

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

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ



4•2025

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 – Агрономія;
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)*

Пристатейний список літератури продубльовано відповідно до вимог
міжнародних систем транслітерації (зокрема, наукометричної бази SCOPUS)

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 № 6 від 14 листопада 2025 р.)**

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 23578-13418 ПР від 27.09.2018.

Підписано до друку 09.12.2025 р. Формат 70×100/16. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 15,48. Наклад 250 прим. Зам. № АЕ-03–25.
Оригінал-макет та друк ТОВ «ДІА». 03022, Київ-22, вул. Васильківська, 45

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ

4 • 2025



КИЇВ • 2025

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

DREBOT O., Doctor of Economic Sciences, Prof., Academician of NAAS

Executive Secretary

SHUMYHAI I., Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher

BUDZANIVSKA I.,

Doctor of Biological Sciences, Prof. (Ukraine)

VYSOCHANSKA M.,

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

VOVK N.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Ukraine)

GONCHARENKO