантаження на агроєкосистеми [8; 9]. З огляду на це, вивчення впливу біологічних препаратів на показники енергії проростання, схожості та початкового росту насіння гісопу лікарського є важливим і актуальним науковим завданням, що має як теоретичне, так і практичне значення для розвитку екологічно орієнтованих технологій вирощування лікарських культур.

Метою досліджень було встановити вплив передпосівної обробки насіння гісопу лікарського мікробіологічними препаратами та органо-мінеральним добривом на його посівні якості.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Гісоп лікарський (*Hyssopus officinalis* L.) є перспективною лікарською та ароматичною культурою, що привертає увагу науковців завдяки високому вмісту біологічно активних сполук, зокрема ефірних олій, флавоноїдів і фенольних речовин. Значний внесок у дослідження біологічних особливостей, продуктивності та технології вирощування гісопу лікарського зробили як вітчизняні, так і зарубіжні вчені, зокрема М. Федорчук, Є. Ткачова, П. Добровольський, А. Moro, А. Zalacain, F. Fathiazad, S. Hamedeyazdan, M. Naemi, S. Mijani, D. Karimian, A. Barzgar та ін. Більшість досліджень учених зосереджені на вивченні

хімічного складу рослинної сировини, продуктивності культури, особливостей росту, розвитку та адаптації до різних ґрунтово-кліматичних умов [10–14]. Водночас значна кількість робіт присвячена питанням насінневого розмноження гісопу, оскільки рівень схожості та енергії проростання насіння істотно впливають на рівномірність сходів і подальше формування врожаю сировини [15–19]. Дослідження з питань ефективності застосування біологічних препаратів у рослинництві виконано низкою вчених, зокрема Л. Гаврилюк, О. Кічигіна, Ю. Туровнік, І. Мосійчук, І. Безноско, В. Мудрак, В. Fazeli-Nasab, R. Sayyed, R. Yadav, S. Woo, R. Hermosa, F. Ferreira та ін.

У науковій літературі відзначається, що насіння гісопу лікарського характеризується відносно повільним і нерівномірним проростанням, що зумовлює необхідність застосування різних методів передпосівної обробки [17; 18]. Дослідники вивчали вплив температурних режимів, освітлення, термінів зберігання насіння, а також використання регуляторів росту та біологічно активних речовин із метою підвищення його посівних якостей. Доведено дослідженнями, що передпосівна обробка насіння допомагає активізувати обмінні процеси, покращити водопоглинання та прискорити появу дружних сходів культури [15–19].

Окремим напрямом досліджень є захист рослин від шкідливих організмів мікробіологічними препаратами. Науковці підкреслюють, що біологічний контроль грибних захворювань є багатокомпонентною системою, ефективність якої визначається не лише властивостями окремих біоагентів, а й характером їх взаємодії з рослиною-господарем, фітопатогенами та ґрунтовою мікробіотою. Наголошується, що успішне застосування мікробіологічних препаратів, зокрема на основі антагоністичних грибів і бактерій, потребує ретельного добору ефективних штамів та розуміння механізмів їх дії в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах. У зв'язку зі складністю ґрунтових мікробіотних угруповань доцільним є екологічний підхід до розроблення систем

біологічного контролю, який передбачає оцінку взаємодії біоагента з патогеном, культурною рослиною та навколишнім середовищем [20]. Такий підхід особливо важливий для лікарських культур, зокрема гісопу лікарського, де ефективність передпосівної обробки насіння біопрепаратами значною мірою залежить від адаптованості використаних мікроорганізмів до конкретних агроекологічних умов.

У наукових публікаціях значну увагу приділено ролі *Pseudomonas fluorescens* як ризосферної бактерії з вираженими властивостями стимуляції росту рослин і біологічного контролю фітопатогенів. Показано, що цей аеробний мікроорганізм є повсюдно поширеним у сільськогосподарських ґрунтах і добре адаптованим до колонізації ризосфери та спермосфери завдяки здатності швидко використовувати кореневі й насінневі ексудати. *Pseudomonas fluorescens* продукує широкий спектр біоактивних метаболітів, зокрема антибіотики, сидерофори, леткі сполуки, гідролітичні ферменти та речовини, що стимулюють ріст рослин, а також індукує системну стійкість рослин до грибних, бактеріальних і вірусних патогенів. Встановлено, що штами цієї бактерії здатні ефективно пригнічувати ґрунтові патогени та проявляють синергічну дію у складі консорціумів із іншими ризобактеріями або як ендofіти, що підвищує їхню практичну цінність. Завдяки швидкому росту *in vitro* та можливості масового культивування *Pseudomonas fluorescens* розглядається як перспективний компонент біопрепаратів для передпосівної обробки насіння, зокрема лікарських культур, з метою поліпшення посівних якостей і посилення стійкості рослин до стресових чинників [21].

Гриби роду *Trichoderma* є повсюдно поширеними ґрунтовими мікроорганізмами та виконують комплекс важливих функцій у сільськогосподарських екосистемах. Вони можуть ефективно обмежувати розвиток фітопатогенних організмів, активізувати захисні реакції рослин, стимулювати їх ріст і розвиток, покращувати поглинання макро- та мікроелементів, а також поліпшити

адаптивність рослин до абіотичних стресів [6–8]. Одним із ключових механізмів біологічного контролю за участю *Trichoderma* є індукція систем захисту рослин у процесі їхньої взаємодії з грибом [9]. Завдяки високій метаболічній різноманітності та здатності пристосовуватися до різних екологічних умов представники цього роду вивчаються як перспективні агенти для використання в широкому спектрі агро-систем. Окремі штами, зокрема *Trichoderma lignorum*, *Trichoderma virens*, уже впроваджені у виробництво біофунгіцидів, що підкреслює їхню важливу роль у системах інтегрованого захисту рослин і сталого землеробства.

У сучасних дослідженнях особливу увагу приділяють передпосівній обробці насіння біопрепаратами, що передбачає використання корисних мікроорганізмів або біологічних агентів для стимуляції росту рослин і контролю захворювань. Доведено, що гриби роду *Trichoderma* у процесі передпосівної обробки продукують регулятори росту, які прискорюють проростання насіння та збільшують масу коренів і надземної частини рослин, зокрема за умов дефіциту вологи. Колонізація кореневої системи рослин грибами *Trichoderma* сприяє її інтенсивному розвитку, підвищенню доступності фосфору та мікроелементів, посиленню стійкості до абіотичних стресів і фітопатогенів. Загалом, передпосівна обробка насіння біопрепаратами аналізується як екологічно безпечний та ефективний передпосівний прийом, який сприяє оптимізації фізіолого-біохімічних процесів, посиленню життєздатності проростків і стійкості рослин до стресових чинників середовища [22].

Тому, аналіз літературних джерел свідчить, що передпосівна обробка насіння гісопу лікарського біологічно активними речовинами, зокрема хітозаном і мікробіологічними препаратами, є успішним напрямом поліпшення посівних якостей насіння та стійкості рослин до несприятливих умов вирощування. Втім, питання порівняльної ефективності різних біологічних агентів та їх комплексного застосування щодо

насіння гісопу залишаються недостатньо вивченими, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розробку схеми лабораторного дослідження та вибір основних показників оцінювання посівних якостей насіння здійснювали відповідно до методичних підходів, викладених у працях М.М. Гаврилюк, М.М. Макрушина, С.М. Каленської та ін. [23–25]. Лабораторні визначення схожості та енергії проростання насіння проводили згідно з чинними національними стандартами, зокрема ДСТУ 3657-97, ДСТУ 7160:2020 та ДСТУ 4138-2002 [26–28].

Об'єктом досліджень було насіння гісопу лікарського сорту «Blankyt». У досліді використовували мікробіологічні препарати на основі грибів-антагоністів *Trichoderma lignorum* (препарат Триходермін М) та *Trichoderma virens* (синоніми – *Gliocladium virens*, препарат Гліокладін М), а також ризосферних бактерій *Pseudomonas fluorescens* (препарат Планриз М). Окрім того, застосовували органо-мінеральне добриво ЩЕДРОДАР К ТМ, яке містить комплекси мікроелементів у хелатній формі та комплекс біологічно активних речовин. Окремим варіантом дослідження було поєднане використання всіх зазначених мікробіологічних препаратів разом з органо-мінеральним добривом. Контрольним варіантом слугувало насіння, оброблене дистильованою водою.

Передпосівну обробку насіння виконували шляхом зволоження у відповідних робочих розчинах препаратів. Оброблене насіння витримували в герметично закритій тарі протягом 24 год для забезпечення адгезії та проникнення діючих речовин. Після цього насіння підсушували до сипучого стану на фільтрувальному папері впродовж 1 год за кімнатної температури.

Для визначення посівних якостей насіння закладали по 100 насінин у чашки Петрі, вистелені двома шарами фільтрувального паперу, попередньо зволоженого дистильованою водою. Пророщування здійснювали

в кліматичній камері протягом 14 діб за постійної температури $24 \pm 1^\circ\text{C}$, а також періодичне зволоження фільтрувального паперу дистильованою водою.

Енергію проростання насіння спостерігали на 4-ту добу шляхом підрахунку кількості пророслих насінин, виражаючи показник у відсотках від загальної кількості закладеного насіння. Схожість насіння проводили на 14-ту добу пророщування відповідно до загальноприйнятих методик. Додатково вимірювали довжину проростків для оцінки інтенсивності початкового росту рослин.

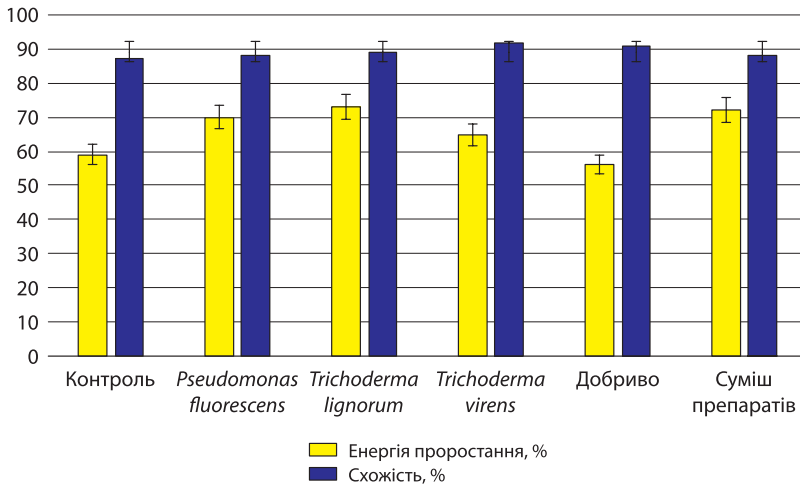
Отримані експериментальні дані використовували для оцінки ефективності окремих мікробіологічних препаратів та їх комплексного застосування з органо-мінеральним добривом із метою обґрунтування екологічно безпечних технологій вирощування гісопу лікарського.

Математичну обробку результатів виконували методами варіаційної статистики за допомогою дисперсійного аналізу. Істотність різниці між середніми значеннями оцінювали за $HP_{0,05}$, за рівня значущості $p \leq 0,05$. Розрахунки виконували в програмі Statistica.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Отримані експериментальні дані переконливо свідчать про те, що передпосівна обробка насіння гісопу лікарського біологічними препаратами та органо-мінеральним добривом істотно впливає на формування його посівних якостей, зокрема на енергію проростання, лабораторну схожість і морфометричні показники проростків. Виявлені відмінності між варіантами обробки вказують на різний механізм дії застосованих препаратів та їхню здатність активізувати фізіолого-біохімічні процеси на початкових етапах онтогенезу рослин (рис.).

У контрольному варіанті, де насіння оброблялося дистильованою водою, енергія проростання становила 59%, а лабораторна схожість – 87%, що є базовим рівнем життєздатності насіння гісопу лікарського



Залежність енергії проростання та схожості насіння гісопу лікарського від передпосівної обробки насіння мікробіологічними препаратами та органо-мінеральним добривом

(табл.). Середня довжина проростків на контролі сягала 28,4 мм, що відображає помірну інтенсивність початкового росту за відсутності стимулювальних чинників.

Передпосівна обробка насіння препаратом на основі *Pseudomonas fluorescens* позитивно впливала насамперед на енергію проростання, яка зростає до 70%, перевищивши контрольний показник на 11%, що є статистично достовірним з огляду на величину $HP_{0,05}$. Це свідчить про здатність даного мікроорганізму активізувати процеси початкового проростання насіння. Водночас схожість насіння у цьому варіан-

ті зростає лише на 1% і перебувала в межах статистичної похибки, а довжина проростків практично не відрізнялася від контролю (28,5 мм), що вказує на обмежений вплив препарату на подальший лінійний ріст проростків.

Більш виражений стимулювальний ефект встановлено за використання препарату на основі *Trichoderma lignorum*. У цьому варіанті енергія проростання насіння досягла 73%, що на 14% перевищувало контрольне значення та істотно переважало $HP_{0,05}$. Лабораторна схожість збільшилась до 89%, а середня довжина

Вплив біопрепаратів та органо-мінерального добрива на посівні якості насіння гісопу лікарського

Варіанти	Норма внесення, мл/кг	Енергія проростання, %	Схожість, %	Довжина проростків, мм
Контроль	20	59	87	28,4
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	10	70	88	28,5
<i>Trichoderma lignorum</i>	20	73	89	29,8
<i>Trichoderma virens</i>	20	65	92	31,2
Органо-мінеральне добриво	20	56	91	28,3
Суміш: <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Trichoderma lignorum</i> , <i>Trichoderma virens</i> , органо-мінеральне добриво	70	72	88	32,2
$HP_{0,05}$		2,1	1,5	1,2

проростків становила 29,8 мм, що на 1,4 мм більше порівняно з контролем і є статистично достовірною різницею. Одержані результати фіксують комплексний вплив препарату як на швидкість проростання насіння, так і на стимуляцію ростових процесів проростків.

У варіанті з передпосівною обробкою насіння препаратом *Trichoderma virens* енергія проростання сягала 65%, що було нижчим показником порівняно з іншими мікробіологічними препаратами, проте все-таки превалювало контроль на 6%. Водночас саме в цьому варіанті виявлено найвищу лабораторну схожість насіння — 92%, що на 5% перевищувало контрольне значення та істотно переважало НР_{0,05}. Крім того, довжина проростків досягала 31,2 мм, що на 2,8 мм більше порівняно з контролем і свідчить про виражений стимулювальний ефект препарату на початковий ріст проростків. Це може вказувати на здатність *Trichoderma virens* не лише покращувати життєздатність насіння, а й активізувати синтез ростових речовин, що сприяють подовженню проростків.

Застосування лише органо-мінерального добрива мало неоднозначний вплив на посівні якості насіння гісопу лікарського. Енергія проростання у цьому варіанті знизилася до 56%, що було на 3% менше порівняно з контролем, тоді як схожість насіння, навпаки, збільшилась до 91% і перевищувала контрольне значення на 4%. Довжина проростків залишалася практично на рівні контролю (28,3 мм). Отримані дані вказують на те, що органо-мінеральне добриво здебільшого впливало на кінцеву кількість пророслого насіння, але не забезпечувало стимуляції швидкості проростання та інтенсивності ростових процесів на ранніх етапах розвитку.

Найвираженіший позитивний ефект відзначено у варіанті з комплексним застосуванням суміші *Pseudomonas fluorescens*, *Trichoderma lignorum*, *Trichoderma virens* та органо-мінерального добрива. У цьому варіанті середня довжина проростків досягла 32,2 мм, що на 3,8 мм перевищувало контрольний показник і було статистично до-

стовірним. Енергія проростання становила 72%, а лабораторна схожість — 88%, що доводить про позитивний, хоча й помірний вплив комплексу препаратів на кількісні показники проростання. Водночас істотне збільшення довжини проростків вказує на синергічну дію компонентів суміші, спрямовану передусім на стимулювання інтенсивності початкового росту та формування більш життєздатних проростків.

Тому, результати досліджень підтверджують доцільність використання мікробіологічних препаратів, особливо на основі *Trichoderma* spp., а також їх комплексного поєднання з органо-мінеральним добривом для покращання посівних якостей насіння гісопу лікарського та оптимізації початкових етапів росту рослин.

ВИСНОВКИ

У ході досліджень встановлено, що передпосівна обробка насіння гісопу лікарського біологічними препаратами сприяє підвищенню енергії проростання, схожості та інтенсивності початкового росту проростків порівняно з контролем. Найбільш виражений вплив на енергію проростання виявив препарат на основі *Trichoderma lignorum*, тоді як *Trichoderma virens* гарантував максимальні показники схожості насіння та стимулював інтенсивність росту проростків. Препарат *Pseudomonas fluorescens* мав помірну стимулювальну дію, а застосування лише органо-мінерального добрива характеризувалося обмеженим ефектом, переважно щодо схожості насіння.

Комплексне внесення мікробіологічних препаратів у поєднанні з органо-мінеральним добривом забезпечувало найвищу інтенсивність початкового росту проростків, що свідчить про синергічний характер їх дії. Отримані результати підтверджують доцільність використання біологічних препаратів у системі передпосівної підготовки насіння гісопу лікарського та можуть слугувати науковим підґрунтям для впровадження екологічно безпечних і ефективних технологій вирощування цієї лікарської культури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Голодна, А. В., & Грицюк, Я. В. (2024). Фотосинтетична продуктивність посіву сої (*Glycine max* L.) за різних систем удобрення та передпосівного оброблення насіння. *Агроекологічний журнал*, 2, 133–142. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305672>.
2. Gutiérrez-Moreno, K., Olgún-Martínez, A. I., Montoya-Martínez, A. C., & de los Santos-Villalobos, S. (2025). *Trichoderma* in sustainable agriculture and the challenges related to its effectiveness. *Diversity*, 17(10), 734. DOI: <https://doi.org/10.3390/d17100734>.
3. Мосійчук, І. І., Безноско, І. В., Туровнік, Ю. А., & Мудрак, В. О. (2022). Вплив біологічних препаратів на посівну якість насіння рослин ячменю ярого (*Hordeum Vulgare* L.). *Збалансоване природо-користування*, 3, 133–143. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2022.266566>.
4. Гаврилюк, Л. В., Кічигіна, О. О., & Туровнік, Ю. А. (2022). Біопрепарати як агроекологічний фактор підвищення біобезпеки в агроценозах. *Збалансоване природокористування*, 4, 105–111. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2022.275037>.
5. Szparaga, A., Czerwińska, E., Kapusta, I., Piepiórka-Stepuk, J., Zagała, G., Szparaga, L., ... Deszcz, E. (2024). The insights into the activity of the extracts from *Polygonum aviculare* L. and *Pseudomonas fluorescens* for enhancing and modeling seed germination and seedling growth of *Melilotus officinalis* L. Lam. *South African Journal of Botany*, 174, 510–524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.09.028>.
6. Ferreira, F. V., & Musumeci, M. A. (2021). *Trichoderma* as biological control agent: Scope and prospects to improve efficacy. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(5), 90. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03058-7>.
7. Hermosa, R., Viterbo, A., Chet, I., & Monte, E. (2012). Plant-beneficial effects of *Trichoderma* and of its genes. *Microbiology*, 158(1), 17–25. DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.052274-0>.
8. Woo, S. L., Hermosa, R., Lorito, M., & Monte, E. (2023). *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, 21(5), 312–326. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00819-5>.
9. Li, W. C., Lin, T. C., Chen, C. L., Liu, H. C., Lin, H. N., Chao, J. L., ... Wang, T. F. (2021). Complete genome sequences and genome-wide characterization of *Trichoderma* biocontrol agents provide new insights into their evolution and variation in genome organization, sexual development, and fungal-plant interactions. *Microbiology spectrum*, 9(3), e00663-21. DOI: <https://doi.org/10.1128/Spectrum.00663-21>.
10. Добровольський, П. А. (2021). Параметри продуктивності гісопу лікарського за вирощування в умовах Південного Степу України. *Таврійський науковий вісник. Сер.: Сільськогосподарські науки*, 120, 36–42. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.120.5>.
11. Ткачова, Е. С., & Федорчук, М. І. (2021). Урожайність гісопу лікарського залежно від площі живлення рослин. *Лікарське рослинництво: від досвіду минулого до новітніх технологій: матеріали 9-ї Міжнар. наук.-практ. конф.* (с. 71–72). Полтава. РВВ ПДАА. DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.5541344>.
12. Ткачова, Е. С., & Федорчук, М. І. (2019). Особливості вирощування гісопу лікарського (*Hyssopus officinalis* L.) в умовах змін клімату. *Інтродукція рослин: сучасний стан, проблеми та перспективи: матеріали Міжнар. наук. конф.* (с. 58–63). Харків. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua>.
13. Moro, A., Zalacain, A., de Mendoza, J. H., & Carmona, M. (2011). Effects of agronomic practices on volatile composition of *Hyssopus officinalis* L. essential oils. *Molecules*, 16(5), 4131–4139. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules16054131>.
14. Fathiazad, F., & Hamedeyazdan, S. (2011). A review on *Hyssopus officinalis* L.: Composition and biological activities. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 5(17), 1959–1966. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJPP11.527>.
15. Naeemi, M., Gholamalipour Alamdari, E., & Mousavi, A. S. (2025). The effect of chitosan bio-stimulator on morphological and physiological characteristics of hyssop under salinity stress. *Journal of Plant Process and Function*, 14(68), 33–46. DOI: <https://doi.org/10.22034/14.68.33>.
16. Mijani, S., Nasrabadi, S. E., Zarghani, H., & Abadi, M. G. (2013). Seed germination and early growth responses of hyssop, sweet basil and oregano to temperature levels. *Notulae Scientia Biologicae*, 5(4), 462–467. DOI: <https://doi.org/10.15835/nsb549164>.
17. Karimian, D. (2011). Seedling vigour variations in Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) by hydropriming method. *Research Journal of Fisheries and Hydrobiology*, 6(4), 499–502. URL: <https://www.cabidigital-library.org/>.
18. Barzgar, A. B. (2006, August). The effects of some environmental stresses on the stimulation of germination of hyssop (*Hyssopus officinalis*). In *XXVII International Horticultural Congress-IHC2006: International Symposium on Seed Enhancement and Seedling Production*, 771 (pp. 51–54). DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.771.6>.
19. Shadkam, B., Gharineh, M. H., Lotfi Jalalabadi, A., & Mousavi, S. A. (2023). Investigating the effects of nano and micro iron chelate to alleviate salinity stress damages at hyssop (*Hyssopus officinalis*) germination and seedling stages. *Iranian Journal of Seed Research*, 10(1), 125–144. DOI: <https://doi.org/10.61186/yujis.10.1.125>.
20. Yadav, R. S., Mandal, D., & Shukla, A. C. (2018). Fungal diseases of medicinal and aromatic plants and their biological management. In *Sustainable Horticulture*, 2 (pp. 291–312). Apple Academic Press. URL: <https://www.taylorfrancis.com/>.
21. David, B. V., Chandrasehar, G., & Selvam, P. N. (2018). *Pseudomonas fluorescens*: a plant-growth-promoting rhizobacterium (PGPR) with potential role in biocontrol of pests of crops. In *Crop improve-*

- ment through microbial biotechnology* (pp. 221–243). DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63987-5.00010-4>.
22. Fazeli-Nasab, B., Sayyed, R. Z., Piri, R., & Rahmani, A. F. (2021). Biopriming and nanoprimering: green revolution wings to increase plant yield, growth, and development under stress condition and forward dimensions. In *Antioxidants in plant-microbe interaction* (pp. 623–655). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-1350-0_29.
 23. Гаврилюк, М. М. (2004). *Основи сучасного насінництва*. Київ: ННЦ ІАЕ.
 24. Каленська, С. М., Новицька, Н. В., Жемойда, В. Л., Качура, Є. В., Макрушин, М. М., Полішук, І. С., ... Остренко, М. В. (2013). *Насіннєзнавство та методи вивчення якості насіння сільськогосподарських культур: підруч.* Вінниця: ТОВ «Нілан ЛТД».
 25. Макрушин, М. М., & Макрушина, Є. М. (2011). *Насінництво: підруч.* Сімферополь: ВД «Аріал».
 26. ДСТУ 3657-97. Насіння ефіроолійних культур: Метод визначення схожості. (1997). [Чинний від 1999-07-01]. Київ: Держстандарт України.
 27. ДСТУ 7160:2020. Насіння овочевих, баштанних, кормових і пряно-ароматичних культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. (2020). [Чинний від 2021-09-01]. Київ: Держстандарт України.
 28. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. (2002). [Чинний від 2004-01-01]. Київ: Держстандарт України.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 29.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.01.2026
Дата публікації: 27.02.2026

ТЕНДЕНЦІЇ ФОРМУВАННЯ ГІБРИДНОГО СКЛАДУ КУКУРУДЗИ ЗВИЧАЙНОЇ В УКРАЇНІ

О.О. Кічігіна¹, Ю.А. Цибро¹, С.М. Михайлик², І.В. Смульська²

¹Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: seednlen@ukr.net; ORCID: 0000-0003-0879-627X
e-mail: u.cubro@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7775-9283

²Український інститут експертизи сортів рослин (м. Київ, Україна)
e-mail: svetlana.nik2519@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9981-0545
e-mail: ivanna1973@i.ua; ORCID: 0000-0001-9675-0620

Проаналізовано тенденції формування гібридного складу кукурудзи звичайної (*Zea mays L.*) в Україні за даними Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні. Встановлено загальну кількість зареєстрованих гібридів станом на 31.12.2025 р., досліджено, як змінювався їх кількісний склад та динаміка його формування з 2005 по 2025 рр., визначено співвідношення гібридів української та зарубіжної селекції у забезпеченні вітчизняного ринку насіння кукурудзи звичайної, проаналізовано гібридний склад культури за такими показниками, як рекомендована зона вирощування, напрям використання, група стиглості. Визначено, що станом на 31.12.2025 р. Реєстр сортів налічує 1223 гібриди, що на 932 од. більше, ніж у 2005 р. (291 гібрид). Максимальне значення за період досліджень зафіксовано у 2024 р. — 1547 гібридів. Динаміка формування гібридних ресурсів упродовж 2005–2025 рр. характеризується поетапним зростанням із найінтенсивнішим поповненням у 2019–2023 рр. (від 107 до 208 гібридів щорічно). Найбільшу кількість нових реєстрацій зафіксовано в 2023 р. — 208 гібридів. Станом на кінець 2025 р. частка гібридів іноземної селекції становить 58% (710 од.), вітчизняної — 42% (513 од.). За країнами походження провідні позиції належать Франції (432 гібриди) та Україні (340), сумарна частка яких становить 63% від загальної кількості. У розподілі за зонами вирощування найбільшу групу — 360 од. (33%) мають гібриди, рекомендовані для всіх трьох ґрунтово-кліматичних зон — Степ, Лісостеп, Полісся, що свідчить про їх високу екологічну пластичність. За напрямом використання переважають гібриди зернового типу. За групами стиглості у структурі домінують середньоранні — 47% (ФАО 200–299) та середньостиглі гібриди — 39% (ФАО 300–399), які найбільш повно відповідають агрокліматичним умовам України. Отримані результати підтверджують формування потужного та різноманітного гібридного складу кукурудзи звичайної, що характеризується стійкою тенденцією до зростання та адаптацією до сучасних виробничих викликів.

Ключові слова: *Zea mays L.*, гібриди, зона вирощування, країна походження гібриду, напрям використання, група стиглості, ФАО.

ВСТУП

Кукурудза традиційно є однією з базових культур у структурі рослинництва України, та входить до числа основних, що формують продовольчий баланс завдяки широкому спектру використання. Її зерно є сировиною для харчової промисловості, та використовується для виробництва крупи, олій, борошна, харчових концентратів. Кукурудза відіграє важливе значення для забезпечення кормової бази тваринництва

та є сировиною для переробної промисловості [1; 2].

Урожайність зерна кукурудзи перевищує всі зернові, тож культура є однією з найбільш економічно привабливих [1; 3]. А поряд із пшеницею та соняшником — є однією з провідних за площею вирощування зернових культур в Україні [3]. За даними Державної служби статистики України, до повномасштабного вторгнення РФ, упродовж 2014–2021 рр. площі під кукурудзою в Україні мали тенденцію до зростання. Впродовж 2020–2021 рр. за-

© О.О. Кічігіна, Ю.А. Цибро, С.М. Михайлик,
І.В. Смульська, 2026

гальна площа під кукурудзою становила приблизно 5,4–5,5 млн га [5]. Це були одні з найвищих показників за останнє десятиліття, що відображало розширення площ під кукурудзою завдяки економічним стимулам, розширенню експортних можливостей і сприятливим ґрунтово-кліматичним умовам.

У 2022 р., в умовах повномасштабної війни, площі під кукурудзою істотно скоротилися — приблизно до 4,2 млн га. За 2023–2025 рр. площі посівів кукурудзи в Україні стабілізувалися приблизно на рівні 4,0–4,1 млн га щороку [5].

За даними аграрних джерел, у 2025 р. весняні роботи з посіву кукурудзи здійснювалися в 13 областях України, що свідчить про широку географію її вирощування по всій країні. Найбільші посівні площі були зосереджені у Полтавській обл. — близько 455,1 тис. га, Чернігівській — близько 412,3 тис. га, Сумській — понад 328 тис. га, Черкаській та Вінницькій обл. — понад 300 тис. га у кожній [6].

Не зважаючи на скорочення посівних площ, збір урожаю зерна кукурудзи в Україні залишається високим. За даними Міністерства аграрної політики та продовольства України станом на грудень 2025 р. зібрано 23,5 млн т зерна, тоді як загальний обсяг виробництва цієї культури в ЄС становить 57 млн т, що робить Україну абсолютним лідером у виробництві кукурудзи в Європі [7].

Слід зазначити, що у 2021/2022 маркетинговому році (далі — МР) Україна виробляла 42,1 млн т зерна кукурудзи та займала п'яте місце серед світових виробників після таких країн, як США, Китай, Бразилія та Аргентина.

В 2022/2023 МР Україна втратила свої позиції і перемістилась на восьме місце у рейтингу світових країн із показником виробництва близько 30,5 млн т, що свідчить про часткове відновлення галузі після різкого скорочення у 2022 р. Однак відновити свої позиції Україні не вдалося, і вона посідає 7–8 місце у рейтингу світових країн за показником виробництва зерна кукурудзи [8].

До початку повномасштабної війни Україна стабільно займала четверте місце у світі за обсягами експорту зерна кукурудзи, забезпечуючи продовольчу безпеку багатьох країн. У довоєнний період (2018/19–2021/22 МР) середній експорт становив ≈ 27 –30 млн т/рік. З початком повномасштабного воєнного вторгнення 2022 р. через блокаду морських портів, руйнування логістичної інфраструктури, зростання собівартості транспортування експорт зазнав різкого скорочення (на 20–25%). Так, у 2022/2023 МР він становив близько 16,7 млн т, у 2023/2024 МР — 22,3 млн т, із прогнозом на 2024/2025 МР на рівні 21–23 млн т. Порівняно з 2022 р. експортні позиції України знизилися до п'ятого-шостого місця, однак країна зберігає статус одного з ключових глобальних експортерів цієї культури [8].

Тому попри всі ризики, обумовлені війною, Україна продовжує посідати провідні позиції серед світових виробників кукурудзи, забезпечуючи стабільні поставки зерна на міжнародні ринки та відіграючи важливу роль у підтриманні глобальної продовольчої безпеки. Однак в умовах воєнного стану аграрне виробництво зазнало істотних трансформацій, зокрема через втрату або обмеження доступу до частини посівних площ, порушення логістичних ланцюгів, дефіцит матеріально-технічних ресурсів і зростання виробничих ризиків, що актуалізує необхідність підвищення ефективності використання наявного виробничого потенціалу.

За таких умов особливого значення набуває забезпечення стабільного виробництва кукурудзи шляхом раціонального використання потенціалу сортового/гібридного складу, адаптованого до різних ґрунтово-кліматичних зон України та стресових чинників сучасного періоду.

Тому **метою роботи** було дослідити тенденції формування та структуру гібридного складу кукурудзи звичайної в Україні шляхом його аналізу за такими основними показниками, як рекомендована зона вирощування, напрям використання, група стиглості, а також з'ясувати співвідношення

гібридів української та зарубіжної селекції у забезпеченні вітчизняного ринку насіння кукурудзи.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Кукурудза звичайна є однією з основних зернових культур в Україні, що забезпечує продовольчу безпеку та експортний потенціал [3; 4]. В умовах сьогодення, коли в реаліях воєнного стану аграрне виробництво України зазнає істотних трансформацій, пошук нових шляхів отримання стабільних високих урожаїв цієї культури набуває особливої актуальності. Вирішенню цих та інших питань, пов'язаних з виробництвом та експортом зерна кукурудзи, присвячено низку робіт вітчизняних учених. Так, дослідженню технологічних питань вирощування, а саме ролі науково обґрунтованої сівозміни та системи удобрення, як чинників, що забезпечують високу продуктивність кукурудзи присвячені роботи І.В. Саверин та О.Й. Качмар [9], О.П. Волощук із співавт. [10], В.Ф. Камінського та Н.М. Асанішвілі [11].

Одним із ключових чинників збільшення врожайності та якості зерна кукурудзи є ефективне використання генетичних можливостей сортів/гібридів [10]. Про важливість добору гібридів кукурудзи звичайної різних груп стиглості з високим потенціалом врожайності та підвищеною адаптивністю до несприятливих абіотичних чинників певної зони вирощування з метою підвищення рівня ефективності сільськогосподарського виробництва зазначають О.Я. Ревтьо та І.О. Арсірій [12].

У низці публікацій науковців І.І. Мостов'як, О.С. Дем'янюк, А.І. Парфенюк, І.І. Гуменюк та ін. [13; 14], розкривається роль сорту/гібриду зернових культур, як одного з визначальних чинників формування стійких агроценозів та ефективних і стійких продовольчих систем.

Науковцями С.О. Ткачик та С.І. Мельник із співавт. [15] визначена ключова роль сортових ресурсів зернових культур у підвищенні продовольчої безпеки, адаптації агросистем до сучасних викликів,

зменшенні екологічного навантаження на довкілля та у сприянні досягнення низки Цілей сталого розвитку, зокрема: Ціль 2 «Подолання голоду», Ціль 8 «Гідна праця та економічне зростання», Ціль 12 «Відповідальне споживання та виробництво», Ціль 13 «Боротьба зі зміною клімату», Ціль 15 «Збереження екосистем суші».

У працях І.С. Процик, А.О. Безе та О. Лотиш [16; 17] здійснено аналіз сучасних тенденцій розвитку світового зернового ринку та встановлено, що Україна й надалі зберігає вагомі позиції у глобальних рейтингах за обсягами виробництва й експорту зернових культур, зокрема кукурудзи. Дослідження Г.Д. Матусевич із співавт. [3] підтверджують, що кукурудза поряд із пшеницею та соняшником належить до ключових експортних культур держави. Отже, попри виклики війни, Україна продовжує утримувати статус одного з провідних світових експортерів зерна кукурудзи. Водночас відповідність сортів і гібридів сільськогосподарських культур міжнародним вимогам забезпечується функціонуванням Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні (далі – Реєстр сортів), а позитивна динаміка подання заявок до Реєстру сортів навіть в умовах воєнного стану свідчить про стійкість і адаптивність аграрного сектору держави [3; 18].

Тому Реєстр сортів постійно оновлюється та поповнюється новими сортами/гібридами, у т. ч. кукурудзи звичайної. Нині він включає понад 1000 гібридів цієї культури. Тому детальний аналіз сучасної структури гібридного складу кукурудзи звичайної в Україні є актуальним питанням, результати якого можуть слугувати корисним матеріалом для практичного застосування в роботі українських аграріїв-виробників.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основним матеріалом для досліджень слугував Державний реєстр сортів рослин. Для обґрунтування актуальності досліджень використані дані Державної служби статистики України, Міністерства аграрної

політики та продовольства України, наукові електронні джерела інформації комп'ютерної мережі Інтернет, сучасні наукові джерела та особисті спостереження. У процесі роботи застосовували загальноприйняті наукові методи, зокрема аналізу, порівняльного оцінювання та синтезу, абстрактно-логічний метод та ін. Також була проведена графічна інтерпретація даних.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для досягнення поставленої мети нами було проаналізовано гібридний склад кукурудзи звичайної (*Zea mays* L.) за даними Реєстру сортів станом на 31.12.2025 р. [19], який є важливим елементом державного регулювання в галузі насінництва та розсадництва, що забезпечує законність, якість і стабільний розвиток ринку насіння в Україні.

У ході досліджень встановлено загальну кількість зареєстрованих гібридів кукурудзи звичайної, простежено, як змінювався кількісний склад та динаміка формування її ресурсів з 2005 по 2025 рр., визначено співвідношення гібридів української та зарубіжної селекції у забезпеченні вітчизня-

ного ринку насіння кукурудзи звичайної, проаналізовано гібридний склад культури за такими показниками, як рекомендована зона вирощування, напрям використання, група стиглості.

На *рис. 1* представлено, як змінювався у Реєстрі сортів кількісний склад гібридів кукурудзи звичайної впродовж 2005–2025 рр.

Так, у 2005 р. налічувалась найменша їх кількість – 291 гібрид, з них 164 – вітчизняної та 127 – іноземної селекції. Найбільша кількість була зафіксована в 2024 р. – 1547 гібридів, із них 850 становили гібриди іноземної та – 697 вітчизняної селекції. Майже впродовж усього періоду досліджень кількість гібридів кукурудзи звичайної у Реєстрі сортів із року в рік збільшувалась. Винятком стали 2007 р., 2016 та 2025 р., в які Реєстр рослин налічував 320, 1054 та 1223 гібриди, що на 39, 37 та 324 гібриди менше ніж у попередні 2006, 2015 і 2024 р., коли їх кількість становила – 356, 1091 та 1547 відповідно. Слід відмітити, 2015 р., ще й як рекордний упродовж усього періоду досліджень за збільшенням кількості гібридів порівняно з попереднім 2014 р. Так, у 2015 р. Реєстр сортів налічував 1091 гібридів кукурудзи звичайної,

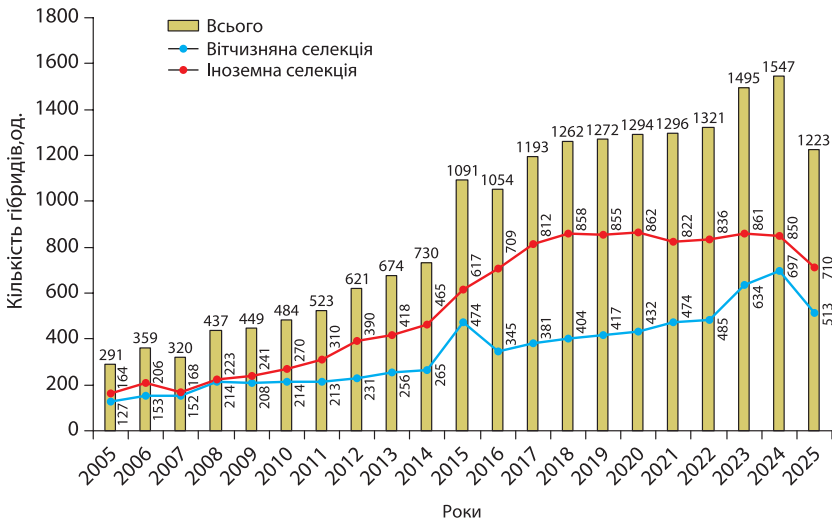


Рис. 1. Кількісний склад гібридів кукурудзи звичайної за даними Реєстру сортів (2005–2025 рр.)

з них 474 — вітчизняної та 617 іноземної селекції. Тоді, як у 2014 р. їх загальна кількість становила 730, з них 265 — вітчизняної та 465 іноземної селекції. Тож за рік, з 2014 по 2015 рр. загальна кількість гібридів у Реєстрі сортів збільшилась на 361, вітчизняної та зарубіжної селекції на 209 та 152 гібриди відповідно. Загалом, упродовж 2005–2025 рр. кількісний склад кукурудзи звичайної у Реєстрі сортів збільшився на 932 гібриди, а кількість гібридів вітчизняної та іноземної селекції зросла відповідно на 349 і 583. Станом на 31.12.2025 р.

у Реєстрі сортів налічується 1223 гібриди, з них 513 гібридів вітчизняної та 710 — іноземної селекції.

Аналіз динаміки формування гібридного складу кукурудзи звичайної за 2005–2025 рр. свідчить про поступове поетапне збільшення кількості зареєстрованих гібридів (рис. 2 а, б).

Впродовж 2005–2008 рр. обсяги реєстрації були мінімальними. Загальна кількість зареєстрованих гібридів коливалася від двох до дев'яти. Кількість гібридів вітчизняної селекції була у межах від одного

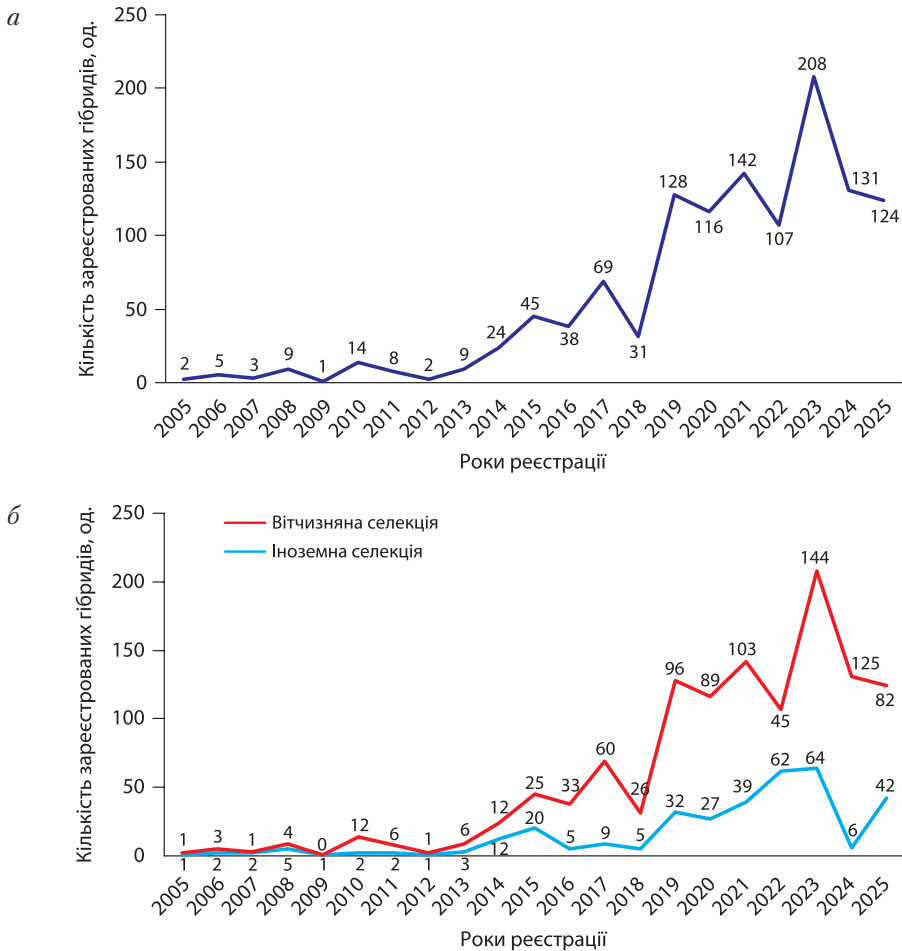


Рис. 2. Динаміка формування гібридного складу кукурудзи звичайної за даними Реєстру сортів (2005–2025 рр.):

а — загальна кількість зареєстрованих гібридів кукурудзи звичайної; б — кількість зареєстрованих гібридів кукурудзи звичайної вітчизняної та іноземної селекції

до п'яти, іноземної — від одного до чотирьох на рік. У 2009 р. реєстрація іноземних гібридів тимчасово була відсутня (0), а вітчизняних зареєстровано лише один. Період 2010–2013 рр. характеризувався незначним збільшенням надходження до Реєстру сортів нових гібридів кукурудзи звичайної — від двох до 14 на рік. Кількість вітчизняних гібридів становила один — три, іноземних — один–12 на рік. Починаючи з 2014 р., обсяги зареєстрованих гібридів починають істотно збільшуватись. Так, у 2014 р. зареєстровано 24 гібриди, по 12 вітчизняної та іноземної селекції. У період 2015 — 2018 рр. щорічна кількість зареєстрованих гібридів була у межах від 31 до 69. Найменша їх кількість відмічена в 2018 р. — 31 гібрид, із яких вітчизняних — п'ять та іноземних — 26. Найбільшу кількість за цей період зареєстровано в 2017 р. — 69 гібридів, з яких дев'ять вітчизняних та 60 іноземних. У 2015 та 2016 рр. зареєстровано 45 та 38 гібридів, з яких вітчизняної селекції 20 та п'ять, а іноземної — 25 та 33 відповідно.

Найбільш виражене поповнення Реєстру сортів новими гібридами кукурудзи звичайної спостерігається у 2019–2023 р., де їх

загальна кількість була у межах від 107 до 208. Найменша їх кількість зафіксована в 2022 р. — 107 гібридів, вітчизняної — 62, іноземної селекції — 45. У 2023 р. найбільша кількість зареєстрованих гібридів за весь період спостережень — 208 од., з яких 64 — вітчизняної та 144 іноземної селекції. Впродовж 2019 та 2020 рр. до Реєстру сортів надійшло 128 та 116 гібридів, із яких вітчизняної 32 та 27, а іноземних 96 і 89 відповідно. В 2024 р. зареєстровано 131 гібрид, із яких 125 іноземних, та спостерігається різке скорочення кількості зареєстрованих вітчизняних гібридів (6 од.), що може бути зумовлено впливом воєнно-економічних чинників у країні. У 2025 р. спостерігається часткове відновлення активності надходження вітчизняних гібридів до Реєстру сортів, їх кількість становить 42 од., тоді як іноземних — 82, за загальної кількості — 124 гібриди (див. *рис. 2, а, 2, б*).

Отже, впродовж 2005–2025 рр. спостерігається тенденція до зростання кількості зареєстрованих гібридів кукурудзи звичайної, з перевагою іноземної селекції. Станом на 31.12.2025 р. Реєстр сортів налічує 513 гібридів вітчизняної та 710 — іноземної селекції що становить 42 і 58% від їх загальної кількості (*рис. 3*).

Домінування іноземної селекції, свідчить про високу конкуренцію на внутрішньому ринку насіння та значну інтеграцію України у міжнародний селекційний простір. Водночас позитивна динаміка в окремі роки підтверджує потенціал національної селекційної школи до адаптації та розвитку навіть у умовах нестабільності.

Провідними вітчизняними центрами з питань селекції кукурудзи є установи Національної академії аграрних наук України, зокрема: Інститут зернових культур НААН, Селекційно-генетичний інститут — Національний центр насіннезнавства та сортовивчення, ННЦ «ІЗ НААН», Інститут рослинництва імені В.Я. Юр'єва НААН та ін.

Іноземна селекція представлена такими основними компаніями, як Bayer Crop Science (Німеччина/США), Corteva Agriscience (США), Syngenta Seeds (Швейцар-

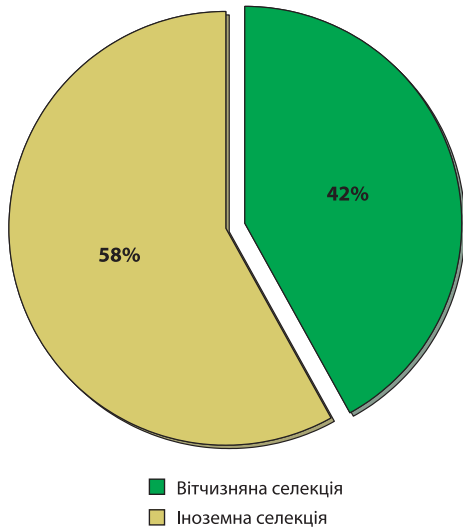


Рис. 3. Частка гібридів кукурудзи звичайної вітчизняної та іноземної селекції, % за даними Реєстру сортів станом на 31.12.2025 р.

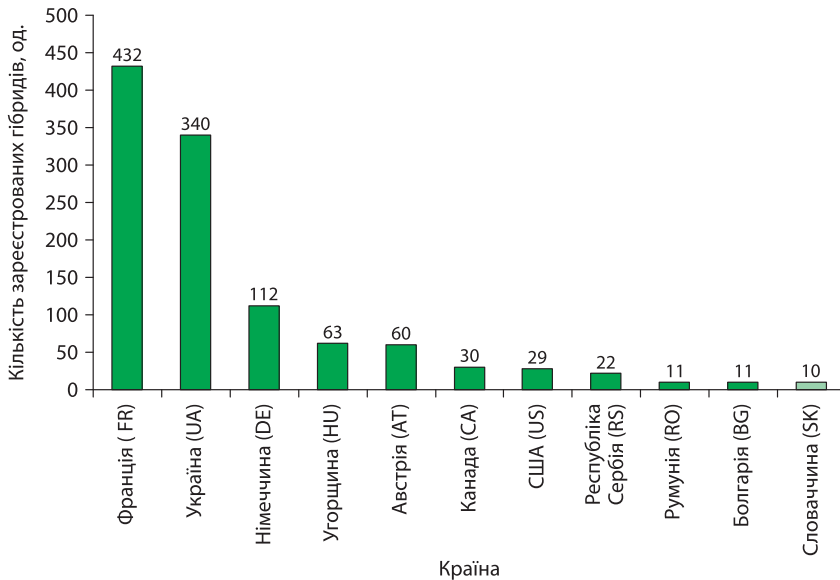


Рис. 4. Структура гібридів кукурудзи звичайної за основними країнами походження за даними Реєстру сортів станом на 31.12.2025 р.

рія), Limagrain Group (Франція), KWS SAAT SE (Німеччина) та ін.

На рис. 4 наведено розподіл гібридів кукурудзи звичайної за основними країнами походження.

Провідну позицію за кількістю зареєстрованих гібридів займає Франція – 432 одиниці, або 38,2% від загальної кількості зареєстрованих, що становить 1223 гібрида. Українська селекція представлена 340 гібридами (27,8%), що свідчить про високий потенціал та конкурентоспроможність вітчизняної селекції. Істотна кількість припадає на гібриди таких країн, як Німеччина, Угорщина та Австрія – 112 (9%), 63 (5,2%) та 60 гібридів (5%) відповідно. Помірною та майже однаковою кількістю представлена Канада та США – 30 і 29 гібридів, що становить 2,5 та 2,3% відповідно. Сербія представлена 22 гібридами, що становить 1,8%. Румунія та Болгарія мають по 11 гібридів, Словаччина – 10, до того ж частка гібридів кожної з цих країн становить менше одного відсотка від загальної кількості зареєстрованих.

Отже, у структурі гібридів кукурудзи звичайної за країнами походження ліде-

рами є Франція (432) та Україна (340), а їх загальна частка – 63% становить дві третини від 1223 зареєстрованих. Водночас вагома частка українських гібридів свідчить про наявність конкурентоспроможної вітчизняної селекційної школи, яка здатна забезпечувати потреби внутрішнього ринку та підтримувати селекційну незалежність держави.

На рис. 5 наведено розподіл гібридів кукурудзи звичайної за зонами вирощування.

Найбільша кількість – 360 гібридів, або 33% від загальної їх кількості у Реєстрі сортів, рекомендовані для вирощування в усіх трьох зонах – Степ, Лісостеп та Полісся, що свідчить про їх широкую екологічну пластичність. Виключно для умов Степу рекомендованими є 173 гібриди (16%). Така сама кількість – 173 гібриди (16%) – придатна для вирощування у двох зонах: Степу та Лісостепу. Придатними для вирощування у зоні Лісостепу є 137, або 12%, для умов Степу та Полісся – 112, або 10% гібридів кукурудзи звичайної. Для 76, або 7% гібридів рекомендованою зоною вирощування є Полісся. Найменшу частку станов-



Рис. 5. Кількість гібридів кукурудзи звичайної за рекомендованими зонами вирощування, % (дані Реєстру сортів станом на 31.12.2025 р.)

лять, рекомендовані для вирощування в зоні Лісостепу та Полісся — 67 гібридів, або 6% від загальної кількості зареєстрованих. Отже, вирощування кукурудзи звичайної в Україні відбувається з урахуванням специфіки трьох основних ґрунтово-кліматичних зон — Степу, Лісостепу та Полісся, що визначає використання відповідних гібридів.

Серед гібридів кукурудзи звичайної, занесених до Реєстру сортів, переважає зерновий напрям використання. Залежно від тривалості періоду вегетації, гібриди кукурудзи поділяють на групи стиглості

за ФАО — індексом, який вказує на період від сходів до повної (фізіологічної) стиглості зерна та пов'язаний із кількістю сформованих листків на рослині. В Україні виділяють 7 груп стиглості (ФАО від 100 до 600 і більше) — від дуже ранніх (тривалість вегетації до 90 діб) до дуже пізніх (понад 150 діб), проте, дуже пізні гібриди у Реєстрі сортів не представлені.

На рис. 6 подано розподіл гібридів кукурудзи звичайної за тривалістю періоду вегетації.

У 2025 р. у структурі гібридів кукурудзи звичайної в Реєстрі сортів переважають середньорання — 47% (ФАО 200–299) та середньостигла — 39% (ФАО 300–399) групи. Частка дуже ранніх (ФАО 100–149) і пізньостиглих (ФАО 500–599) гібридів не значна та становить <1% та 1%, відповідно. Гібриди ранньої (ФАО 150–200) та середньопізньої (ФАО 400–499) групи представлені у Реєстрі сортів по 6% відповідно.

Отже, у структурі гібридів кукурудзи звичайної в Реєстрі сортів 2025 р. переважають середньоранні та середньостиглі гібриди, що відповідає потребам основних зон вирощування України.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано тенденції формування гібридного складу кукурудзи звичайної

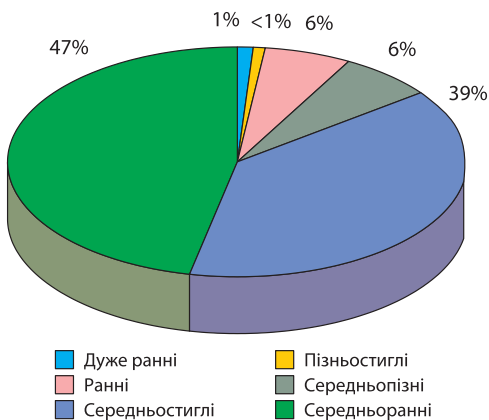


Рис. 6. Розподіл гібридів кукурудзи звичайної за тривалістю періоду вегетації, % (дані Реєстру сортів станом на 31.12.2025 р.)

(*Zea mays* L.) в Україні за період з 2005 по 2025 р. Визначено, що станом на 31.12.2025 р. Реєстр сортів налічує 1223 гібриди, що на 932 од. більше, ніж у 2005 р. (291 гібрид). Максимальне значення за період досліджень зафіксовано у 2024 р. — 1547 гібридів.

Динаміка формування гібридного складу у 2005–2025 рр. характеризується поетапним зростанням із найбільш інтенсивним поповненням у 2019–2023 рр. (107–208 гібридів щороку). Найбільшу кількість нових реєстрацій відзначено у 2023 р. — 208 гібридів.

Станом на кінець 2025 р. у структурі Реєстру сортів переважають гібриди іноземної селекції — 58% (710 од.), тоді як частка вітчизняних становить 42% (513 од.). За країнами походження провідні позиції посідають Франція (432 гібриди) та Україна (340 гібридів), які разом формують 63% загальної кількості зареєстрованих гібридів.

У розподілі за зонами вирощування найбільшу частку — 360 од. (33%) становлять гібриди, рекомендовані для вирощування в усіх трьох ґрунтово-кліматичних зонах (Степ, Лісостеп, Полісся), що свідчить про їхню високу екологічну пластичність і широкую адаптивність. За напрямом використання домінують гібриди зернового типу. У структурі за групами стиглості переважають середньоранні (ФАО 200–299 — 47%) та середньостиглі (ФАО 300–399 — 39%) форми, які найбільш повно відповідають агрокліматичним умовам України.

Отже, впродовж 2005–2025 рр. в Україні сформовано потужний і структурно збалансований гібридний склад кукурудзи звичайної, який характеризується стійкою тенденцією до зростання, широкою адаптивністю, поєднанням досягнень вітчизняної і зарубіжної селекції та орієнтацією на сучасні потреби аграрного виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чому кукурудза є однією з найважливіших сільськогосподарських культур України? URL: https://zhzh.info/publ/76-1-0-27772?utm_source=chatgpt.com
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). URL: <http://www.fao.org>.
3. Дем'янюк, О. С., Матусевич, Г. Д., Мазур, С. О., Шацман, Д. О., Бухтик, С. С., & Посунько, А. О. (2023). Пшениця, кукурудза та соняшник — основні культури українського експорту. *Землеробство та рослинництво: теорія і практика*, 4(10), 41–50. DOI: <https://doi.org/10.54651/agri.2023.04.05>
4. Василішин, С. І., Винограденко, С. О., & Дьяконов, С. О. (2022). Потенціал виробництва кукурудзи на зерно в контексті зміцнення продовольчої безпеки України та світу. *Таврійський науковий вісник. Економіка*, 12, 10–19. DOI: <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2022.12.2>.
5. Державна служба статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/4>.
6. Врожайність кукурудзи в Україні: топ-5 областей у сезоні 2025. URL: <https://latifundist.com/novosti/69206-vrozhajnist-kukurudzi-v-ukrayini-top-5-oblastej-u-sezoni-2025>.
7. Агровиробництво України у 2025 році: результати сезону та порівняння з ЄС. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/ahrovirobnytstvo-ukrainy-u-2025-rotsi-rezultaty-sezonu-ta-porivniannia-z-ies>.
8. Міністерство аграрної політики та продовольства України, Міністерства сільського господарства США (USDA). United States Department of Agriculture (USDA). URL: <https://www.usda.gov>.
9. Саверин, І. В., & Качмар, О. Й. (2023). Продуктивність кукурудзи за різних систем удобрення в короткоротаційних сівозмінах. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*, 73(2), 91–109. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2023-\(73\)-2-7](https://doi.org/10.32636/01308521.2023-(73)-2-7).
10. Волошук, О. П., Стасів, О. Ф., Глива, В. В., Герешко, Г. С., & Пашак, М. О. (2020). Продуктивність гібридів кукурудзи залежно від різних норм внесення мінеральних добрив у Західному Лісостепу України. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*, 68(1), 51–66. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2020-\(68\)-1-4](https://doi.org/10.32636/01308521.2020-(68)-1-4).
11. Камінський, В. Ф., & Асанішвілі, Н. М. (2020). Особливості росту і розвитку рослин кукурудзи в посівах та їх фотосинтетична діяльність залежно від технології вирощування в умовах Лісостепу. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*, 67(11), 92–1124. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2020-\(67\)-2-6](https://doi.org/10.32636/01308521.2020-(67)-2-6).
12. Ревтьо, О. Я., & Арсірій, І. О. (2024). Кукурудза: ефективні рішення для гарантованої рентабельності (оглядова). *Таврійський науковий вісник*, 135(2), 35–40. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.2.5>.
13. Мостов'як, І. І., Дем'янюк, О. С., Парфенюк, А. І., & Безноско, І. В. (2020). Сорт як фактор формування стійких агроценозів зернових культур. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 2, 110–118. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk.2020.02.13>.

14. Дем'янюк, О. С., Гуменюк, І. І., Левішко, А. С., Вакулєнко, С. О., & Полтава, О. П. (2022). Екологічні аспекти формування стійких продовольчих систем. *Збалансоване природокористування*, 4, 119–128. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2022.275863>.
15. Ткачик, С. О., Мельник, С. І., Захарчук, О. В., Дем'янюк, О. С., Дутова, Г. А., & Баліська, Л. М. (2025). Використання сортів і насіння зернових культур для досягнення Цілей сталого розвитку. *Збалансоване природокористування*, 3, 119–132. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2025.342528>.
16. Процик, І. С., & Безе, А. О. (2022). Світові тенденції розвитку ринку пшениці кукурудзи та визначення місця України в ньому. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*, 4(2), 414–426. DOI: <https://doi.org/10.23939/smeu2022.02.414>.
17. Лотиш, О. (2022). Роль України на світовому ринку зерна: виклики та загрози. *Економіка та суспільство*, 45. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-56>.
18. Орленко, Н. С., Мажуга, К. М., Орленко, О. Б., Маслечкін, В. В., & Сидорчук, А. І. (2025). Аналіз динаміки подання заявок до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні. *Plant Varieties Studying and protection*, 21(1), 4–11. DOI: <https://doi.org/10.21498/2518-1017.21.1.2025.327495>.
19. Міністерство аграрної політики та продовольства України. (2025). Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2025 рік. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=c5e26c83-ac95-43b8-8d53-a5f8f907099f&title=DerzhavniiRestrSortiv-PridatnikhDliaPoshirenniaVUkraini>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 17.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.12.2025
Дата публікації 27.02.2026

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЕКОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ І ЯКІСТЬ ЗЕРНА НОВИХ СОРТІВ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ ОЗИМОЇ

Г.А. Дутова, С.О. Ткачик, С.О. Ляшенко, А.М. Кирильчук

Український інститут експертизи сортів рослин (м. Київ, Україна)

e-mail: 2021dutova@gmail.com; ORCID: 0000-0002-7987-5840

e-mail: s-s-tk@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2402-079X

e-mail: 17041@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6371-230X

e-mail: angela.kyrylchuk@gmail.com; ORCID: 0000-0003-3948-5810

Урожайність і якість зерна пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.) значною мірою визначаються поєднанням генетичних особливостей сорту та ґрунтово-кліматичних умов вирощування. В умовах кліматичних змін особливої актуальності набуває оцінка адаптивності нових сортів у різних агроекологічних зонах України. Метою досліджень було встановити особливості формування урожайності та основних показників якості зерна нових сортів пшениці м'якої озимої залежно від ґрунтово-кліматичної зони вирощування. Польові дослідження проведено у 2022/23–2023/24 рр. у зоні Степу, Лісостепу та Полісся на 17 пунктах випробування Українського інституту експертизи сортів рослин. Об'єктом досліджень були 28 сортів вітчизняної та зарубіжної селекції. Урожайність сорту оцінювали шляхом порівняння з умовним стандартом, сформованим на основі середніх значень сортів, зареєстрованих у Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення в Україні, протягом попередніх п'яти років. Статистичну обробку даних здійснювали методами описової статистики з використанням показника найменшої істотної різниці ($HP_{0,05}$). У результаті досліджень встановлено, що найвищий рівень урожайності пшениці м'якої озимої формувався в умовах Лісостепу (у середньому 8,4–9,0 т/га), тоді як у Степу та Поліссі показники були нижчими. Усі досліджувані сорти забезпечили приріст урожайності порівняно з умовним стандартом. Найвищу та найстабільнішу продуктивність у різних зонах вирощування сформував сорт ДСВ 2129120. Аналіз якісних показників зерна показав чітко виражену зональну залежність: середній вміст білка та сирової клейковини зменшувався з півдня на північ. Найвищі показники якості зерна та їх відносну стабільність між зонами забезпечили сорти Хантер, Інвіктус і Білоцерківчанка. Отримані результати підтверджують визначальну роль ґрунтово-кліматичних умов у реалізації продуктивного потенціалу сортів пшениці м'якої озимої та свідчать про доцільність зонально орієнтованого добору сортів для підвищення ефективності виробництва зерна в Україні.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., урожайність, сортовипробування, білок та клейковина, адаптивність сортів, ґрунтово-кліматичні зони, селекційний потенціал.

ВСТУП

Пшениця м'яка озима (*Triticum aestivum* L.) залишається однією з провідних зернових культур України, визначаючи рівень продовольчої безпеки держави та експортний потенціал аграрного сектору. Формування стабільної продуктивності та високої якості зерна є пріоритетним напрямом сучасної селекції, особливо в умовах кліматичних змін, що зумовлюють істотні коливання температурного режиму й зво-

ложення в різних агрокліматичних зонах. Адаптація нових сортів до специфічних умов вирощування та підвищення їх пластичності та стабільності продуктивності є ключовими завданнями агроекологічних досліджень останніх років [1; 2].

Ґрунтово-кліматичні умови України, що охоплюють Полісся, Лісостеп і Степ, формують різноспрямований вплив на ріст, розвиток і якість зерна пшениці. Тому визначення реакції нових сортів пшениці озимої на варіювання умов середовища має важливе значення для зональної селекції

та впровадження адаптивних сортів у виробництво [3; 4]. Зростаюча аридизація клімату у південних регіонах України та зниження вологи у критичні фази розвитку культури потребують створення сортів із підвищеною посухостійкістю, екологічною стабільністю та збереженням високих показників якості зерна [5; 6].

Тому, аналіз сучасних наукових джерел свідчить, що дослідження сортів пшениці м'якої озимої в різних ґрунтово-кліматичних умовах України має як теоретичне, так і практичне значення. Залишається актуальним питання комплексної оцінки нових сортів за урожайністю та якісними показниками зерна з урахуванням регіональних особливостей та кліматичних викликів.

Метою дослідження було оцінити урожайність і показники якості зерна сортів пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.) різного генетичного походження залежно від зони вирощування з урахуванням взаємодії «генотип × середовище».

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

За результатами численних досліджень, продуктивність пшениці озимої визначається комплексом генетичних, агротехнічних та екологічних чинників, серед яких ключовими є генотип сорту, погодні умови року, рівень агрофону та попередник [7; 8]. Сучасні сорти характеризуються значною диференціацією за врожайністю, що зумовлено як потенціалом генотипу, так і його реакцією на змінність умов середовища [9; 10].

Г.А. Дутова та ін. [9] показали, що нові сорти пшениці м'якої озимої істотно відрізняються за показниками урожайності та якості зерна залежно від регіону вирощування. Аналогічні результати отримано А.М. Кирильчуком та ін. [10], які встановили значну пластичність окремих генотипів і виділили сорти з високою стабільністю продуктивності в різних ґрунтово-кліматичних умовах України.

А.В. Панфілова та М.М. Корхова [11] підкреслили, що в умовах Південного Степу визначальним чинником для реалізації

потенціалу сорту є рівень зволоження у період кушення та наливу зерна. О.В. Бараболя та Р.О. Яновський [12] також підтвердили, що у центральних регіонах України найвищі показники урожайності формуються за збалансованого поєднання опадів і температури під час колосіння.

М.В. Радченко зі співавт. [13] довели, що походження сортів впливає на формування білковості та натури зерна: сорти селекції українських наукових установ демонструють кращу стабільність якості порівняно з іноземними аналогами. Подібні закономірності щодо взаємодії генотипу й умов вирощування відзначали Ҁ. Кауа і М. Аккура [8], вказуючи на необхідність оцінювання генотип × середовище для підбору сортів із високим адаптивним потенціалом.

Вітчизняні дослідження підтверджують, що показники урожайності та якості значною мірою залежать від адаптивної здатності сортів [14; 15]. За умов недостатнього зволоження найвищу стабільність продуктивності забезпечують сорти зі збалансованими морфофізіологічними ознаками, що сприяють ефективному використанню вологи [1; 3].

Значну увагу в сучасних роботах приділено також екологічній стабільності нових сортів і напрямам селекції з урахуванням кліматичних викликів [2; 5]. Встановлено, що підвищення температурного фону та зменшення опадів вимагають розробки сортів із коротшим вегетаційним періодом, підвищеною жаро- та посухостійкістю, без втрати хлібопекарських властивостей зерна.

Роботи Т. Hellemans [16] і Г.П. Жемели [17] зі співавт. свідчать, що технологічна якість зерна значною мірою зумовлена сортовими особливостями та управлінням агротехнікою — передусім удобренням, сівозміною та обробітком ґрунту. Тому, оптимізація агротехнологій у поєднанні з добром адаптованих сортів є основою стабільного виробництва високоякісного зерна пшениці озимої в Україні.

Отже, аналіз літературних джерел свідчить, що сучасні сорти пшениці ози-

мої характеризуються високим потенціалом урожайності та адаптивності, проте їх реалізація істотно залежить від погодних умов та агротехнологічних заходів. Селекція спрямована на створення екологічно пластичних і стабільних сортів із високими якісними показниками зерна. У контексті змін клімату перспективним є комплексний підхід, що поєднує генетичний потенціал сортів із оптимізацією технологій вирощування.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження показників господарської придатності сортів пшениці м'якої озимої проводили за кваліфікаційної експертизи у 2022/23–2023/2024 рр. на 17-ти пунктах досліджень Українського інституту експертизи сортів рослин (УІЕСР), які знаходяться у трьох ґрунтово-кліматичних зонах: у Степу (Дніпропетровська, Кіровоградська, Одеська філії), Лісостепу (Вінницька, Сумська, Тернопільська, Харківська, Черкаська, Чернівецька, Київська спеціалізована філії) та Поліссі (Волинська, Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Рівненська, Чернігівська, Хмельницька філії).

Об'єктом дослідження були 28 сортів пшениці м'якої озимої вітчизняної та зарубіжної селекції, допущені до державного сортовипробування або включені до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні (реєстрація 2024 р.), та рекомендовані для відповідних ґрунтово-кліматичних зон.

А саме: ТОВ «Агрофірма Колос» (АФК ЮНІОН, АФК ПРЕМІУМ, АФК ФЕНТЕЗІ); ННЦ «ІЗ НААН» (Вікторія Поліська); ТОВ «Українське насіння» (Шамбері, Антік, Авіньйон); Інституту фізіології рослин НАНУ (Звенигора, Родослава, Київська 20, Адама); Носівської СДС МІП імені В.М. Ремесла НААН (Бурштин Носівський); СПІ–НЦНС (Королева одеська, Олімпія одеська, Савеліна, Сага, Фаворитка одеська, Ягідка одеська); Білоцерківської ДСС ІБКЦБ НААН (Білоцерківчанка, Сопілка); зарубіжних компаній – DSV AG

(ДСВ 2129119, ДСВ 2129120), Limagrain Europe (ЛГ Стрімач, ЛГ Арагоніт), Strube Research GmbH & Co.KG (Вальтер, Хаптер, Інвіктус, Валлонія).

Ґрунти дослідних ділянок характерні для відповідної зони вирощування. Їхня облікова площа – 25 м², розміщення рендомізоване, повторність чотириразова. Урожайність визначали шляхом суцільного обмолоту облікових ділянок із перерахунком на стандартну вологість зерна. Показники якості зерна (вміст білка, сирової клейковини) визначали за загальноприйнятими методиками кваліфікаційної експертизи сортів рослин.

Польові дослідження здійснювали відповідно до методичних рекомендацій щодо кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення в Україні, зокрема загальної частини «Методика проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення в Україні (Загальна частина)» [18]. Лабораторні дослідження виконували згідно з методикою визначення показників якості продукції рослинництва «Методикою проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення в Україні. Методи визначення показників якості продукції рослинництва» [19].

Статистичну обробку результатів здійснювали методами описової статистики (середнє значення, мінімальні та максимальні показники, розмах варіації) з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel. Достовірність різниць між середніми значеннями оцінювали за критерієм найменшої істотної різниці (НІР_{0,05}).

Показники врожайності досліджуваного сорту порівнювали з умовним стандартом – середнім значенням відповідного показника для сортів, які були випробувані протягом попередніх п'яти років у межах тієї самої ґрунтово-кліматичної зони та блоку досліджень «Методика проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення в Україні (Загальна частина)» [18].

У період вегетації пшениці м'якої озимої в кожному пункті досліджень визначали

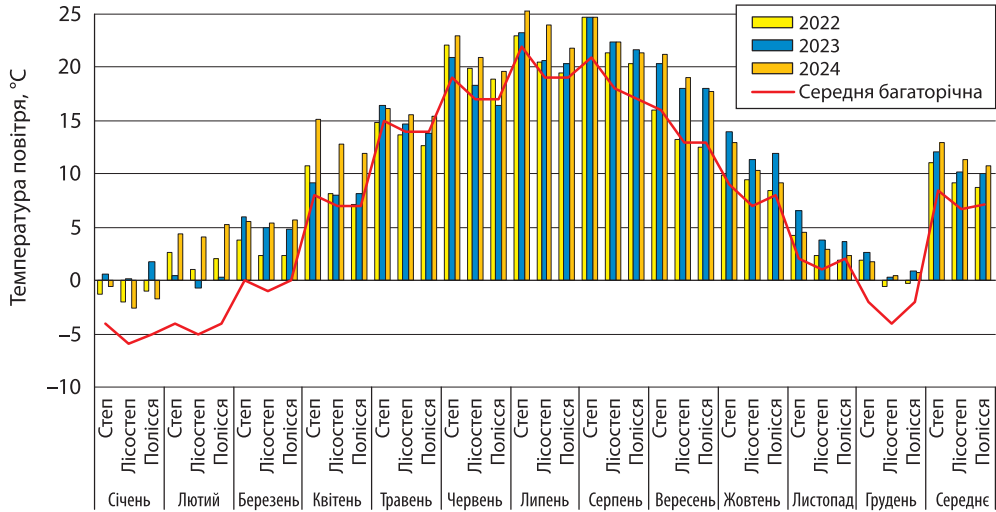


Рис. 1. Середньодобова температура повітря в період вегетації пшениці м'якої озимої

середньодобову температуру та кількість опадів і розраховували середнє значення в межах ґрунтово-кліматичної зони.

У 2022/23 р. агрометеорологічні умови були неоднорідними (рис. 1; 2).

Осіньний період відзначався надмірними опадами й перезволоженням ґрунту, що зумовило пізні строки сівби озимини, однак створило достатні запаси вологи. Зимівля культур пройшла сприятливо завдяки м'яким температурам (на 2–3°C вище

норми) та незначному промерзанням ґрунту. Весняно-літня вегетація відбувалася за помірних температур і достатнього зволоження, що привело до формування репродуктивних органів у сприятливих умовах. Улітку 2023 р. спостерігалася помірна температура та підвищена кількість опадів (на 18,4 мм більше норми), що забезпечило високі врожаї.

Осінь 2023 р. характеризувалася різким дефіцитом вологи, особливо у вересні,

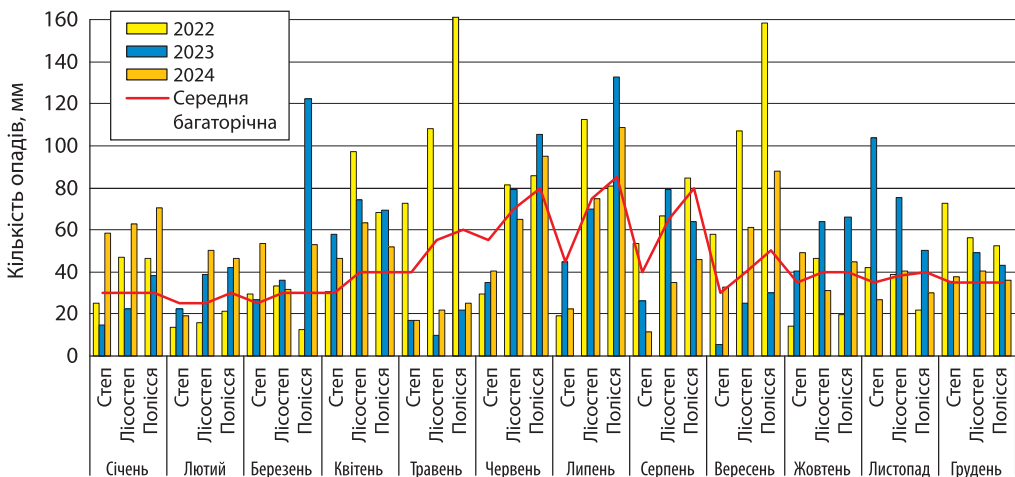


Рис. 2. Кількість опадів у період вегетації пшениці м'якої озимої

коли кількість опадів на більшій частині території становила лише 10–20% норми. Це спричинило ґрунтову і повітряну посуху та ускладнило своєчасну сівбу. Лише в другій половині жовтня випадання дощів зумовило відновлення запасів вологи та сприятливі умови для укорінення рослин. Стан озимини на час припинення осінньої вегетації оцінювався переважно як добрий (67% посівів).

Зимовий період 2023/24 рр. був теплим, із частими відлигами, що сприяло відновленню вегетації в окремі періоди. Такі умови були особливо важливими для південних областей (зокрема Одеської), де осіння посуха затримала розвиток рослин. Навесні і влітку 2024 р. спостерігалися значні температурні коливання, зокрема надзвичайно високі температури (до +39–41°C у липні), що наближалися до історичних максимумів і мали негативний вплив на формування врожаю.

У всіх зонах зафіксовано вище середньої температури (+2–5°C), що підтверджує загальне потепління (див. *рис. 2*). Кількість опадів також переважно перевищувала норму, особливо на Поліссі (+269 мм у 2022/23 р.). Найбільший ризик для врожайності створювало поєднання осінньої посухи (2023 р.) та екстремальної спеки (липень 2024 р.).

Отже, агрокліматичні умови періоду 2022/23–2023/24 рр. відзначалися високою мінливістю: поєднанням надмірного зволоження в осінній період 2022 р. із подальшою сприятливою зимівлею та весняною вегетацією, а також осінньої посухи 2023 р. з екстремальними високими літніми температурами в 2024 р.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження сортів рослин у межах окремих природно-кліматичних зон є важливим елементом науково обґрунтованої оцінки їх продуктивного потенціалу та адаптивності. Отримані експериментальні дані слугують інформаційною основою для формування рекомендацій щодо доцільності вирощування сортів у конкретних

умовах, а також мають практичне значення для виробництва та сортового добору.

Результати досліджень свідчать, що ґрунтово-кліматичні умови істотно впливають на рівень урожайності пшениці м'якої озимої. За період 2022/23–2023/24 рр. середні показники урожайності відчутно відрізнялися між зонами вирощування. Найвищі значення зафіксовано в умовах Лісостепу, де середня урожайність становила 8,4 т/га, тоді як на Поліссі вона дорівнювала 7,5 т/га, а в зоні Степу — 6,1 т/га.

Для порівняльної оцінки використано базову групу сортів, зареєстрованих у Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення в Україні, протягом попередніх п'яти років, середні значення врожайності яких прийнято за «умовний стандарт». У межах цієї групи урожайність становила 5,50 т/га у Степу, 7,07 — Лісостепу та 6,34 т/га на Поліссі. Тому, всі досліджувані сорти в кожній із зон забезпечили приріст урожайності порівняно з умовним стандартом.

Найвищу середню урожайність за період досліджень сформував сорт ДСВ 2129120 — 7,22 т/га. У зоні Степу врожайність цього сорту перевищувала умовний стандарт на 1,72 т/га, у Лісостепу — на 1,91, а на Поліссі — на 1,63 т/га, що свідчить про його високий рівень адаптивності до різних умов вирощування.

Найнижчі показники урожайності серед досліджуваних сортів відмічено у сорту АФК ЮНІОН, який у зоні Степу сформував 5,6 т/га зерна (*табл. 1*). Водночас навіть цей сорт у більш сприятливих умовах Лісостепу та на Поліссі демонстрував істотне зростання продуктивності.

В умовах Лісостепу максимальну врожайність — 8,98 т/га — також забезпечив сорт ДСВ 2129120, що на 1,91 т/га (27,0%) перевищувало рівень умовного стандарту для цієї зони. На Поліссі врожайність сортів змінювалася в межах від 6,99 т/га у сорту Білоцерківчанка до 8,08 т/га у сорту ЛГ Арагоніт.

Аналіз урожайності сортів пшениці м'якої озимої зарубіжної селекції показав, що в середньому за роки досліджень вона

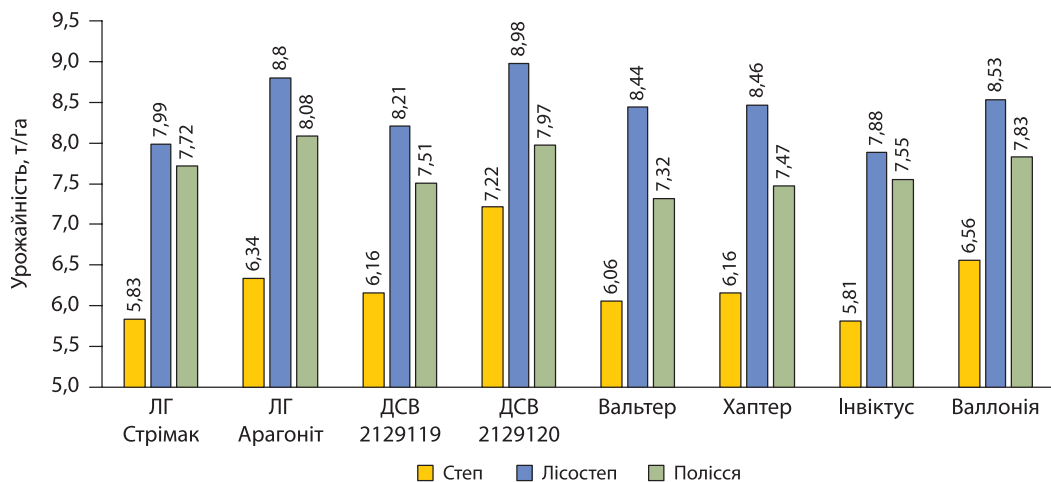
Таблиця 1. Урожайність сортів пшениці м'якої озимої залежно від зони вирощування (2022/23 та 2023/24 рр.)

Назва сорту	Країна походження	Урожайність, т/га			Приріст до умовного стандарту, т/га		
		Степ	Лісостеп	Полісся	Степ	Лісостеп	Полісся
«Умовний стандарт»*	—	5,50	7,07	6,34	—	—	—
АФК ЮНІОН	UA	5,60	7,43	7,19	0,10	0,36	0,85
АФК ПРЕМІУМ	UA	5,90	8,33	7,44	0,40	1,26	1,10
АФК ФЕНТЕЗІ	UA	5,70	7,21	7,17	0,20	0,14	0,83
Вікторія Поліська	UA	6,24	8,16	7,61	0,74	1,09	1,27
Шамбері	UA	6,60	8,78	7,25	1,10	1,71	0,91
Антік	UA	5,74	8,38	7,54	0,24	1,31	1,20
Авіньйон	UA	6,13	8,76	7,78	0,63	1,69	1,44
ЛГ Стрімач	FR	5,83	7,99	7,72	0,33	0,92	1,38
ЛГ Арагоніт	FR	6,34	8,80	8,08	0,84	1,73	1,74
Звенигора	UA	6,22	8,45	7,78	0,72	1,38	1,44
Родослава	UA	6,72	8,77	7,57	1,22	1,70	1,23
Київська 20	UA	5,71	8,20	7,67	0,21	1,13	1,33
Адама	UA	6,42	8,30	7,67	0,92	1,23	1,33
Бурштин Носівський	UA	6,17	8,41	7,14	0,67	1,34	0,80
Королева одеська	UA	6,17	8,48	7,42	0,67	1,41	1,08
Олімпія одеська	UA	6,35	8,66	7,43	0,85	1,59	1,09
Савеліна	UA	6,21	8,33	7,01	0,71	1,26	0,67
Сага	UA	6,10	8,86	7,42	0,60	1,79	1,08
Фаворитка одеська	UA	5,97	8,25	7,23	0,47	1,18	0,89
Ягідка одеська	UA	5,94	8,52	7,42	0,44	1,45	1,08
ДСВ 2129119	DE	6,16	8,21	7,51	0,66	1,14	1,17
ДСВ 2129120	DE	7,22	8,98	7,97	1,72	1,91	1,63
Білоцерківчанка	UA	5,67	8,05	6,99	0,17	0,98	0,65
Сопілка	UA	6,08	8,48	7,35	0,58	1,41	1,01
Вальгер	DE	6,06	8,44	7,32	0,56	1,37	0,98
Хаптер	DE	6,16	8,46	7,47	0,66	1,39	1,13
Інвіктус	DE	5,81	7,88	7,55	0,31	0,81	1,21
Валлонія	DE	6,56	8,53	7,83	1,06	1,46	1,49
Середнє		6,1	8,4	7,5			
R (max–min)		1,6	1,8	1,1			
Min		5,6	7,2	7,0			
Max		7,2	9,0	8,1			
НІР _{0,05}		0,1	0,2	0,1			

Примітка: «Умовний стандарт»* середня урожайність сортів, зареєстрованих у Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення в Україні впродовж попередніх п'яти років.

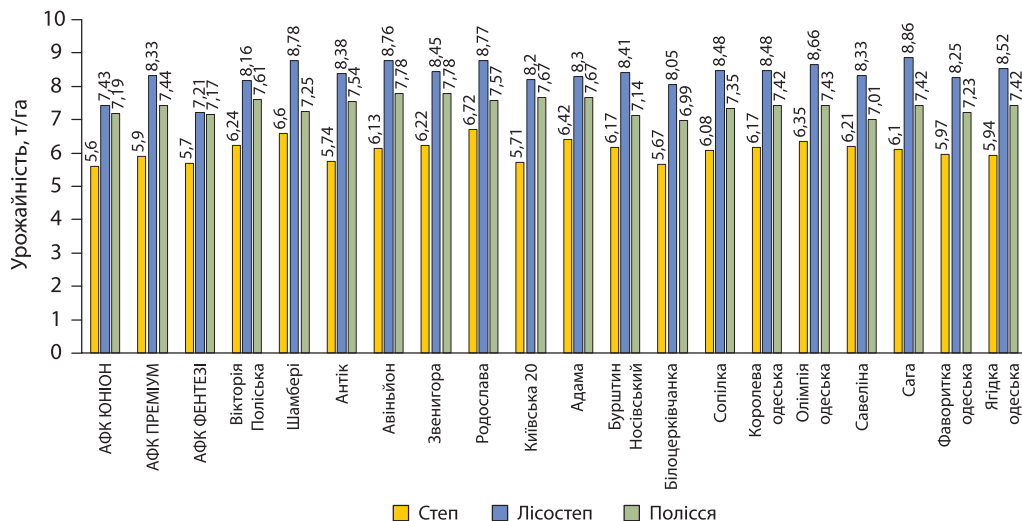
коливалася від 5,81 до 8,98 т/га залежно від зони вирощування (рис. 3). Найвищі значення у всіх ґрунтово-кліматичних зонах сформував сорт ДСВ 2129120. Найменшу врожайність серед іноземних сортів був у сорту Інвіктус у зоні Степу – 5,81 т/га.

У групі сортів української селекції середня урожайність за 2022/23–2023/24 рр. варіювала від 6,08 до 8,34 т/га залежно від зони вирощування. У зоні Степу показники продуктивності були нижчими порівняно з Лісостепом і Поліссям (рис. 4). Найвищу



$HP_{0,05}$: Степ = 0,38; Лісостеп = 0,31; Полісся = 0,22

Рис. 3. Урожайність сортів пшениці м'якої озимої зарубіжної селекції залежно від ґрунтово-кліматичної зони вирощування (2022/23–2023/24 рр.)



$HP_{0,05}$: Степ = 0,14; Лісостеп = 0,19; Полісся = 0,11

Рис. 4. Урожайність сортів пшениці м'якої озимої української селекції залежно від ґрунтово-кліматичної зони вирощування (2022/23–2023/24 рр.)

урожайність у цій групі мав сорт Сага – 8,86 т/га, що перевищувало умовний стандарт у Степу на 0,60 т/га, в Лісостепу – на 1,79, у Поліссі – на 1,08 т/га.

Високі показники врожайності також сформували сорти Шамбері, Авінйон та Родослава, що свідчить про їх добру адаптованість до умов Лісостепу. Щодо зони Степу – мінімальну урожайність серед українських сортів відмічено у сорту АФК ЮНІОН (5,6 т/га), тоді як максимальну – у сорту Родослава (6,72 т/га).

Загалом, результати досліджень підтверджують істотну залежність урожайності сортів пшениці м'якої озимої від ґрунтово-кліматичних умов вирощування. Найвищий рівень продуктивності забезпечували умови Лісостепу, тоді як у зоні

Степу врожайність була нижчою. Серед сортів української селекції конкурентоспроможними за урожайністю виявилися Сага, Шамбері, Авінйон та Родослава, серед зарубіжних – ДСВ 2129120. Отримані дані вказують на доцільність урахування регіональних особливостей за добору сортів для вирощування та перспективність впровадження високопродуктивних генотипів у виробництво.

Крім рівня урожайності, важливою складовою оцінки сортів пшениці м'якої озимої є показники якості зерна, насамперед, уміст білка та сиров'язковини. У ході досліджень проаналізовано ці показники у 28 сортів залежно від ґрунтово-кліматичних умов вирощування у зонах Степу, Лісостепу та Полісся (табл. 2).

Таблиця 2. Якісні показники сортів пшениці м'якої озимої залежно від зони вирощування (2022/23–2023/24 рр.)

Назва сорту	Вміст білка, %			Вміст сиров'язковини, %		
	Степ	Лісостеп	Полісся	Степ	Лісостеп	Полісся
АФК ЮНІОН	13,4	13,3	12,4	26,5	27,3	26,2
АФК ПРЕМІУМ	13,5	13,0	13,0	27,7	25,7	25,8
АФК ФЕНТЕЗІ	13,4	13,3	12,8	27,5	27,4	25,9
Вікторія Поліська	13,4	12,9	12,6	27,1	26,2	25,8
Шамбері	12,8	13,5	12,4	25,6	27,2	23,6
Антік	13,2	13,2	12,2	26,6	26,7	24,7
Авіньйон	12,9	12,9	12,2	25,8	26,2	23,7
ЛГ Стрімак	13,0	13,3	11,6	25,9	26,4	22,1
ЛГ Арагоніт	13,5	13,0	11,8	26,5	25,8	22,5
Звенигора	13,5	13,1	11,6	27,6	27,3	22,0
Родослава	12,7	12,6	11,6	24,6	24,8	21,6
Київська 20	13,1	12,7	12,0	26,5	25,1	23,2
Адама	12,9	12,7	12,1	27,6	25,6	24,2
Бурштин Носівський	13,0	13,3	11,9	25,4	26,5	23,0
Королева одеська	12,9	13,1	12,1	24,4	25,1	22,9
Олімпія одеська	12,9	13,5	12,4	24,6	26,3	24,2
Савеліна	13,2	13,2	12,7	26,3	26,9	24,7
Сага	12,9	13,5	12,3	25,5	27,9	24,2
Фаворитка одеська	13,2	13,2	12,7	25,9	27,4	24,7
Ягідка одеська	12,6	13,0	12,4	24,7	26,1	24,5
ДСВ 2129119	13,2	12,9	11,7	26,9	25,6	21,8

Назва сорту	Вміст білка, %			Вміст сирової клейковини, %		
	Степ	Лісостеп	Полісся	Степ	Лісостеп	Полісся
ДСВ 2129120	12,1	12,5	11,6	23,2	24,5	20,7
Білоцерківчанка	13,7	13,3	12,7	27,8	26,7	24,9
Сопілка	13,5	13,0	12,8	27,2	26,6	26,2
Вальгер	13,5	13,0	12,1	27,0	26,0	23,9
Хаптер	14,0	12,9	12,5	29,8	26,3	24,3
Інвіктус	13,9	13,4	12,4	27,9	27,9	24,6
Валлонія	12,8	13,0	11,6	26,9	26,2	23,5
Середнє	13,2	13,1	12,2	26,4	26,3	23,9
<i>R</i> (max–min)	1,9	1,0	1,4	6,6	3,4	5,5
Min	12,1	12,5	11,6	23,2	24,5	20,7
Max	14,0	13,5	13,0	29,8	27,9	26,2
НІР _{0,05}	0,2	0,1	0,2	0,5	0,3	0,6

У середньому за 2022/23–2023/24 рр. уміст білка у зерні становив 13,2% у зоні Степу, 13,1 – Лісостепу та 12,2% на Поліссі. Тому, як і у випадку з урожайністю, простежується чітка зональна диференціація показника з тенденцією до його зниження у північному напрямку. Найменші значення вмісту білка були характерні для умов Полісся, що свідчить про менш сприятливі умови формування білкових сполук у цій зоні.

Міжсортова варіабельність вмісту білка в межах зон була відносно помірною. Розмах варіації становив 1,9% у Степу, 1,0 – Лісостепу та 1,4% на Поліссі. Максимальні значення показника відмічено у сортів Хаптер (14,0% у Степу), Інвіктус (13,9 у Степу) та Білоцерківчанка (13,7% у Степу). Мінімальний вміст білка було у сорту ДСВ 2129120 (12,1% у Степу та 11,6% на Поліссі), а також у сорту Звенигора (11,6% на Поліссі).

Аналіз вмісту сирової клейковини підтвердив подібний характер зональних відмінностей. У середньому цей показник становив 26,4% у зоні Степу, 26,3 – Лісостепу та 23,9% на Поліссі. Найвищі значення клейковини формувалися в умовах Степу та Лісостепу, тоді як на Поліссі відмічало-

ся її зниження. Розмах варіації за вмістом сирової клейковини був найбільшим у зоні Степу (6,6%), що вказує на значні сортові відмінності за цим показником у найбільш сприятливих умовах вирощування.

Максимальний вміст сирової клейковини відзначено у сортів Хаптер (29,8% у Степу), Інвіктус (27,9 у Степу та Лісостепу) та Білоцерківчанка (27,8% у Степу). Найнижчі показники спостерігалися у сорту ДСВ 2129120 (20,7% на Поліссі), а також у сортів Родослава (21,6 на Поліссі) та Звенигора (22,0% на Поліссі).

Порівняльна оцінка показників якості за зонами вирощування свідчить, що сорти Хаптер, Інвіктус, Білоцерківчанка та Сопілка характеризувалися відносно стабільним рівнем вмісту білка і сирової клейковини незалежно від ґрунтово-кліматичних умов. Натомість сорти ДСВ 2129120, Родослава та Звенигора у зоні Полісся мали знижені показники якості зерна.

Отримані результати, так само як і дані з урожайності, підтверджують істотний вплив ґрунтово-кліматичних умов на формування технологічних показників зерна пшениці м'якої озимої. Найсприятливішими для отримання зерна з високим вмістом білка та сирової клейковини є умови Степу

та Лісостепу, тоді як на Поліссі доцільно враховувати сортові особливості під час добору матеріалу для виробництва якісного зерна.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що ґрунтово-кліматичні умови вирощування істотно впливають на урожайність пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.), до того ж найвищі середні значення досягнуті в зоні Лісостепу, а найнижчі у Степу.

Усі досліджувані сорти перевищували умовний стандарт урожайності, що свідчить про високий продуктивний потенціал сучасних генотипів у різних агроекологічних умовах.

Сорт DSV 2129120 виявив найвищі показники урожайності та відносну стабільність між зонами, що вказує на його

високу адаптивність до змінних ґрунтово-кліматичних умов.

Аналіз зерна показав, що вміст білка та сирової клейковини змінюється за зонами вирощування: найбільш сприятливими для формування якісних показників є умови Степу та Лісостепу, тоді як на Поліссі вони істотно нижчі.

Сорти Хаптер, Інвіктус та Білоцерківчанка сформували найвищі та відносно стабільні показники білка і сирової клейковини, що обґрунтовує їх практичну цінність для вирощування в умовах різних ґрунтово-кліматичних зон України.

Отримані дані підтверджують необхідність зонального добору сортів пшениці м'якої озимої для підвищення ефективності виробництва зерна та оптимізації ресурсів виробничого процесу в межах агроєкосистем України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лифенко, С. П., Наконечний, М. Ю., & Нарган, Т. П. (2021). Особливості селекції сортів пшениці м'якої озимої степового еко типу у зв'язку зі змінами клімату в умовах Півдня України. *Вісник аграрної науки*, 3(816), 52–61. DOI: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202103-07>.
2. Aroga, N. K. (2019). *Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions*. Lucknow: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w>.
3. Корхова, М. М., Нікончук, Н. В., & Панфілова, А. В. (2021). Адаптивний потенціал нових сортів пшениці озимої в умовах Південного Степу України. *Таврійський науковий вісник*, (122), 48–55. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.122.7>.
4. Назаренко, М., Миколенко, С., & Охмат, П. (2020). Варіація продуктивності та якості зерна сучасних сортів пшениці озимої у північному Степу України. *Український журнал екології*, 10(4), 102–108. DOI: https://doi.org/10.15421/2020_175.
5. Базалій, В. В., Лавриненко, Ю. О., Домарацький, Е. О., Ларченко, О. В., & Панфілова, А. В. (2024). Проблеми та ефективність селекції сортів пшениці озимої з підвищеною екологічною стабільністю. *Фактори експериментальної еволюції організмів*, 35, 13–17. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001507969>.
6. Корхова, М., & Миколайчук, В. (2022). Influence of weather conditions on the duration of interphysical periods and yield of durum winter wheat. *Scientific Horizons*, 25(2), 36–46. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.25\(2\).2022.36-46](https://doi.org/10.48077/scihor.25(2).2022.36-46).
7. Gawęda, D., & Haliniarz, M. (2021). Grain yield and quality of winter wheat depending on previous crop and tillage system. *Agriculture*, 11(2), 133. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11020133>.
8. Kaya, Y., & Akcura, M. (2020). Effect of genotype × environment interaction on grain yield in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cereal Research Communications*, 48(1), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42976-019-00025-3>.
9. Дутова, Г. А., Киенко, З. Б., & Павлюк, Н. В. (2024). Урожайність та якість нових сортів пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.) у різних ґрунтово-кліматичних умовах України. *Plant Varieties Studying and Protection*, 2020(4), 227–233. DOI: <https://doi.org/10.21498/2518-1017.20.4.2024.321923>.
10. Кирильчук, А. М., Дутова, Г. А., Гринів, С. М., Орленко, О. Б., Безпрозвана, І. В., Кулик, Т. Є., & Макарчук, Б. М. (2024). Пластичність нових сортів м'якої озимої пшениці (*Triticum aestivum* L.) у різних ґрунтово-кліматичних умовах України. *Plant Varieties Studying and Protection*, 2024(1), 58–68. DOI: <https://doi.org/10.21498/2518-1017.20.1.2024.297224>.
11. Панфілова, А. В., & Корхова, М. М. (2023). Сортовипробування пшениці м'якої озимої в умовах Південного Степу України. *Аграрні інновації*, 21, 176–182. DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2023.21.26>.
12. Бараболя, О. В., & Яновський, Р. О. (2023). Врожайність сучасних сортів пшениці м'якої озимої в умовах Кіровоградської області. *Аграрні інновації*, 21(2). DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2023.21.2>.
13. Радченко, М. В., Скидан, М. С., & Желдубовський, М. С. (2024). Дослідження формування продуктивності та якості зерна сортів пшениці

- озимої різних за походженням. *Аграрні інновації*, 26, 101–105. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.26.14>.
14. Заєць, С. О., Музика, В. Є., Ніжеголенко, В. М., & Рудик, О. Л. (2021). Оцінка адаптивної здатності та стабільності сортів пшениці м'якої озимої за різних умов зволоження на півдні України. *Зрошуване землеробство*, 76, 17–21. DOI: <https://doi.org/10.32848/0135-2369.2021.76.3>.
15. Самойлик, М., Устинова, Г., Лозинський, М., Корхова, М., & Уліч, О. (2023). Оцінювання урожайності та адаптивних властивостей нових сортів пшениці м'якої озимої. *Вісник аграрної науки*, 2(839), 34–42. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202302-05>.
16. Hellemans, T., Landschoot, S., Dewitte, K., Van Bockstaele, F., Vermeir, P., Eeckhout, M., & Haesaert, G. (2018). Impact of crop husbandry practices and environmental conditions on wheat composition and quality: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66, 2491–2509. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b05450>.
17. Жемела, Г. П., Бараболя, О. В., Татарко, Ю. В., & Антоновський, О. В. (2020). Вплив сортових особливостей на якість зерна пшениці озимої. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 3, 32–39. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.03.03>.
18. Ткачик, С. О. (Ред.). (2016). *Методика проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення в Україні (загальна частина)* (4-ге вид., випр. і доп.). Вінниця: ФОП Корзун Д. Ю.
19. Ткачик, С. О. (Ред.). (2016). *Методика проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення. Методи визначення показників якості продукції рослинництва* (3-ге вид. випр. і доп.). Вінниця: ФОП Корзун Д. Ю.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 03.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.12.2025
Дата публікації: 27.02.2026

ЕКОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО АГРОТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЗА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО НА ҐРУНТІ, ЗАБРУДНЕНОМУ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

Г.В. Давидюк, Л.І. Шкарівська, І.І. Клименко, Н.І. Довбаш, М.А. Кушук

ННЦ «ІЗ НААН»

(с-ще Чабани, Фастівський р-н, Київська обл., Україна)

e-mail: anndavydiuk@gmail.com; ORCID: 0000-0002-3877-2837

e-mail: Luda_Shkarivska@i.ua; ORCID: 0000-0002-4928-3238

e-mail: Ira_Klimenko@i.ua; ORCID: 0000-0001-9449-7377

e-mail: Nadezda_D@ukr.net; ORCID: 0000-0002-4741-2657

e-mail: marinakushyk@gmail.com; ORCID: 0000-0002-3956-4423

Стаття присвячена дослідженню зменшення шкідливого впливу важких металів на ґрунт, що знаходиться у сільськогосподарському використанні. Метою є встановлення особливостей застосування агротехнічних заходів за вирощування кукурудзи на зерно в умовах забруднення сірого лісового ґрунту важкими металами. Використано методи досліджень: полігонний моніторинг, польовий дослід, лабораторний та статистичний. Визначено, що застосування агрозаходів (періодичне вапнування та щорічне внесення побічної продукції з біодеструктором, гумату та обробка насіння комплексним мікро-ризоутворювальним препаратом із властивостями детоксиканта) сприяє підвищенню вмісту гумусу в ґрунті на відносних 19,0–26,0% порівняно з попередніми дослідженнями (1,33–1,39% у 2016–2020 рр.). Рівень гідролітичної кислотності децю знизився і був у межах 1,2–1,4 м-екв/100 г ґрунту, забезпеченість обмінним кальцієм залишилася середньою, магнієм — низькою та середньою. Сума ввібраних основ підвищилась на 1,4–3,3 м-екв/100 г ґрунту з дуже низького до низького та середнього рівнів (9,7–11,1 м-екв/100 г). Кількість сполук рухомого фосфору зросла на 16,0–19,2%, досягнувши дуже високого рівня — 295,9–348,9 мг/кг. Відмічено тенденцію до зниження кількості рухомих форм свинцю на 6,1–31,6%, кадмію — на 14,3–16,7, цинку — на 9,0–21,2% (залежно від рівня забрудненості екотопів), а також рухомих сполук міді — на 27,3%. Урожайність кукурудзи характеризувалася незначною мінливістю за роками ($V = 6,8\%$), а вміст міді, цинку, свинцю та кадмію не перевищував гранично допустиму концентрацію для кормових цілей. Встановлено, що за беззмінного вирощування кукурудзи в умовах техногенного забруднення ґрунту ефективним є впровадження комплексу додаткових агрозаходів, що дає можливість отримати 6,7–8,4 т/га зерна, придатного для кормових і технічних цілей. Дослідження особливостей одержання сталих урожаїв культур на ґрунтах, забруднених важкими металами, і пошук шляхів зменшення їх забруднення є перспективним напрямом досліджень.

Ключові слова: антропогенне навантаження, забруднення ґрунтів, полігонний моніторинг, родючість ґрунту, детоксикація ґрунту.

ВСТУП

Розвиток суспільства і господарської діяльності, у переважній більшості, призводить до збільшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище та негативних змін у компонентах довкілля. Використання різноманітних хімікатів у промисловості, сільськогосподарському виробництві й побуті, відходи від робо-

ти двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів, стічні води підприємств і населених пунктів та низка інших чинників зумовлюють надходження в біосферу хімічних елементів, зокрема важких металів (далі ВМ) [1–3]. На сучасному етапі розвитку діяльності людини дедалі більше спричиняє забруднення навколишнього середовища ВМ через щоденне виробництво товарів для потреб населення. Зміна клімату також може впливати на за-

бруднення ґрунту важкими металами за рахунок зниження рН ґрунту, зумовленого посиленням кислотних дощів унаслідок промислових викидів парникових газів та мілітарних дій. Це підвищує мобільність важких металів. Повені та зливові дощі можуть переносити забруднені частинки ґрунту на нові території, розширюючи зону забруднення, а тривалі посухи впливати на концентрування важких металів у верхніх шарах ґрунту. У нинішніх умовах зміни клімату ведення сільськогосподарського виробництва на ґрунтах забруднених важкими металами є істотною екологічною проблемою.

Важливою для зменшення шкідливого впливу ВМ на довкілля є розробка способів використання забруднених ними ґрунтів. Зокрема, питання ефективності вирощування кукурудзи на зерно в умовах змін клімату на ґрунтах забруднених ВМ, кількість яких збільшується, зокрема і внаслідок військової агресії РФ, потребують вивчення. Тому, актуальним є визначення особливостей отримання сталих урожаїв культури на ґрунтах із надфоновим умістом ВМ, а перспективним — пошук шляхів зменшення кількості забруднених ними ґрунтів.

Метою досліджень було встановити особливості застосування агротехнічних заходів за вирощування кукурудзи на зерно в умовах забруднення ґрунту важкими металами.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

ВМ здатні накопичуватись в ґрунтах, що істотно впливає на їх якість і родючість. За даними М. Esmailzadeh, J. Jaafari [4] забруднення сільськогосподарських ґрунтів ВМ може спричинити деградацію ґрунту, перешкоджати росту рослин, створюючи проблеми для всіх живих організмів. Окрім того, А. Paya Perez, N. Rodriguez Eugenio [5] наголошують, що деградація сільськогосподарських ґрунтів впливає на врожайність сільськогосподарських культур і наражає найбільш вразливі верстви населення на ризик економічних втрат і недоїдання.

У працях В.Л. Самохвалової та ін. [6], J. Vareda et al. [7] розглядається питання важливої ролі фізико-хімічних властивостей ґрунту у накопиченні та рухомості ВМ. С.А. Балюк та ін. [8] відмічають, що відновлення родючості забруднених ґрунтів ВМ є досить складним не лише в Україні, а й у світі. Я.Г. Цицюра з співавт. [9], А. Raklami et al. [10] особливу увагу звертають на методи детоксикації, що одночасно впливають на рухомість і транслокацію ВМ у ґрунті. Такі методи забезпечують іммобілізацію забруднювачів, що перебувають в аніонній та катіонній формах і передбачають вирощування рослин, толерантних до ВМ та здатних зменшити вміст елементів забруднювачів. А. Raklami, K. Oufdou [11], X. Wang, L. Fang [12] у своїх дослідженнях показують, що забруднення ґрунтів ВМ перешкоджає таким біохімічним і фізіологічним процесам у рослинах, як проростання насіння, водний баланс, фотосинтез, засвоєння CO₂, мінеральне живлення, накопичення розчинних речовин, затримка росту.

Одним із способів рекультивации сільськогосподарських ґрунтів, забруднених ВМ, є фіторемедіація, що подано у працях В.Л. Самохвалової, А.І. Фатеева [6], А. Jarin, M. Khan [13], S. Muthusaravanan, N. Sivarajasekar, [14] та багатьох інших учених. Вона полягає у використанні рослин для екстракції, іммобілізації або детоксикації важких металів та інших забруднювачів у навколишньому середовищі. Це складний процес, що включає фітоекстракцію — поглинання забруднювальних речовин кореневою системою рослин та їх перенесення у рослину біомасу; різкофільтрацію — руйнування забруднювальних речовин ґрунтовими мікроорганізмами у зоні, що оточує кореневу систему рослини та інші процеси. Однак, із огляду на тривалість процесу фіторемедіації, який потребує значного часу, вагомим значення набуває отримання економічної вигоди за вирощування відповідних культур.

Однією з важливих сільськогосподарських культур, яку можна використовувати для фіторемедіації ґрунтів, забруднених

ВМ, є кукурудза. Ця культура посідає одне з провідних місць серед зернових культур у світовому агропромисловому виробництві. Універсальність і високий генетичний потенціал урожайності сприяють розширенню площ посівів цієї культури в різних агрокліматичних зонах. Г.М. Калетнік, В.Д. Паламарчук [15], Н. Tang, L. Zhang [16] у своїх дослідженнях відмічають, що кукурудза є важливою сировиною для виробництва харчових продуктів людини та кормів у тваринництві, фармацевтичних препаратів, косметики та біоенергетичних цілей. Однак на ріст рослин, фізіологічні процеси, потенціал врожайності і продуктивність кукурудзи істотно впливають ґрунтові і погодні умови. Тому, за даними А. El-Sappah., S. Rather [17] такі особливості, як глибока коренева система, осмотична адаптація та активність антиоксидантних ферментів, забезпечують високу стійкість кукурудзи до посухи. Також М. Rizwan, S. Ali [18], W. Xu, G. Lu [19] пояснюють, що кукурудза широко використовується для фітореMediaції ґрунтів, забруднених кадмієм, завдяки високому виробництву біомаси та здатності накопичувати цей елемент. До того ж у працях S.-F. Cheng, C.-Y. Huang [20] показано, що вона є високотолерантною до вмісту свинцю у ґрунті.

Отже, дослідження перспективи вирощування кукурудзи на зерно в умовах забруднення ґрунту ВМ і кліматичних змін є важливим для забезпечення продовольчої безпеки та захисту навколишнього середовища.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Упродовж 2021–2025 рр. польові експерименти здійснювали на ґрунтах, забруднених ВМ, у полігонному моніторингу в умовах Правобережного Лісостепу України (дослідне поле ННЦ «ІЗ НААН», Фастівський р-н, Київська обл.). Дослідження виконувалися на стаціонарному дрібноділянковому досліді, закладеному в 1999 р. на сірому лісовому грубопилуватому легкосуглинковому на лесовидному суглинку ґрунті (рис. 1).

Під час закладання дослідів ґрунт характеризувався близькою до нейтральної реакцією ґрунтового розчину ($pH_{\text{сол.}} = 5,6$), низьким вмістом гумусу (1,65%), дуже низьким — легкогідролізного азоту (85,1 мг/кг), високим — рухомих сполук фосфору (162,0 мг/кг) та підвищеним — калію (120,0 мг/кг). Облікова площа ділянки 4 м², повторність — чотириразова. Досліджували варіанти з природним фоном кислототорозчинної фракції свинцю — 10 мг/кг, цинку — 5, кадмію — 0,2 мг/кг ґрунту (фон — контроль) та варіанти зі штучно створеними фонами, що перевищували природний — у 5, 10 та 100 разів відповідно. В 2014 р. було створено екотоп з перевищенням природного фону кислототорозчинних сполук міді (3,0 мг/кг) у 100 разів.

Вирощували кукурудзу на зерно (гібрид Остреч СВ). На всіх ділянках досліді з 2021 по 2025 рр. щороку вносили: мінеральні добрива в дозі N₁₂₀P₉₀K₁₂₀; побічну продукцію кукурудзи з розрахунку 5 т/га, оброблену біодеструктором; гумат у дозі 10 л/га, а також у 2020 р. було внесено меліорант у вигляді дефекації — 3 т/га. Проводили передпосівну обробку насіння мікоризотворювальним біопрепаратом — 2 л/т.

Проби ґрунту відбирали на глибину 0–20 см навесні — до посіву культури.



Рис. 1. Місце розташування досліді; супутникове зображення досліджуваного агроландшафту в Google Maps із позначенням місць дослідження (карта України, с. Гатне, Фастівський р-н, Київська обл. (50.340565°N, 30.407150°E))

У досліді застосовували різні агротехнічні заходи відповідно до вимог технологічних карт вирощування культур.

Для досліджень використовували методику фізико-хімічного і хімічного аналізів, які виконували у лабораторії відділу агроєкології і аналітичних досліджень ННЦ «ІЗ НААН». У ґрунті визначали: $pH_{\text{сол.}}$ – іонометрично, згідно з ДСТУ ISO 10390:2007; гідролітичну кислотність – за методом Каппена в модифікації ЦІНАО (ДСТУ 7537:2014); суму вибраних основ – титриметрично за методом Каппена-Гільковця (інструкція № 2); уміст органічної речовини (гумус) – за методом Тюрина (ДСТУ 4289:2004); легкогідролізний азот – за методом Корнфілда після компостування ґрунту в чашках Конвея (ДСТУ 7863:2015); рухомі сполуки фосфору і калію – за модифікованим методом Чирикова (ДСТУ 4115-2002); обмінний кальцій і магній – за методом Шолленберга в модифікації ННЦ «ІА імені О. Н. Соколовського» (ДСТУ 7861:2015); рухомі форми важких металів та мікроелементів – у буферній ацетатно-амонійній витяжці (pH 4,8) з подальшим визначенням методом атомно-абсорбційної спектрометрії (ДСТУ 4770:2007).

Аналіз погодних умов вегетаційного періоду 2021–2025 рр. свідчить про відхилення температурного режиму і кількості опадів від середньобігаторічних норм, що могло впливати на ріст і розвиток рослин кукурудзи (рис. 2).

Загалом, вегетаційний період вирощування кукурудзи за всі досліджувані роки характеризувався вищими за норму на 0,9–1,5°C температурами повітря (рис. 2, а). Кількість опадів за вегетаційний період на початку вегетації у травні–червні була в середньому на 16,2–37,2 мм, а в 2023 р. – на 23,6 та 64,6 мм меншою від багаторічної норми (рис. 2, б).

У липні–серпні кількість опадів часто перевищувала норму, проте вони мали зливовий характер. Отже, підвищені температурні показники і нестача вологи, особливо на початку вегетації, мали негативний вплив на ріст і розвиток рослин кукурудзи.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз відібраних проб ґрунту в середньому за 2021–2025 рр. показав, що застосування агрозаходів сприяло підвищенню вмісту гумусу на відносних 19,0–26,0% порівняно з попередніми дослідженнями (1,33–1,39% у 2016–2020 рр.). За середнього показника $pH_{\text{сол.}}$ $4,9 \pm 0,04$ та низького рівня варіювання ($V=1,7\%$) реакція ґрунтового розчину на всіх ділянках досліді була середньобазисною і коливалася в межах 4,8–5,0 (табл. 1). Рівень гідролітичної кислотності за цих умов дещо знизився (за незначного рівня варіювання – $V=7,5\%$) і був у межах 1,2–1,4 м-екв/100 г ґрунту. Забезпеченість обмінним кальцієм залишилася

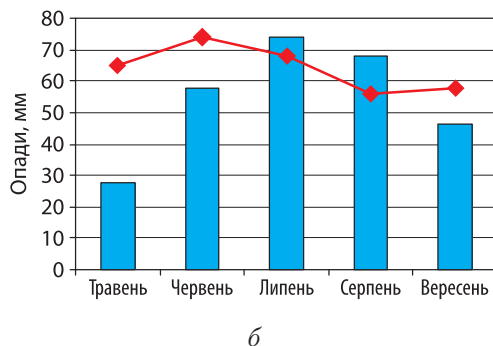
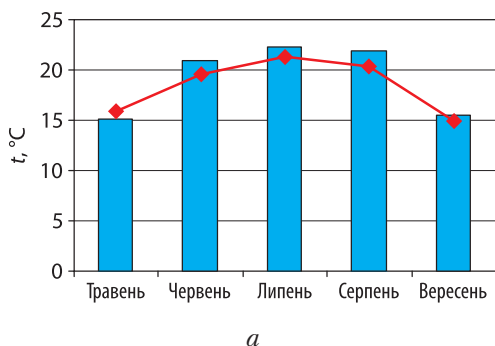


Рис. 2. Погодні умови вирощування кукурудзи на зерно (2021–2025 рр.): а – температурні умови; б – кількість опадів

Таблиця 1. Фізико-хімічні властивості сірого лісового ґрунту в умовах тривалого забруднення важкими металами (2021–2025 рр.)

Варіант дослідю	Гумус, %	рН _{сол.}	Гідролітична кислотність	Обмінний		Сума ввібраних основ
				кальцій	магній	
				м-екв/100 г ґрунту		
Природний фон ВМ (контроль)	1,52	4,9	1,2	9,4	1,3	11,1
Перевищення фону ВМ у 5 разів	1,67	5,0	1,2	9,1	1,0	10,3
Перевищення фону ВМ у 10 разів	1,61	4,8	1,3	8,6	0,8	9,7
Перевищення фону ВМ у 100 разів	1,60	4,9	1,4	8,7	0,8	9,8
$\bar{X} \pm S\bar{x}$	1,60±0,03	4,9±0,04	1,3±0,05	8,95±0,18	0,98±0,12	10,2±0,3
V, %	3,85	1,7	7,5	4,13	24,23	6,3
НІР ₀₅	0,14	0,18	0,2	0,83	0,53	1,4

ся середньою (8,6–9,4 м-екв/100 г ґрунту), а магнієм – низькою та середньою (0,8–1,3 м-екв/100 г ґрунту). Сума ввібраних основ під впливом агрозаходів підвищилась на 1,4–3,3 м-екв/100 г ґрунту: від дуже низького (7,8–8,9 м-екв/100 г у 2016–2020 рр.) до низького та середнього рівнів (9,7–11,1 м-екв/100 г) у 2021–2025 рр. [21].

Аналіз забезпеченості ґрунту нутрієнтами підтвердив вплив агротехнічних заходів на агрохімічні властивості ґрунту (табл. 2). Кількість сполук рухомого фосфору зросла від 170,6–218,2 мг/кг ($V=12,3\%$) у 2016–2020 рр. на 16,0–19,2% до 295,9–348,9 мг/кг (2020–2025рр.) з незначним варіюванням ($V=7,3\%$), забезпечивши дуже високий рівень вмісту цього елементу – 295,9–348,9 мг/кг ($V=7,3\%$). Уміст сполук рухомого калію збільшився на 12,3–14,2%, порівняно з попередніми даними (2016–2020 рр.), забезпечивши дуже високий рівень – 193,9–266,6 мг/кг ґрунту (за середнього рівня варіювання – $V=14,0\%$). Уміст сполук легкогідролізного азоту був дуже низький і знаходився у межах від 87,8 до 94,7 мг/кг з незначним варіюванням ($V=4,2\%$).

Водночас проведені дослідження показали, що запровадження запропонованих агротехнічних заходів у 2021–2025 рр. (щорічне внесення побічної продукції рослинництва, мінеральних добрив, біологічних препаратів і післядія вапнування проведеного в 2020 р.) сприяли зниженню кількості рухомих форм ВМ у ґрунті.

Зокрема, порівняно з періодом 2016–2020 рр., кількість рухомого свинцю зменшилася на 6,1–31,6%, кадмію – на 8,3–16,7, а цинку – на 9,0–30,0% залежно від рівня техногенного навантаження (табл. 3).

Також за цих умов, у екоотопі, забрудненому рухомими сполуками міді відмічено зменшення кількості її рухомих форм на 27,3%. Найінтенсивніше кількість рухомих форм свинцю зменшувалась на варіанті з 10-кратним перевищенням фонових показників – 31,6%, що може бути пов'язано з тим, що помірно високі концентрації металів можуть стимулювати захисні механізми мікрофлори ґрунту або виділення корневих ексудатів рослин, які переводять метали у неактивну форму швидше, ніж за низьких або занадто високих концентрацій. Відмічено, що на природному фоні найбільш інтенсивно зменшувалась кількість

Таблиця 2. Показники родючості сірого лісового ґрунту в умовах тривалого забруднення агроекотопів свинцем, кадмієм і цинком, шар 0–20 см (2021–2025 рр.)

Варіант досліджу	Легкогідролізний азот (N)	Рухомий фосфор (P ₂ O ₅)	Рухомий калій (K ₂ O)
	мг/кг ґрунту		
Природний фон ВМ (контроль)	87,8	348,9	266,6
Перевищення фону ВМ у 5 разів	94,7	330,9	193,9
Перевищення фону ВМ у 10 разів	86,4	309,6	209,8
Перевищення фону ВМ у 100 разів	88,0	295,9	223,4
$\bar{X} \pm S\bar{x}$	89,2±1,9	321,3±11,7	223,4±15,6
V, %	4,2	7,3	14,0
НІР ₀₅	8,4	52,5	70,2

Таблиця 3. Динаміка вмісту рухомих форм важких металів у сірому лісовому ґрунті залежно від фону забрудненості полотантами за застосування агротехнічних заходів, шар 0–20 см, мг/кг

Варіант досліджу	Свинець			Кадмій			Цинк			Мідь		
	I	II	Δ, %	I	II	Δ, %	I	II	Δ, %	I	II	Δ, %
1	1,4	1,1	21,4	0,12	0,11	8,3	1,0	0,7	30,0	0,3	0,4	33,3
2	11,5	10,8	6,1	0,61	0,50	16,7	3,3	2,7	18,2	—	—	—
3	23,7	16,2	31,6	0,70	0,62	14,3	6,6	5,2	21,2	—	—	—
4	319,6	249,4	22,0	6,20	5,30	14,5	102,8	93,5	9,0	20,5	14,9	27,3
ГДК	6,0			0,7			23,0			3,0		
Фон	0,5			0,1			5,0			0,5		

Примітки: I – 2016–2020 рр.; II – 2021–2025 рр.; 1– природний фон ВМ (контроль); 2 – перевищення фону ВМ у 5 разів; 3 – перевищення фону ВМ у 10 разів; 4 – перевищення фону ВМ у 100 разів; Δ, % – зміна показника у %.

рухомих форм цинку та міді, відповідно на 30,0 і 30,3%. На природному фоні коренева система рослин активно розвивається, метаболізм працює на повну потужність, що дає можливість їм ефективно поглинати мікроелементи (цинк і мідь найактивніше) для свого росту. Однак кількість рухомих форм свинцю та міді на досліджуваних ділянках із забрудненням ВМ сірого лісового ґрунту перевищувала гранично допустиму концентрацію (ГДК) [22].

В умовах стабільного техногенного забруднення ґрунту свинцем, кадмієм та цинком застосування біологічних препа-

ратів (гумату і комплексного мікоризотворювального препарату-детоксиканта) як окремо, так і за сумісного поєднання на фоні післядії вапнування, а також внесення побічної продукції рослинництва з біодеструктором та мінеральних добрив, забезпечило середню врожайність зерна кукурудзи за 2021–2025рр. на рівні 6,7–8,4 т/га. Водночас простежувалася тенденція до підвищення вмісту протеїну в зерні. Слід зазначити, що підвищені температури та дефіцит вологи на початку вегетації кукурудзи призводили до стресу, затримуючи сходи, послаблюючи кореневу систему, а

також засвоєння поживних речовин. Однак подальші сприятливі умови нівелювали ці негативні чинники у початковий період розвитку рослин і дали можливість отримати стабільний урожай зерна кукурудзи і не призвели до істотного зниження ефективності біопрепаратів.

Статистичний аналіз засвідчив, що урожайність кукурудзи характеризувалася незначною мінливістю ($V=6,8\%$), амплітуда коливань становила 1,7 т/га (від 6,7 до 8,4 т/га), середньоквадратичне відхилення – 0,5, похибка середнього значення – 0,1 т/га. Варіювання показників вмісту протеїну, крохмалю і жиру в зерні кукурудзи було незначним. Уміст протеїну в усіх варіантах дослідів становив від 8,2 до 9,8%, крохмалю – 73,3–74,5, рослинної олії – 4,24–4,41%.

Уміст міді, цинку, свинцю і кадмію у зерні кукурудзи не перевищував нормативів ГДК для кормових цілей (ДСТУ 4525:2006). Уміст сполук кадмію та свинцю у зерні як на контролі (природний фон металу), так і у варіантах із 5-, 10- та 100-разовим перевищенням природного фону металів у ґрунті становили 0,06–0,13 мг/кг та 0,6–0,9 мг/кг відповідно. Ці значення

перевищують ГДК для продовольчого зерна (0,10 мг/кг для Cd та 0,5 мг/кг для Pb), проте згідно з нормативами для кормової сировини (ГДК – 0,30 мг/кг та 5,0 мг/кг) таку продукцію можна використовувати для кормових і технічних цілей.

ВИСНОВКИ

Отже, в умовах техногенного забруднення сірих лісових ґрунтів важкими металами у кислоторозчинній формі (Pb – 50–1000 мг/кг, Cd – 1,0–20, Zn – 25–500, Cu – 300 мг/кг) та беззмінного вирощування кукурудзи впродовж 2021–2025 рр. із застосуванням комплексу регенеративних заходів забезпечується отримання стабільної врожайності зерна на рівні 6,7–8,4 т/га. Отримане зерно за вмістом токсикантів відповідає нормативам ДСТУ 4525:2006, що дає змогу використовувати його як товарну сировину для кормових і технічних цілей. За цих умов можна досягнути зниження кількості у ґрунті рухомих форм свинцю на 6,1–31,6%, кадмію – на 14,3–16,7, цинку – на 9,0–21,2 та міді – на 27,3% залежно від вихідного рівня забруднення екотопів важкими металами.

ЛІТЕРАТУРА

- Masindi, V., & Muedi, K. L. (2018). *Environmental contamination by heavy metals Heavy Metals*. In Tech. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.76082>.
- Dehodiuk, S., Davydiuk, H., Butenko, A., Litvinova, O., Shkarivska, L., Klymenko, I., ... Litvinov, D. (2025). Chemical composition of bottom silts as an indicator of environmental contamination in a small river basin. *Agriculture and Forestry*, 71(3), 199–223. DOI: <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.71.3.12>.
- Гриньова, Я. Г., & Криштоп, Є. А. (2021). Проблеми забруднення навколишнього середовища важкими металами та шляхи їх подолання. *Інженерія природокористування*, 1(19), 111–119. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6904034>.
- Esmailzadeh, M., Jaafari, J., Mohammadi, A. A., Panahandeh, M., Javid, A., & Javan, S. (2019). Investigation of the extent of contamination of heavy metals in agricultural soil using statistical analyses and contamination indices. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(5), 1125–1136. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1460798>.
- Paya Perez, A., & Rodriguez Eugenio, N. (2018). *Status of local soil contamination in Europe: Revision of the indicator «Progress in the management contaminated site in Europe»*. (Report No.: JRC 107508; Contract No.: EUR 29124 EN). Luxembourg: Joint Research Centre (EUR). DOI: <https://doi.org/10.2760/093804>.
- Самохвалова, В. Л., Фатеев, А. І., Зуза, С. Г., Погромська, Я. А., Зуза, В. О., Панасенко, Є. В., & Горпинченко, П. Ю. (2015). Фіторе mediaція техногенно забруднених ґрунтів. *Агроекологічний журнал*, 1, 92–100. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2015.272192>.
- Vareda, J. P., Valente, A. J. M., & Duraes, L. (2019). Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of Environmental Management*, 246, 101–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.126>.
- Балюк, С. А., Воротинцева, Л. І., & Ладних, В. Я. (2014). *Заходи з детоксикації забруднених ґрунтів та зменшення транслокації важких металів в сільськогосподарській культурі*. ТОВ «Смуґаста типографія».
- Цицора, Я. Г., Шкатула, Ю. М., Забарна, Т. А., & Пелех, Л. В. (2022). *Інноваційні підходи до фіторе mediaції та фіторекультивуваці у сучасних системах*

- землеробства: моногр. ТОВ «Друк». URL: <https://repository.vsau.org/getfile.php/31038.pdf>.
10. Raklami, A., Meddich, A., Oufdou, K., & Baslam, M. (2022). Plants — Microorganisms-Based Bioremediation for Heavy Metal Cleanup: Recent Developments, Phytoremediation Techniques, Regulation Mechanisms, and Molecular Responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5031. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23095031>.
 11. Raklami, A., Oufdou, K., Tahiri, A.-I., Mateos-Naranjo, E., Navarro-Torre, S., Rodríguez-Llorente, I. D., ... Pajuelo, E. (2019). Safe Cultivation of Medicago sativa in Metal-Polluted Soils from Semi-Arid Regions Assisted by Heat- and Metallo-Resistant PGPR. *Microorganisms*, 7(7), 212. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms7070212>.
 12. Wang, X., Fang, L., Beiyuan, J., Cui, Y., Peng, Q., Zhu, S., Wang, M., & Zhang, X. (2021). Improvement of alfalfa resistance against Cd stress through rhizobia and arbuscular mycorrhiza fungi co-inoculation in Cd-contaminated soil. *Environ Pollut*, 277, 116758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116758>.
 13. Jarin, A. S., Khan, M. A. R., Apon, T. A., Islam, M. A., Rahat, A., Akter, M., ... Tran, L.-S. P. (2025). Plant Responses to Heavy Metal Stresses: Mechanisms, Defense Strategies, and Nanoparticle-Assisted Remediation. *Plants*, 14(24), 3834. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14243834>.
 14. Muthusarayanan, S., Sivarajasekar, N., Vivek, J. S., Paramasivan, T., Naushad, M., Prakashmaran, J., ... Al-Duaij, O. K. (2018). Phytoremediation of Heavy Metals: Mechanisms, Methods and Enhancements. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 1339–1359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0762-3>.
 15. Калетнік, Г. М., Паламарчук, В. Д., Гончарук, І. В., Ємчик, Т. В., & Телекало, Н. В. (2021). *Перспективи використання кукурудзи для енергоефективного та екологічнобезпечного розвитку сільських територій: моногр.* ФОП Кушнір Ю. В. URL: <https://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/31069.pdf>.
 16. Tang, H., Zhang, L., Xie, X., Wang, Y., Wang, T., & Liu, C. (2025). Resilience of Maize to Environmental Stress: Insights into Drought and Heat Tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(11), 5274. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26115274>.
 17. El-Sappah, A. H., Rather, S. A., Wani, S. H., Elyrs, A. S., Bilal, M., Huang, Q., ... Abbas, M. (2022). Heat Stress-Mediated Constraints in Maize (*Zea mays*) Production: Challenges and Solutions. *Front. Plant Sci.*, 13, 23. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.879366>.
 18. Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Zia-Ur-Rehman, M., Abbas, Z., & Hannan, F. (2017). Use of Maize (*Zea mays* L.) for phytomanagement of Cd-contaminated soils: a critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, 39(2), 259–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9826-0>.
 19. Xu, W., Lu, G., Dang, Z., Liao, C., Chen, Q., & Yi, X. (2013). Uptake and Distribution of Cd in Sweet Maize Grown on Contaminated Soils: A Field-Scale Study. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2013(1), 8. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/959764>.
 20. Cheng, S.-F., Huang, C.-Y., Lin, Y.-C., Lin, S.-C., & Chen, K.-L. (2015). Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land — An *in situ* study and benefit assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 111, 72–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.024>.
 21. Господаренко, Г. М. (2020). *Практикум з агрохімії*. Вид-во: Сік Груп Україна.
 22. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах. Постанова Кабінету Міністрів України № 1325 (2021). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 12.01.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.02.2026
 Дата публікації: 27.02.2026

ABSTRACT

Drebot O., Palapa N. Environmental policy in Ukraine in the context of the development of population's culture and awareness. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 6–21.

Institute of Agroecology and Environmental Management of the NAAS
e-mail: palapa60@ukr.net.

The article analyzes the state's environmental policy, environmental culture, and environmental awareness of citizens and reveals their connection. It has been established that the environment and ecological policy, despite the requirements of EU membership and the existing large-scale damage caused by the war, remain largely a non-priority for the Ukrainian Government; strategic goals of state policy are not a priority for the relevant ministry; environmental protection remains the most underfunded sector of the Ukrainian budget; Ukraine has methods for implementing environmental policy, but they are not effective or are not fully implemented and require adaptation to European legislation and borrowing the experience of countries, taking into account Ukrainian specifics, in which the effectiveness of environmental policy implementation has already been proven. The principles of environmental policy of EU member states are presented, to which political, economic and social systems should be adapted and environmental policy should be effectively implemented in the context of European integration. The main environmental problems exacerbated by the war (impact on forests, soils, water bodies, biodiversity) are presented, as well as problems that exist in state environmental policy (state monitoring of the state of the environment, state environmental control, and legal liability for violations of environmental legislation). In addition, available international legal mechanisms for environmental protection are presented, which Ukraine can and should use to force Russia to compensate for all environmental damage caused by the war of aggression. Since the state's environmental policy is closely related to the environmental culture and environmental awareness of Ukrainian citizens, the article presents the main indicators of environmental culture that are characteristic of Ukraine, positive aspects and environmental challenges during the war, ways of developing environmental awareness are presented and elements of the influence of environmental culture on the state's environmental policy are established, which are the integration of requirements, support for sustainable development, request for changes, public involvement and reduction of environmental risks.

Key words: environmental legislation, international law, ecological and legal culture of society, environmental problems, formation of consciousness, adaptation to European legislation.

Stetsenko A., Orykhivska O., Kononenko N. Current state and development potential of Ukraine's organic sector in the context of global challenges. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 22–32.

Separated Structural Unit «Agrarian-Economic Professional College of Poltava State Agrarian University»
e-mail: arsiarsi2009@gmail.com

This study provides a comprehensive analysis of the current state and development prospects of organic production in Ukraine as a pivotal factor in ensuring food security and environmental stability. The paper explores the theoretical foundations of organic farming, specifically defining its role in biodiversity conservation, soil fertility restoration, and the mitigation of environmental impacts. Based on an analysis of official monitoring reports from specialized agencies for 2023–2024, a critical statistical decline in industry indicators was identified: a 45.95% reduction in the total number of market operators and an 86.94% decrease in organic-certified agricultural land. It is established that these negative trends result from the combined effects of wartime factors (occupation, landmines) and the transitional period of producer adaptation to new national legislative requirements. Global trends regarding the rising demand for eco-friendly products and the legislative framework of the industry in Ukraine are analyzed. Particular attention is paid to the scientific legacy of leading scholars from the Poltava region, whose expertise serves as a foundation for modern ecological agrotechnologies. The research methodology includes theoretical analysis, sociological surveys conducted via digital tools, and the results of original field experiments. Survey findings indicate a high level of public interest in organic products. The study examines in detail the negative impact of the full-scale invasion on the agricultural sector—specifically the issue of mined fields and disrupted logistics—as well as international support mechanisms for industry recovery. The paper substantiates the necessity for farms to transition to a circular economy model, integrating biofuel production from biomass as a tool for energy autonomy and economic diversification. A significant component of the work involves original practical research conducted in the Right-Bank Forest-Steppe region. The effectiveness of organic cultivation methods is demonstrated, showing that the use of natural growth stimulants yields results identical to those achieved with chemical fertilizers. The feasibility of growing microgreens as a fast-growing superfood is also justified. A comparative analysis of soil tillage methods highlights the advantages of subsoiling (deep loosening) over traditional plowing in terms of moisture retention and humus layer structure preservation. The study concludes with the need for enhanced state

support for organic producers and the implementation of innovative biotechnologies. The scope of application for these results includes farming operations, the educational process in agricultural institutions, and the formulation of rural development strategies.

Key words: sustainable development, ecology, economy, agriculture, healthy eating, organic farming, socio-economic aspect.

Rudenko S.¹, Rudenko V.¹, Rudenko S.² Ecosystems of Ukraine with regard to value of water resource potential. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 33–39.

¹*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University*

²*Vasyl Stus Donetsk National University*

e-mail: rudenkostepan@gmail.com

It is stated that revaluation of nature-resource potential (NRP) of Ukrainian ecosystems conducted as of 01.01.2022 on the unified methodological basis with regard to averaged for the last five-seven years measures of productivity of nature resources in monetary terms serves as the reference source to help define those ecosystems (from the level of natural rayon to the level of biome-natural zone and country) where their water wealth is the first (dominant) or the second (subdominant) type of nature resources in the structure of the whole potential. It should be noted from the outset that within the component structure of Ukraine's natural resource potential, water resources rank third (after land and mineral resources) in terms of potential magnitude. It is argued that such ranking of nature resources is essentially important not only for the typology of ecosystems and their classification but for scientific substantiation of the perspectives of their subsequent sustainable development within regional and national economics. It is ascertained that, among 360 ecosystems of Ukraine (from the level of 278 natural areas, 57 oblast-level ecosystems, 14 provincial ecosystems, 3 subzones, and 4 biomes-natural zones to the level of 3 natural countries) 28 of them enjoy water resources as their first (dominant) type of nature resources, and 181 ecosystems possess the same as their second (subdominant) type with regard to absolute value of their potential within the total NRP. The above respectively makes 7.8% and 50.3% out of the whole number of Ukrainian ecosystems. It is proved that the potential of water resources in 3/5 of all ecosystems of Ukraine takes leading positions in the structure of natural productive forces, that is, takes the first or the second place. Thus, it is in these ecosystems that the potential of water resources is a determinative or essential factor in substantiation of the perspectives of sustainable social-ecological-economic development of nature use. The share of water resources as NRP's dominant type is found to be the least in the oblast-level ecosystems, i.e., in the External Carpathian Oblast (37,5%) and the Polonynsko-Chornohirska

Oblast (37.5%), while the biggest role of the potential of water resources is observed in the Vododilno-Verkhovynska Oblast (46.1%) and the Marmaros Oblast (45.8%). It is verified that the most distinguished ecosystems among those where the role of water resources in the total NRP is subdominant are as follows: on the level of biomes-natural zones: the Forest-Steppe Zone (11.7%), the Broadleaved Woods Zone (14.7%), and the Mixed Woods Zone (20.2%); on the level of subzones: the Mid-Steppe Subzone (17.3%) and the Southern Steppe Subzone (25.7%); on the level of oblasts: the Prysylvasko-Crimean Lowland Oblast (35.9%), the Lower Bug-Dnieper Lowland Oblast (34.5%), the Central-Crimean Upland Oblast (29.6%), and the Dnieper-Molochansk Lowland Oblast (26.7%) (intense irrigation farming in all the above oblasts). The lowest figures of the share of subdominant water resources within the total NRP are observed in three oblast-level ecosystems of the biome of the Forest-Steppe Zone: the Northern Poltava Upland Oblast (10,9%), the North-Eastern-Prydniprovaska Upland Oblast (9,2%), and the Prydnistrovsko-Eastern-Podillia Upland Oblast (6,9%).

Key words: dominant and subdominant water resources, total resources, natural regions, biomes.

Konishchuk V.¹, Khomiak I.², Shumyhai I.¹ Rare flora of the fallow lands of Central Polissia. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 40–50.

¹*Institute of Agroecology and Nature Management*

²*Department of Ecology and Geography Zhytomyr Ivan Franko State University*

e-mail: khomyakivan@gmail.com

The article is devoted to the peculiarities of the distribution of rare flora of the fallow lands of Central Polissia. The purpose of the study is to analyze the state of populations of rare plant species in the fallow lands of Central Polissia. In accordance with the purpose, the following tasks were set: to establish the species composition and coenotic status of rare plant species in the fallow lands of Central Polissia; to determine the ecological spectrum of populations of rare plants in the fallow lands according to the indicator of natural dynamics and anthropogenic transformation; to predict changes in the number of populations of rare species in the fallow lands under the conditions of the introduction of a strict conservation regime. In the studied territory, we identified 13 rare representatives of the flora: *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, 1962, *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó, *Dactylorhiza majalis* (Reichenb.) P.F. Hunt et Summerhayes, *Epipactis helleborine* (L.) Crantz, *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *Jurinea cyanooides* (L.) Rchb., *Carlina cirsioides* Klokov, *Tragopogon ucrainicus* Artemcz., *Silene lithuanica* Zapal., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng., *Veratrum nigrum* L., *Hypericum humifusum* L., *Crataegus ucrainica* Pojark. Of these, the Red Book of

Ukraine is represented by 5 species, the European Red List – 3, Resolution 6 of the Bern Convention – 2, CITES – 2, and the List of Regionally Rare Species – 3. Rare species of flora on fallows are included in 10 classes, 13 orders, 18 unions, and 24 associations according to the Brown Blanke classification. They are most often found in the associations *Agrostietum vinealis-tenuis* Shelyag et al. 1985 and *Poëtum angustifoliae* Shelyag-Sosonko et al. 1986. Rare species of flora are present at all stages of fallow overgrowth. Their highest number is observed at the rhizome-loose-sod and dense-sod stages. The fewest species occur at the later stages of fallow overgrowth. Most species of rare fallow flora are vulnerable to reserve-forming successions. More resistant to it are *Epipactis helleborine*, *Platanthera bifolia* *Arctostaphylos uva-ursi*, *Veratrum nigrum*, and *Crataegus ucrainica*, which can exist at stages of autogenic succession up to the level of natural dynamics of 13.9 points. Species of rare flora of fallows withstand moderate anthropogenic pressure up to 7.9 points. However, some species may be under threat due to their illegal collection and movement as potential ornamental species.

Key words: self-renewal of vegetation, anthropogenic transformation, reserve-based successions, biodiversity protection.

Kalinskyi P., Goncharenko I. Phytoindication characteristics of the syntaxa of the class *Carpino-Fagetea sylvaticae* in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 51–58.

*Institute for Evolutionary Ecology
of the National Academy of Sciences of Ukraine
e-mail: kalinskyipavlo@gmail.com*

The presented research is dedicated to a comprehensive ecological and coenotic assessment of the forest vegetation within the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. The primary objective of the study is to elucidate the complex ecological structure, identify the critical environmental gradients, and determine the key determinants that drive the formation, differentiation, and spatial distribution of forest communities. The study focuses specifically on the syntaxa of the class *Carpino-Fagetea*, which represents the zonal nemoral vegetation of the region and plays a crucial role in maintaining the biodiversity and landscape stability of the Forest-Steppe zone. The methodological foundation of this research relies on the phytoindication approach developed by Didukh (2011). This method utilizes plant species as sensitive bio-indicators, employing specific ecological indicator values to quantify the response of plant communities to various environmental constraints. The article provides a detailed analysis of a substantial dataset comprising 50 syntaxa, which includes 27 associations and 23 subassociations and variants. This extensive coverage allows for a high-resolution understanding of the ecological niches occupied by broadleaved and mixed forests in the studied region. To achieve

a multidimensional characterization of the biotopes, the study analyzed nine fundamental ecological parameters that encompass both climatic and edaphic factors: soil moisture regime, variability of moisture or damping, soil acidity, total salt regime), carbonate content, nitrogen availability, thermal regime, light intensity, and continentality of the climate. The application of these scales enabled the authors to reconstruct the ecological space of the syntaxa in the absence of direct instrumental measurements. The empirical results of the analysis demonstrate that the core ecological niche of the *Carpino-Fagetea* communities in the Left-Bank Forest-Steppe is confined to submesophytic and hygromesophytic habitats. These forests predominantly develop under submicrothermal to submesothermal temperature regimes, which is typical for the temperate zone. Edaphically, these communities prefer substrates with slightly acidic to neutral soil reactions, characterized by moderate aeration and a balanced supply of mineral nutrients, particularly nitrogen. A significant portion of the study is devoted to analyzing the differentiation of syntaxa along environmental gradients. It was established that the primary drivers of floristic and structural divergence are soil moisture, acidity, trophic status, and the aeration regime. These factors collectively determine the species composition, ecological amplitude, and functional dynamics of the forest stands. The research highlights the ecological plasticity of the class, identifying distinct extremes within the analyzed dataset. Specifically, the lowest indicator values for humidity, soil acidity, and nitrogen availability were recorded in the pine–oak forests of the xeric type, such as the *Convallario-Pinetum* and *Pteridio-Quercetum* associations. These communities occupy the oligotrophic and drier end of the ecological spectrum. Conversely, the highest values for moisture and trophic indices were observed in the biologically productive floodplain forests, particularly the alder and maple–alder communities of the *Aceri negundi–Alnetum glutinosae*, which flourish in nutrient-rich, temporally flooded environments. The findings of this study have substantial theoretical and practical implications. They allow for the identification of the main ecological gradients and tolerance ranges that define the structural, floristic, and functional organization of forest vegetation in the region. Furthermore, these results refine the existing ecological classification and regional syntaxonomic scheme of the Left-Bank Forest-Steppe. From a conservation perspective, the established ecological baselines provide a robust scientific foundation for developing specific ecological indicators. These indicators are essential for the long-term monitoring of forest ecosystem dynamics, assessing the impact of anthropogenic pressures, and predicting the resilience of these habitats under the accelerating conditions of global climate change.

Key words: Phytocoenoses, ecological amplitudes, edaphic factors, biodiversity, ecological-coenotic assessment, forest community.

Kuzmenko I.^{1,2}, Moskalenko A.², Zaiachkivska B.² Design of the geospatial data base for information support of organic farming systems. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 59–69.

¹*State Institution "Institute of Soil Protection of Ukraine"*

²*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

e-mail: nessi_ku@ukr.net

Digital transformation and the adoption of geoinformation technologies are critical to the management of organic farming. Taking into account global challenges, such as climate change, soil degradation, military actions and the needs of certification of organic products, the need to create an automated geoinformation system and database of land resources suitable for growing organic products is updated. The object of the study is the process of information support of organic farming systems. The subject of the study is the design of the geospatial data base as a tool for systematization and analysis of information about soil quality. The research methodology was based on a comprehensive approach to the collection, structuring and analysis of spatial and attributive data, as well as on the development of conceptual and functional models of the geospatial data base. The approach involves the integration of regulatory and legal requirements (in particular, regarding certification and interaction with the State Production and Consumer Service and registers) with data from field measurements, agrochemical analyzes and information from state cadastres. The obtained results demonstrate the developed structured model of the geospatial data base, which provides for the automated verification of applications of business entities for compliance with the information of the EDR, the State Register of Property Rights and the State Land Cadastre (SCC), the integration of information on the physical and chemical characteristics of the soil, the level of pollution (heavy metals, pesticides, radionuclides) and restrictions caused by military actions and the neighborhood of ordinary land users and functional capabilities for the formation of thematic layers and maps visualization of restriction zones and monitoring of the dynamics of changes in indicators in the long term. The practical significance of the work lies in the creation of an effective digital tool that increases the reliability of agri-environmental assessments, minimizes the impact of the human factor, promotes scientifically based land management for organic farming and ensures the transparency of the certification process for all market participants.

Key words: soil monitoring, agroecological assessment, GIS technologies, geodatabase, conceptual model, information support.

Strygina O., Dirda V., Nepochatenko V., Penkova S., Komarova N. Application of physical and mathematical models in forestry. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 70–76.

Bila Tserkva National Agrarian University

e-mail: oksana9269@ukr.net

The article presents an overview of modern approaches to the application of physical and mathematical models in forestry. The main directions of using models for analyzing the growth and development of forest stands, predicting the dynamics of forest resources, assessing the impact of climate change, modeling forest fires and soil degradation processes are considered. Special attention is paid to the classification of physical and mathematical models, their advantages and limitations, as well as the possibilities of integration with geographic information systems and remote sensing methods. The results of scientific research of recent years are summarized, demonstrating the effectiveness of using mathematical modeling to increase the accuracy of forecasts and optimize management decisions in forestry. The conclusion is made about the importance of developing interdisciplinary approaches and implementing digital technologies to ensure sustainable management of forest ecosystems. The focus is on the implementation of automated management systems that integrate various technological solutions to ensure continuous monitoring of forests, which includes control over deforestation, combating forest fires, and preserving biodiversity. It has been determined that sustainable forestry requires deep integration of ecology, climatology, genetics, information technology, and social sciences. The use of these technologies allows for effective monitoring of large and hard-to-reach forest areas, providing accurate data on the condition of forests, identifying changes in vegetation, and early signs of environmental stress. This contributes to timely response to environmental changes and minimizing negative impacts on forest ecosystems. The purpose of this review article is to systematize and analyze modern approaches to the application of physical and mathematical models in forestry, to determine their advantages, limitations, and directions for further development. Particular attention is paid to the interdisciplinary aspects of modeling and integration of physical and mathematical methods with modern digital technologies for forest resource management. The use of mathematical models allows for a comprehensive assessment of the state of forest ecosystems, predicting their development under the influence of natural and anthropogenic factors, and optimizing forest management and restoration processes. A review of literary sources showed that the development of physical and mathematical modeling

in the forestry sector requires further improvement of theoretical foundations, adaptation of models to the regional natural and climatic conditions of Ukraine, and expansion of the empirical data base to increase the accuracy of forecasts. Therefore, the introduction of physical and mathematical models into forestry practice is a promising direction that contributes to increasing the scientific validity of management decisions, ensuring sustainable use of forest resources, and preserving ecological balance in natural systems.

Key words: optimization of forest use, forest microclimate modeling, evapotranspiration, ecosystem modeling, convection, thermal conductivity, geographic information systems, forecasting, monitoring, remote sensing of the Earth.

Moroz V.¹, Zhytova O.² Regional features of forest fire dynamics in the northeastern part of Zhytomyr region. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 77–86.

¹*West Ukrainian National University*

²*Polissia National University*

e-mail: vera_moroz@ukr.net

The problem of forest fires in Ukrainian Polissia has reached critical levels under martial law conditions, necessitating comprehensive research into regional patterns of forest combustibility, their ecological consequences, and the development of scientifically grounded approaches to fire risk management at the regional level. The aim of the study is to identify regional patterns of forest fire dynamics in the northeastern part of Zhytomyr Oblast under martial law conditions, determine their ecological consequences for soil cover, and characterize the effectiveness of fire risk forecasting to substantiate a fire risk management system. Research methodology is based on the analysis of statistical data from the State Emergency Service of Ukraine for the period 2015–2024, determination of natural fire hazard classes according to the Kurbatsky scale, investigation of fire impacts on soil properties using potentiometry and titrimetry methods (87 samples from 30 soil profiles), and mathematical modeling based on Bayes' theorem for 120 forest quarters. A critical increase in fire area by 170 times was established – from 0.3 thousand ha in 2021 to 51 thousand ha in 2023, with 45% of cases caused by military actions including shelling, mining, and drone crashes. A paradoxical trend was revealed in Bekhivske forestry: a 2-fold increase in the number of fires was accompanied by a 3-fold decrease in their area (from 2.42 to 0.30 ha) due to effective early detection and rapid response systems. Significant differences in fire hazard classes were determined for forestries of Olevske Forestry Enterprise (2.15–2.79), where pine plantations of classes II–III dominate (over 60% of the area). Statistically significant changes in soil properties were established ($p < 0.01$): pH increase from 6.5–7.0 to

7.35–7.55 and organic carbon content decrease by 15–40% with a prolonged recovery period of 5–10 years. The spatial variability of pyrogenic impact was revealed: on micro-elevations, organic carbon losses reached 40%, while in micro-depressions they were only 15–20%. The Bayesian model demonstrated high predictive ability (87% accuracy) with three risk categories identified: high risk (23 quarters, 19.2%), medium risk (58 quarters, 48.3%), and low risk (39 quarters, 32.5%). It was established that proximity to roads increases fire probability by 2.5–3.2 times, and the history of previous fires increases the risk of recurrence by 1.8 times. A synergistic effect of climatic factors (warming by 0.6–0.68°C per decade, precipitation decrease by 3–7%), military actions (45% of fire causes), and anthropogenic activity (35% – grass burning, arson) was identified, explaining the sharp increase in both the number and area of fires in 2022–2023. The research results can be used for optimizing the placement of fire prevention infrastructure considering risk categories, forecasting the duration of pyrogenic site recovery, substantiating the priority of measures in forestries with different natural fire hazard classes, and developing programs for post-war restoration of Polissia forest ecosystems. Further research should focus on expanding the study territory to other forestry enterprises of Zhytomyr and adjacent oblasts, conducting long-term monitoring (5–10 years) of soil cover and plant community recovery on pyrogenic sites, improving the Bayesian model by including additional predictors (climate indices, remote sensing data, socio-economic factors), developing an integrated GIS-based fire risk management system for the region considering military threats, and investigating fire impacts on biodiversity, hydrological regime, and carbon sequestration capacity of Polissia forest ecosystems.

Key words: forest combustibility, pyrogenic transformation, Ukrainian Polissia, Bayesian model, fire hazard classes, organic carbon, risk forecasting, pine monocultures.

Kuchma T., Shvydenko I., Raichuk L., Lishchuk A. Transformation of agricultural landscapes in southern Ukraine after the destruction of the Kakhovka HPP according to remote sensing of the Earth. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 87–97.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: favor09@ukr.net

For the southern regions of Ukraine, in particular Kherson, Zaporizhzhia, and Dnipropetrovsk regions, Kakhovka Reservoir played a key role in providing water resources. Its operation was critically important for the stable water supply of the agricultural sector through an extensive network of irrigation systems, supporting industrial production, meeting the needs of local communities, and preserving ecosystems, including the Dnipro Delta and floodplain areas. The

total irrigated area in Kherson, Zaporizhzhia, and Dnipropetrovsk regions reached 584,000 hectares, while the planned area exceeded 900,000 hectares. The demolition of Kakhovka Hydropower Plant on June 6, 2023, caused one of the largest environmental disasters in the history of Ukraine, resulting in the loss of 18 km³ of freshwater and the destruction of irrigation systems over an area exceeding 584 thousand hectares. Thus, the destruction of Kakhovka HPP dam caused systemic destabilization of the country's food security and the regional agricultural economy. A comprehensive assessment of the consequences of this environmental crisis covers several key areas: the formation of new agroclimatic conditions in the steppe zone, increased risks of soil degradation and desertification, threats to the socio-economic stability of the region, and the need to develop new models for agricultural adaptation. The aim of this study is to assess the spatial and temporal changes in the state of agricultural resources in Dnipropetrovsk, Zaporizhzhia, and Kherson regions resulting from the drainage of Kakhovka Reservoir during the period 2020–2025 using Earth remote sensing data. For a comprehensive assessment of transformations in vegetation cover and the water regime of agricultural landscapes, four spectral indices were applied: NDVI, SAVI, NDWI, and NMDI. The analysis was conducted using Google Earth Engine, QGIS, Copernicus Open Access Hub, and Sentinel Hub EO Browser platforms. Agricultural lands within 50 km of the former reservoir were examined and compared with more distant areas. The results confirmed a sharp decline in vegetation activity after June 2023, which was statistically verified using t-tests and the Mann–Whitney test. The most significant changes were recorded in Kherson region: NDVI decreased by 55%, SAVI by 57%, NDWI by 88%, and NMDI by 44%. In Zaporizhzhia region, the decline ranged from 25% to 38%, while in Dnipropetrovsk region it ranged from 26% to 30%. The analysis of the indices revealed a substantial increase in areas affected by extreme drought, particularly in Kherson region. The use of satellite data is an effective tool for studying transformations of vegetation cover and water regime conditions resulting from the destruction of Kakhovka Reservoir and climate change. The obtained results are relevant for the development of national and regional irrigation restoration programs and measures for adapting agricultural production to climate change based on the principles of reducing greenhouse gas emissions in agricultural production, achieving a balance between soil degradation and restoration, and forming bioenergy low-carbon agroecosystems.

Key words: remote sensing, spectral indices, NDVI, SAVI, NDMI, NDWI, vegetation cover, invasive species, drought, climate change, degradation.

Sherstyuk D., Iliencko T. Specialized chlorophyll content indices as a tool for monitoring the state of

agroecosystems under climate change. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 98–114.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: tilienko@gmail.com

Intensive anthropogenic activity exerts substantial pressure on the environment, complicating robust attribution of climate change and its impacts on vegetation. Conventional monitoring approaches, particularly the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), do not always allow a clear separation of natural climatic drivers from anthropogenic influences when analysing large areas. This creates a need for more sensitive and discriminating methods for assessing vegetation condition under ongoing climate change. The article examines the assessment of climate change impacts on the vegetation cover of Ukraine using modern Earth Observation techniques and satellite data. The primary objective was to justify the use of specialised chlorophyll indices (CVI, CARI, MTVI2, MCARI) as a more informative alternative to traditional NDVI for differentiating natural climatic factors from anthropogenic impacts. Using a test site in Vyshhorod district (Kyiv region), we analysed a range of land-cover types – water bodies, agricultural fields, forests, grasslands and urban areas – based on Sentinel-2 imagery with a spatial resolution of 10–20 m. Geospatial processing and visualisation were carried out in a GIS environment using QGIS. For validation, statistical analysis of climatic variables was undertaken using data from the NASA Giovanni platform (AIRS), encompassing CO₂ concentrations and temperature dynamics over Ukraine for 2015–2022. The results showed that specialised chlorophyll indices provide a wider range of values than NDVI, allowing a more accurate characterisation of vegetation physiological status and the detection of even subtle changes in canopy condition. NASA data revealed a statistically significant increase in mean annual temperature of 1.2–1.5°C and a rise in CO₂ concentration by 15–20 ppm, which correlate with an extension of the growing season by 2–3 weeks and an increase in mean chlorophyll index values by 15–25%. The CARI index exhibited particular sensitivity to species composition, enabling differentiation of forest stand types and the identification of artificial objects. Combined analysis of CVI, CARI and MCARI together with CO₂ dynamics made it possible to delineate areas where vegetation change is primarily driven by climatic factors. The findings confirm that the use of specialised chlorophyll indices, in conjunction with climatic indicators, provides a more objective assessment of vegetation status and helps to disentangle climatic signals from confounding anthropogenic influences. The results emphasise the need for continued monitoring of spatio-temporal patterns of change to support the development of adaptive management strategies for natural and agro-ecosystems in Ukraine under global climate pressures.

K e y w o r d s: Sentinel-2, CVI, CARI, MTVI2, MCARI, QGIS, climatic indicators, Copernicus BROWSER, vegetation cover.

Ilienکو T.¹, Tsymbal Ya.¹, Alekseienko M.¹, Koval V.², Breheda S.² Humic state of soils in Poltava region. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 115–121.

¹*State Institution "Institute of Soil Protection of Ukraine"*

²*Northeastern Interregional Center of the State Institution "Institute of Soil Protection of Ukraine"*

e-mail: ilyenkoA@ukr.net

The humus state of soils in Poltava region was studied. The dynamics of humus content in the soils of the region during five rounds (1996–2020) of agrochemical certification of agricultural lands was summarized. The discrepancy in the processes of stabilization of humus content in the region as a whole in the XI round (2016–2020) compared to the VII round (1996–2000) was established against the background of a decrease in the rates of application of organic fertilizers and a significant decrease in the surveyed area. It was determined that the humus content during the studied period remained relatively stable (3.15–3.39%) and corresponded to an increased level of provision, despite a significant decrease in the volume of application of organic fertilizers (from 15.5 to 5.0 t/ha). Thus, in 1996, 4.7 tons of organic fertilizers were applied per 1 hectare of sown area, and in 2020, only 0.9 t/ha. It was established that the stabilization of humus content occurs due to changes in the structure of sown areas in crop rotations and minimizing soil cultivation, which has been widely implemented in recent years. A reduction in the survey area from 1037.5 to 371.7 thousand hectares was recorded, which did not significantly affect the weighted average humus index. In particular, the surveyed area of agricultural land in the XI round decreased by 665.8 thousand hectares or by 64.2% compared to the VII round, respectively. According to the results of the XI round of agrochemical certification of soils in the Poltava region, it was established that most districts are characterized by an increased (12 districts) and average (7 districts) level of humus content, only 2 districts – high. The highest humus content was recorded in Velykobagachansky (4.40%) and Karlivsky (4.22%) districts, the lowest – in Chornukhynsky (2.67%). Analysis of dynamics for 1996–2020 showed that in 12 districts there was an increase in humus content (by 0.02–0.81%), while in 13 districts there is a tendency to its decrease (by 0.01–4.10%). In general, the results indicate a decrease in the share of soils with an increased humus content and an increase in the share with an average one, which indicates a deterioration in the humus state of the region's soils. One of the significant sources of restoring the humus state of the soil is the application of straw and other organic residues by plowing them in. The systematic

use of straw as an organic fertilizer stimulates the development of soil microflora, contributes to the improvement of the nutrient balance and biological activity of the soil environment.

K e y w o r d s: agrochemical certification, monitoring, survey area, dynamics, organic fertilizers, by-products, plant residues, biologization, agrotechnical measures, district.

Rylskyi O.¹, Petrusha Yu.², Prytula N.¹, Dombrovskyi K.¹, Bezugly M.³ Peculiarities of the application of wastewater post-treatment technology for irrigation of agricultural lands under conditions of global climate change. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 122–130.

¹*Zaporizhzhia National University*

²*National University «Zaporizhzhia Polytechnic»*

³*State Biotechnological University*

e-mail: Rylskyi@ukr.net

Today, climate change on planet Earth directly affects all structural components of the biosphere, including the most important component of life – Water. There is an urgent need to develop practical measures that will reduce the danger to humans due to the catastrophic shortage of drinking water. The authors propose to use treated wastewater completely (after biological treatment) for irrigation of agricultural lands. In this case, wastewater should pass through artificially created post-treatment systems: bioplateaus (artificial ponds) taking into account the local landscape on the way from treatment facilities to river beds. This will allow to implement the principle of the «bioconveyor». Climate change requires the increasingly widespread use of irrigation in the cultivation of agricultural crops in Ukraine, especially in the southern regions of the country. A high level of realization of the genetic potential of modern varieties and hybrids can be ensured only under the condition of optimal water supply of plants. It is fundamentally important to choose the right strategy for restoring irrigation of the lands of the largest Kakhovka irrigation system in Ukraine in the post-war period. The existing irrigation system, which was destroyed by the invaders in 2023, was based mainly on traditional methods of sprinkler and, on small areas, surface drip irrigation, which are significantly outdated. The authors present their own results of using the latest irrigation technology – subsoil drip irrigation of plants through pipelines at a depth of 30–40 cm in the arid climate of Zaporizhzhia region, which confirm the significant advantages of this method over traditional ones. That is why the authors propose to restore Kakhovka irrigation system using subsoil drip irrigation methods, which will reduce water consumption by almost half to obtain a unit of plant production and increase crop yield by 20–30%, and provide economic calculations of the feasibility of such strategy. The path of water after municipal treatment facilities

directly to large rivers (such as the Dnipro) must be prohibited in Ukraine. Instead, the water should pass through the proposed system of additional purification and be widely used as a source of water for irrigation of agricultural lands. In this way, artificial «surface waters» on the fields, filtering through the soil layer, will undergo maximum repeated purification by a vast number of soil microorganisms-decomposers, and will enter small rivers in a maximally purified state.

Key words: water shortage, wastewater treatment, small rivers, wastewater, drip irrigation, Kakhovka irrigation system.

Bunas A., Sherstoboeva O., Bondarenko K., Dvoretzkyi M. Integrated approach to assessing the structure and functional activity of soil microbiomes. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 131–139.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: bio-206316@ukr.net

The microbiome is a community of microorganisms that live in a specific environment, together with the microbial structures and substances they produce. Microbiomes with specific composition and functions can be found in different environments. The combination of microorganisms in each environment is unique. The most complex and highly variable is the soil microbiome, which includes soil microbiota as well as microbial structures, genetic elements, and relic DNA. At the global level, the microbiome is considered a critical bioindicator of soil health and food security, which is reflected in international environmental strategies and regulatory documents. The scale of pesticide use worldwide and in Ukraine has been analyzed, and their negative effects on the structure of microbial communities, metabolic activity, and ecosystem stability have been demonstrated. The impact of chemical plant protection products on functional microbial networks, the formation of resistant populations, the reduction of biodiversity, and disturbances of carbon and nitrogen cycles has been described, which increases environmental risks. It has been shown that an alternative approach for the restoration and regulation of microbiomes is the biological protection of agroecosystems, which involves the use of bacteria, micromycetes, streptomycetes, and viral agents. One of the main advantages of biological products is their ability to activate microbial networks by filling empty ecological niches and thus ensuring the stability and resilience of the soil environment. At the same time, microbiome recovery is not an automatic process and therefore requires systematic control and scientifically based monitoring. Quantitative assessment of microbiomes is carried out using cultural methods, molecular methods, and metagenomics. Cultural methods are accessible and effective for basic assessment but do not reflect non-cultivable forms. Molecular methods allow monitoring of functional genes but do not provide information on

microbial abundance and do not allow evaluation of the metabolic activity of the microbiome. Quantitative metagenomics makes it possible to assess the absolute abundance of genes and taxa; however, it is resource-intensive, requires high expertise, and depends on expensive equipment. Functional characteristics of the soil microbiome are evaluated based on microbial biomass (rehydration method, CFE, PLFA), enzymatic activity, and the intensity of CO₂ emission. Microbial biomass is a labile component of soil organic matter that rapidly responds to changes in the ecosystem. A high fungi-to-bacteria ratio, as well as the dominance of certain taxa (*Azotobacter*, *Streptomyces*), serves as an indicator of soil stability and recovery after anthropogenic impacts. Modern approaches recommend integrated soil health indices that combine taxonomic, quantitative, and functional indicators, as well as ecological stability modeling to predict long-term changes. Thus, a systematic study of the soil microbiome using combined methods makes it possible to assess the effects of chemical and biological plant protection products, reduce pesticide pressure, restore soil functional activity, and support the sustainability of agroecosystems.

Key words: biological protection, biological products, health soil, qPCR, PLFA, CO₂ emission, microbial biomass, soil.

Kravchenko Y., Beznosko I. Successional dynamics of soil microbial communities under anthropogenic impact: approaches to mathematical modeling. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 140–151.

Institute of Agroecology and Environmental Management of the NAAS

e-mail: yuriykravchenko2017@gmail.com

The article summarizes modern scientific approaches to the study and modeling of soil microorganism succession in anthropogenic ecosystems, with a particular focus on Ukrainian agroecosystems in the context of climate change and military stress. It is shown that soil microbiota is a key regulator of the carbon, nitrogen, and other nutrient cycles, and that succession changes in microorganisms determine soil fertility, stability, and self-regeneration capacity. The contribution of leading foreign and Ukrainian scientists to the development of microbial succession concepts is analyzed, in particular trait-based models, microbially explicit models such as MIM-ICS, and approaches that take into account microbial biomass and necromass in humus formation processes. It is shown that soil contamination with heavy metals, explosive residues, and fuel and lubricants leads to regressive succession, simplification of the structure of the microbiocenosis, and disruption of ecosystem functions. The main methods of modeling microbial succession are considered: classical mathematical models (Mono, Lotka–Volterra, regression approaches), network analysis, stochastic and zero assembly models, as well as modern machine learning

methods (Random Forest, Gradient Boosting, neural networks, MaxEnt). The feasibility of their use for predicting soil degradation and restoration, assessing the ecological status of agroecosystems, and developing practical recommendations for the reclamation of land affected by anthropogenic and military influences is substantiated. The results obtained and the generalized approaches to modeling the succession of soil microorganisms will contribute to a deeper understanding of the mechanisms of soil ecosystem functioning under conditions of intense anthropogenic and military impact. The use of modern mathematical and computer models will improve the accuracy of predicting changes in microbiocenoses, enable the timely identification of soil degradation risks, and justify scientifically sound measures for their restoration. In practical terms, this research will contribute to the development of environmentally safe farming technologies, the optimization of the use of biological products, the preservation of soil fertility and food security in Ukraine, and the formation of a scientific basis for the restoration of agroecosystems in areas affected by military action.

K e y w o r d s: soil microbiota, microbial succession, anthropogenic ecosystems, agrocenoses, mathematical modeling, functional characteristics of microorganisms, biodiversity, climate change, military pollution, soil restoration, bioindication.

Bolokhovska V.¹, Nahorna O.¹, Jance L.^{2,3}, Boroday V.^{2,4}, Yakovenko D.^{1,2} Ecological aspects of the formation of winter wheat productivity under the use of microbial preparations. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 152–162.

¹*BTU Biotechnology Company*

²*Institute of Agroecology and Environmental Management of the NAAS*

³*National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine*

⁴*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

e-mail: veraboro@gmail.com

Optimisation of mineral nutrition plays a significant role in the productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). Excessive application of mineral fertilisers leads to significant environmental impact and reduced production profitability. The use of biological products based on PGPB bacteria makes it possible to reduce the application rates of mineral nitrogen fertilisers without compromising yield and grain quality, which is in line with the principles of sustainable agriculture. The impact of the multifunctional biological products Groundfix and Azotohelp on the productivity and quality of winter wheat grain in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine was assessed. The use of biological products ensured optimal crop condition before wintering, as confirmed by a high correlation between the biometric parameters

of autumn plant development and subsequent yield ($r=0.75-0.90$). The maximum efficiency of grain productivity formation was observed with the pre-sowing application of a mixture of Azotohelp and Groundfix, as well as with a combination of seed treatment with Azotohelp (1.5 l/t) + foliar feeding (0.5 l/ha) in the spring tillering phase, which ensured an increase in the number of grains in the ear and an increase in the weight of 1000 seeds by 6.0% (to 49.2–49.4 g). The synergistic effect of the combined use of Azotohelp and Groundfix has been proven, resulting in the highest yield increase – 16.06% relative to the control. The biological action of the preparations is aimed at a balanced redistribution of assimilates, which is confirmed by a decrease in the ratio of by-products to the main product to 0.84–0.87 (compared to 0.96 in the control). The combined treatment of seeds and crops with Groundfix and Azotohelp had a positive effect on the quality characteristics of the grain. The natural weight increased by an average of 9.6 g/l, and vitreousness increased to 58.7%. The crude gluten content increased by 10.4–11.8%. Formation of winter wheat plant productivity when applying Azotohelp (3 l/ha) and Groundfix (1.5 l/ha) during pre-sowing cultivation + Azotohelp (1.5 l/ha), seed treatment with Azotohelp (1.5 l/t) and at the standard rate (0.5 l/ha) during the spring tillering phase were found to be the most effective on average over the years of research. The results confirm the feasibility of using Azotohelp and Groundfix in winter wheat cultivation technology.

K e y w o r d s: biological products, *Triticum aestivum* L., yield, biometric indicators, grain quality.

Sashko I.¹, Pryvedeniuk N.² Effect of biological preparations on the sowing qualities of hyssop seeds. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 163–170.

¹*Poltava State Agrarian University*

²*Research Station of Medicinal Plants of IAEM of NAAS*

e-mail: privedenyuk1983@gmail.com

Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) is a valuable perennial medicinal plant that has gained increasing importance in recent years due to the expanding use of plant raw materials in the pharmaceutical, food, and cosmetic industries. The efficiency of hyssop cultivation largely depends on the quality of seed material, primarily seed germination energy, germination capacity, and the intensity of early seedling growth. The formation of uniform and vigorous seedlings is a key prerequisite for realizing the productive potential of plants, while seed quality parameters may vary significantly depending on the conditions and methods of pre-sowing seed treatment. In this context, the search for effective and environmentally safe approaches to stimulate seed germination of medicinal plants using biological products is of particular relevance. The aim of this study was to evaluate the effect of pre-

sowing seed treatment of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) with biological products and an organo-mineral fertilizer on the main indicators of seed quality. The object of the study was seeds of the hyssop cultivar 'Blankyt'. The experiment involved microbiological preparations based on antagonist fungi *Trichoderma lignorum* and *Trichoderma virens*, as well as rhizosphere bacteria *Pseudomonas fluorescens*. In addition, an organo-mineral fertilizer containing a complex of chelated micronutrients and biologically active substances was applied. A separate experimental variant included the combined application of all biological products together with the organo-mineral fertilizer. Seeds treated with distilled water served as the control. Pre-sowing seed treatment was carried out by moistening the seeds in appropriate working solutions of the preparations, followed by incubation and drying. Seed quality parameters were determined using a laboratory germination method in Petri dishes under controlled conditions. Germination energy, germination capacity, and seedling length were assessed. The results of the study demonstrated that microbiological preparations had a significant effect on the seed quality parameters of hyssop. The highest germination energy (73%) was recorded following seed treatment with the preparation based on *Trichoderma lignorum*, whereas the application of *Trichoderma virens* resulted in the highest germination capacity (92%) and a substantial increase in seedling length (31.2 mm). The use of the organo-mineral fertilizer alone had a limited effect on germination energy. The greatest intensity of early seedling growth was observed under combined pre-sowing seed treatment, indicating a synergistic effect of the biological products and the fertilizer. The obtained results confirm the feasibility of using biological products in hyssop cultivation technologies to improve seed quality and promote the ecological sustainability of medicinal plant raw material production.

Key words: *Hyssopus officinalis* L., *Trichoderma lignorum*, *Trichoderma virens*, *Pseudomonas fluorescens*, organo-mineral fertilizer, seed germination, germination energy, seedling length.

Kichigina O., Tsybro Yu., Mykhailyk S., Smulka I. Trends in formation of hybrid composition of common corn in Ukraine. Agroecological journal. 2026. No. 1. P. 171–180.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: seednlen@ukr.net

The trends in the formation of the hybrid composition of common corn (*Zea mays* L.) in Ukraine were analyzed based on data from the State Register of Plant Varieties Suitable for Distribution in Ukraine. The total number of registered hybrids as of 31 December 2025 was established and their quantitative composition and dynamics of its formation from 2005 to 2025 were traced. The ratio of Ukrainian and for-

eign hybrids in supplying the domestic market with common corn seeds was determined and the hybrid composition of the crop was analyzed according to such indicators as the recommended growing area, direction of use, and ripeness group. As of 31 December 2025, the Register of Varieties contains 1,223 hybrids, which is 932 more than in 2005 (291 hybrids). The maximum value for the research period was recorded in 2024 – 1,547 hybrids. The dynamics of hybrid resource formation during 2005–2025 is characterized by a gradual increase with the most intensive replenishment in 2019–2023 (from 107 to 208 hybrids annually). The largest number of new registrations was recorded in 2023 – 208 hybrids, the smallest – in 2009 (1 hybrid). In general, over a twenty-year period, the quantitative composition of the Register of Varieties has increased more than fourfold. As of the end of 2025, the share of foreign-bred hybrids is 58% (710 units), and domestic-bred hybrids – 42% (513 units). By country of origin, France (432 hybrids) and Ukraine (340) are the leaders, with a combined share of 63% of the total. The significant share of Ukrainian hybrids indicates the high potential and competitiveness of domestic selection. In terms of distribution by growing zones, the largest group – 360 units (33%) – consists of hybrids recommended for all three soil and climatic zones – the Steppe, Forest-Steppe, and Polissia, which indicates their high ecological plasticity. In terms of use, grain-type hybrids prevail, which corresponds to the export orientation of the industry and the structure of corn production in Ukraine. In terms of maturity groups, medium-early hybrids dominate – 47% (FAO 200–299) and medium-maturing hybrids – 39% (FAO 300–399), which most fully correspond to the agroclimatic conditions of Ukraine. The results confirm the formation of a powerful and diverse hybrid composition of common corn, characterized by a steady growth trend and adaptation to modern production challenges.

Key words: *Zea mays* L., hybrids, growing area, country of origin of the hybrid, intended use, maturity group, FAO.

Dutova H., Tkachyk S., Liashenko S., Kyrylchuk A. Assessment of environmental factors influence on productivity and quality of grain of new varieties of winter soft wheat. Agroecological journal. 2026. No. 1. P. 181–191.

Ukrainian Institute for Plant Variety Examination
e-mail: 2021dutova@gmail.com

The conducted research demonstrated that the productivity and grain quality of winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) are strongly influenced by soil and climatic conditions of the growing area. The comparative evaluation of 28 new cultivars across the Steppe, Forest-Steppe, and Polissia zones of Ukraine during the 2022/23–2023/24 growing seasons confirmed the decisive role of environmental factors in the realization of varietal potential. The highest grain

yield levels were consistently recorded in the Forest-Steppe zone, where favorable moisture and temperature regimes allowed cultivars to fully express their genetic productivity. Lower yield values were observed in the Steppe and Polissia zones, reflecting the limiting effects of drought stress and cooler climatic conditions, respectively. Despite these differences, all tested cultivars exceeded the conditional standard, indicating a generally high yield potential of modern breeding material. Among the studied genotypes, the cultivar DSV 2129120 demonstrated the highest yield performance and relative stability across all agroecological zones, confirming its high adaptive capacity. Grain quality parameters showed clear zonal differentiation. Protein and wet gluten contents were highest in the Steppe and Forest-Steppe zones and declined toward Polissia, which is consistent with established agroecological patterns of wheat grain formation. Cultivars Hapter, Invictus, and Bilotserkivchanka were distinguished by higher and more stable grain quality indicators, making them valuable for both production and breeding purposes. Overall, the results emphasize the importance of zone-specific cultivar selection as a key component of sustainable wheat production under conditions of increasing climatic variability. The identified high-yielding and quality-stable cultivars can be recommended for targeted cultivation in specific agroecological zones of Ukraine, contributing to improved grain production efficiency and agroecosystem resilience.

Key words: *Triticum aestivum* L., variety testing, yield potential, protein and gluten, climatic adaptation, agroecological zones, breeding potential.

Davydiuk H., Shkarivska L., Klymenko I., Dovbush N., Kushchuk M. Ecological approaches to agrotechnical measures for growing corn for grain on soil contaminated with heavy metals. *Agroecological journal*. 2026. No. 1. P. 192–199.

NSC «Institute of Agriculture of NAAS»

e-mail: amndavydiuk@gmail.com

Research into the prospects of growing corn for grain in conditions of soil contamination with heavy metals and climate change is important for ensuring food security and protecting the environment. The article is devoted to the study of reducing the harmful effects of heavy metals on soil used for agricultural purposes. The aim is to establish the features of the application of agrotechnical measures for growing

grain corn in conditions of soil contamination with heavy metals. The following research methods were used: polygon monitoring, field experiments, laboratory and statistical methods. It was determined that the application of agrotechnical measures contributed to an increase in humus content by 19.0–26.0% (1.52–1.67%) compared to previous studies. The level of hydrolytic acidity decreased slightly and was neutral, the exchangeable calcium supply remained average, and the magnesium supply remained low. The amount of absorbed bases increased by 1.4–3.3 m-eq/100 g of soil from a very low level to low and medium levels (9.7–11.1 m-eq/100 g). Analysis of soil nutrient content confirmed the impact of agrotechnical measures on the agrochemical properties of the soil. The amount of mobile phosphorus compounds increased by 16.0–19.2%, ensuring a very high level of this element – 295.9–348.9 mg/kg. The content of mobile potassium compounds increased by 12.3–14.2%, reaching a very high level of 193.9–266.6 mg/kg of soil. There is a tendency toward a decrease in the number of mobile forms of lead by 6.1–31.6%, cadmium by 8.3–16.7%, and zinc by 9.0–30.0% in the soil, depending on the level of heavy metal contamination of the ecotopes, as well as a 27.3% decrease in the number of mobile copper compounds. However, the amount of mobile forms of lead and copper exceeded the maximum permissible concentration in gray forest soil. Corn yield was characterized by insignificant variability over the years ($V=6.8\%$), and the content of copper, zinc, lead, and cadmium did not exceed the maximum permissible concentration for feed purposes. The protein content in all variants of the experiment ranged from 8.2 to 9.8%, starch – 73.3–74.5%, vegetable oil – 4.24–4.41%. It has been established that under conditions of technogenic soil contamination with heavy metals, the application of additional agrotechnical measures (periodic liming, application of crop by-products treated with a biodestructor, and treatment of seeds with a complex mycorrhiza-forming preparation with detoxifying properties) under continuous cultivation of corn for grain allows obtaining commercial grain suitable for feed and technical purposes with a grain yield of 6.7–8.4 t/ha. Research into the characteristics of obtaining stable crop yields on soils contaminated with heavy metals and the search for ways to reduce their contamination is a promising area of research.

Key words: anthropogenic load, soil pollution, landfill monitoring, soil fertility, phytoremediation.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

АЛЕКСЕЄНКО Марина Володимирівна, Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», м. Київ, Україна (e-mail: alekseenko mv@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3078-7759>)

БЕЗНОСКО Ірина Володимирівна, доктор біологічних наук, старший дослідник, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: beznoscoirina@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2217-5165>)

БЕЗУГЛИЙ Микола Дмитрович, доктор сільськогосподарських наук, професор, академік НААН, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна (e-mail: bezugly_m@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1659-3029>)

БОЛОХОВСЬКА Валентина Антонівна, кандидат технічних наук, Біотехнологічна компанія BTU, с. Софіївська Борщагівка, Бучанський р-н, Київська обл., Україна (e-mail: valent2006@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2728-4589>)

БОНДАРЕНКО Кирило Ігорович, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: kirill.bondarenko666@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3429-0897>)

БОРОДАЙ Віра Віталіївна, доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна; Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна (e-mail: veraboro@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-8646>)

БРЕГЕДА Сергій Григорович, Північно-східний міжрегіональний центр Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України», с-ще Степне, Полтавський р-н, Полтавська обл., Україна (e-mail: poltavaptc@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5904-6547>)

БУНАС Альона Анатоліївна, кандидат біологічних наук, старший дослідник, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: bio-206316@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4806-7004>)

ГОНЧАРЕНКО Ігор Вікторович, доктор біологічних наук, професор, Інститут еволюційної екології Національної академії наук України, м. Київ, Україна (e-mail: goncharenko.igor@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-3270>)

ДАВИДЮК Ганна Володимирівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Національний науковий центр «Інститут землеробства Національної академії аграрних наук України», с-ще Чабани, Фастівський р-н, Київська обл., Україна (e-mail: andavydiuk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3877-2837>)

ДВОРЕЦЬКИЙ Михайло Володимирович, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: dvoreckij7@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9324-7696>)

ДИРДА Вікторія Олександрівна, Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква, Київська обл., Україна (e-mail: viktoryd5706@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4667-8540>)

ДОВБАШ Надія Іванівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Національний науковий центр «Інститут землеробства Національної академії аграрних наук України», с-ще Чабани, Фастівський р-н, Київська обл., Україна (e-mail: Nadezda_D@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4741-2657>)

ДОМБРОВСЬКИЙ Костянтин Олегович, кандидат біологічних наук, доцент, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна (e-mail: dombrov1717@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6965-6989>)

ДРЕБОТ Оксана Іванівна, доктор економічних наук, професор, академік НААН, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: drebot_oksana@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2681-1074>)

ДУТОВА Галина Анатоліївна, кандидат сільськогосподарських наук, Український інститут експертизи сортів рослин, м. Київ, Україна (e-mail: 2021dutova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7987-5840>)

ЖИТОВА Олена Петрівна, доктор біологічних наук, професор, Поліський національний університет, м. Житомир, Україна (e-mail: elmi1969@meta.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2572-4163>)

ЗАЯЧКІВСЬКА Богдана Богданівна, кандидат економічних наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна (e-mail: b_zayachkivska@nubip.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-0962-5998>)

ІЛЬЄНКО Тетяна Володимирівна, кандидат сільськогосподарських наук, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-5449>)

ІЛЬЄНКО Тетяна Олександрівна, Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», м. Київ, Україна (e-mail: ilyenko4@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8553-1073>)

КАЛІНСКИЙ Павло Володимирович, Інститут еволюційної екології Національної академії наук України, м. Київ, Україна (e-mail: kalinskyipavlo@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9213-3772>)

КИРИЛЬЧУК Анжела Миколаївна, кандидат сільськогосподарських наук, Український інститут експертизи сортів рослин, м. Київ, Україна (e-mail: angela.kyrylchuk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3948-5810>)

КІЧІГІНА Ольга Олександрівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: seednlen@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0879-627X>)

КЛИМЕНКО Ірина Іванівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Національний науковий центр «Інститут землеробства Національної академії аграрних наук України», с-ще Чабани, Фастівський р-н, Київська обл., Україна (e-mail: Ira_Klimenko@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9449-7377>)

КОВАЛЬ Володимир Віталійович, Північно-східний міжрегіональний центр Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України», с-ще Степне, Полтавський р-н, Полтавська обл., Україна (e-mail: poltavaptc@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8949-4240>)

КОМАРОВА Наталя Вікторівна, доктор філософії, Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква, Київська обл., Україна (e-mail: komarova_nv@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9347-455X>)

КОНЩУК Василь Васильович, доктор біологічних наук, професор, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: konishchuk_vasyl@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4115-5642>)

КОНОНЕНКО Наталя Олексіївна, Відокремлений структурний підрозділ «Аграрно-економічний фаховий коледж Полтавського державного аграрного університету», м. Полтава, Україна (e-mail: teacher.sg.04@agrokoledg.

poltava.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5755-815X>)

КРАВЧЕНКО Юрій Вікторович, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: yuriykravchenko2017@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0521-9768>)

КУЗЬМЕНКО Інна Сергіївна, ДУ «Держґрунтохорона», м. Київ, Україна (e-mail: nessi_ku@ukr.net@; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7607-9435>)

КУЧМА Тетяна Леонідівна, кандидат сільськогосподарських наук, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: tanyakuchma@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9328-5919>)

КУЩУК Марина Анатоліївна, Національний науковий центр «Інститут землеробства Національної академії аграрних наук України», с-ще Чабани, Фастівський р-н, Київська обл., Україна (e-mail: marinakushyk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3956-4423>)

ЛІЩУК Алла Миколаївна, доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-9365>)

ЛЯШЕНКО Світлана Олександрівна, Український інститут експертизи сортів рослин, м. Київ, Україна (e-mail: 17041@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-230X>)

МИХАЙЛИК Світлана Миколаївна, кандидат сільськогосподарських наук, Український інститут експертизи сортів рослин, м. Київ, Україна (e-mail: svetlana.nik2519@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9981-0545>)

МОРОЗ Віра Василівна, кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна (e-mail: vera_moroz@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1258-1530>)

МОСКАЛЕНКО Антоніна Анатоліївна, кандидат технічних наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна (e-mail: moskalenko_a@nubip.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7538-8044>)

НАГОРНА Ольга Володимирівна, м. Ладижин, Вінницька обл., Україна (e-mail: olganova2008@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6628-9383>)

НЕПОЧАТЕНКО Віктор Андрійович, доктор фізико-математичних наук, доцент, Білоцерківський національний аграрний університет,

м. Біла Церква, Київська обл., Україна (e-mail: VictorNepochatenko; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6798-7880>)

ОРИХІВСЬКА Оксана Михайлівна, Відокремлений структурний підрозділ «Аграрно-економічний фаховий коледж Полтавського державного аграрного університету», м. Полтава, Україна (e-mail: orekhovskaja.ok@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5252-2018>)

ПАЛАПА Надія Василівна, доктор сільськогосподарських наук, професор, Інститут агро-екології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: palapa60@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3748-6414>)

ПЕНЬКОВА Світлана Василівна, доктор філософії в галузі агрономії, асистент кафедри лісового господарства, Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква, Київська обл., Україна (e-mail: svitlana1986r@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6256-3122>)

ПЕТРУША Юлія Юріївна, кандидат біологічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка, м. Запоріжжя, Україна (e-mail: Yulia.ZNU@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-2877>)

ПРИВЕДЕНЮК Назар Валерійович, кандидат сільськогосподарських наук, Дослідна станція лікарських рослин Інституту агро-екології і природокористування НААН, с. Березоточа, Лубенський р-н, Полтавська обл., Україна (e-mail: privedenyuk1983@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0748-8083>)

ПРИТУЛА Наталя Михайлівна, кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна (e-mail: prytulanataliam@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8949-0824>)

РАЙЧУК Людмила Анатоліївна, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Інститут агро-екології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: edelvice@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2552-4578>)

РИЛЬСЬКИЙ Олександр Федорович, доктор біологічних наук, професор, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна (e-mail: rylsky@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9631-1828>)

РУДЕНКО Валерій Петрович, доктор географічних наук, професор, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна (e-mail: v.rudenko@chnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7542-4399>)

РУДЕНКО Світлана Степанівна, доктор біологічних наук, професор, Донецький національний університет імені Василя Стуса, м. Вінниця, Україна (e-mail: rudenko.prof.eco@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7248-016X>)

РУДЕНКО Степан Валерійович, кандидат географічних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна (e-mail: rudenkostepan@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8072-2862>)

САШКО Ігор Володимирович, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна (e-mail: ihor.sashko@pdau.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4411-8425>)

СМУЛЬСЬКА Іванна Володимирівна, Український інститут експертизи сортів рослин, м. Київ, Україна (e-mail: ivanna1973@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9675-0620>)

СТЕЦЕНКО Арсеній Русланович, Відокремлений структурний підрозділ «Аграрно-економічний фаховий коледж Полтавського державного аграрного університету», м. Полтава, Україна (e-mail: arsiarsi2009@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6711-8247>)

СТРИГІНА Оксана Анатоліївна, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква, Київська обл., Україна (e-mail: oksana9269@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6670-726X>)

ТКАЧИК Світлана Олександрівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Український інститут експертизи сортів рослин, м. Київ, Україна (e-mail: s-s-tk@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2402-079X>)

ХОМ'ЯК Іван Владиславович, кандидат біологічних наук, доцент, Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, Україна (e-mail: khomyakivan@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0080-0019>)

ЦИБРО Юлія Анатоліївна, Інститут агро-екології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: u.cubro@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7775-9283>)

ЦИМБАЛ Ярослав Станіславович, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», м. Київ, Україна (e-mail: tsimbal.ya@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0414-885X>)

ШВИДЕНКО Ірина Костянтинівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: favor09@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6135-8968>)

ШЕРСТОБОЄВА Олена Володимирівна, доктор сільськогосподарських наук, професор, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: ovsher@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8239-0847>)

ШЕРСТЮК Денис Михайлович, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: volaf666@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1687-5974>)

ШКАРІВСЬКА Людмила Іванівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Національний науковий центр «Інститут землеробства Національної академії аграрних наук України», с-ще Чабани, Фастівський р-н, Київська обл., Україна (e-mail:

Luda_Shkarivska@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4928-3238>)

ШУМИГАЙ Інна Вікторівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: innashum27@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0432-2651>)

ЯКОВЕНКО Дмитро Олексійович, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна; Біотехнологічна компанія BTU, с. Софіївська Борщагівка, Бучанський р-н, Київська обл., Україна (e-mail: d.yakovenko@btu-center.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0008-8239-7684>)

ЯНСЕ Лілія Амінівна, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, член-кореспондент НААН, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: liliya.janse@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2567-5907>)

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

Редакція «Агроекологічного журналу» приймає до розгляду оригінальні статті, підготовлені на високому науковому рівні, що мають важливе теоретичне, практичне значення та висвітлення результатів наукових досліджень вітчизняних та зарубіжних авторів. У журналі публікуються закінчені експериментальні і дослідні роботи, а також оглядові статті, які раніше не були надруковані за наступними напрямками: актуальні проблеми екології, аграрні науки і продовольство, біологічні науки, економічні науки, лісове господарство, технологія виробництва та переробки продукції тваринництва.

Кожна стаття обов'язково проходить перевірку на плагіат та аноніміне рецензування провідними фахівцями з відповідного наукового напрямку. За висновком рецензента стаття може бути рекомендована до друку чи відхилена або повернена для доопрацювання.

Подані статті мають бути структуровані відповідно до вимог ВАК України щодо наукових статей (Постанова Президії ВАК України від 15.01.2003 р. № 7-05/1), зокрема:

- постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;
- аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання визначеної проблеми, і на які спирається автор;
- виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття;
- викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.

Статті подають українською або англійською мовами. До статті додають анотації українською та англійською мовами обсягом 200–250 слів (1800–2000 знаків), ключові слова (5–10), що не дублюють назву,

а також відомості про авторів (прізвища, ініціали, місце їх роботи/навчання).

Публікації англійською мовою приймаються тільки за умови їх професійного перекладу. За подачі англійського варіанту, перекладеного з допомогою інтернет-перекладачів (напр., Google), матеріали будуть відхилені.

До розгляду приймаються наукові статті обсягом від 10 до 20 сторінок, включаючи всі матеріали (анотації, таблиці, рисунки та бібліографічні списки).

У тексті статті мають бути виділені розділи «ВСТУП», «АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ» «МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ», «РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ», «ВИСНОВКИ», «ЛІТЕРАТУРА».

Розділ «Аналіз останніх досліджень і публікацій», повинен розкрити стан досліджень проблеми у вітчизняній і світовій науковій літературі за останні 5 років.

В описі методики досліджень наводиться детальне викладення методів і методик з посиланням на першоджерело (схеми дослідів, повторність, методи лабораторного аналізу, методи статистичної обробки). Якщо в тексті є абрєвіатура, подавати її в дужках при першому згадуванні. Автори мають дотримуватися правильної галузевої термінології (див. ДСТУ, СОУ), терміни мають бути уніфікованими.

Викладення результатів досліджень має заключатись не в переказі змісту таблиць і рисунків, а у визначенні закономірностей, що з них випливають. В обговоренні результатів слід показати причинно-наслідкові зв'язки між одержаними ефектами, порівняти одержані дані та показати їх новизну. Повторення одних і тих самих даних у тексті, таблицях, графіках неприпустимо.

Література (до 25 джерел) мовою оригіналу оформлюється відповідно до АРА (American Psychological Association) стилю. На кожне джерело в списку літератури повинно бути хоча б одне посилання в тексті,

яке слід вказувати у квадратних дужках із послідовною нумерацією.

Редакція рекомендує уникати посилання на роботи 10-річної давнини і більше. Посилання на власні роботи авторів статті допускається, однак не більше 10% від загальної кількості джерел.

Макет сторінки. Для оригінал-макета використовується формат паперу — А4, орієнтація — книжкова, поля з усіх сторін — 20 мм.

Гарнітури, розміри шрифтів та начертання: для заголовку статті та розділів: Times New Roman — 14 пт, напівжирний, прописні, великі літери; для УДК, основного тексту, анотацій, відомостей про авторів, підписів до рисунків та назв таблиць, літератури, references: Times New Roman — 14 пт; міжрядковий інтервал — 1,5; абзац — 1,25 см.

Типографські погодження та стилі. По центру у першому рядку сторінки вирівнюється тематична рубрика, до якої автор подав свою публікацію. Надалі індекс УДК

набирається і вирівнюється за лівим краєм. Заголовок статті набирається в наступному за УДК рядку і вирівнюється посередині. Потім вказують: прізвища, ініціали авторів (ліміт — п'ять осіб), нижче — місце роботи/навчання, адреса електронної пошти, код ORCID автора (курсивом). Якщо автори з різних установ, після прізвища авторів та назв установ, у яких працюють/навчаються автори, слід проставити один і той самий верхній цифровий індекс. Далі розташовують анотацію та ключові слова мовою оригіналу статті (курсив); текст статті; відомості про авторів.

Таблиці мають бути виконані в Microsoft Office Word; **формули** — у редакторі формул MS Equation; **графіки** — у Microsoft Office Excel, **фотографії** — у форматі .jpg, .tif або надавати оригінали. Також всі рисунки (графіки) додатково надсилаються на окремому аркуші — у Microsoft Office Excel.

Відповідальність за зміст статті несе автор. Рукописів редакція не повертає.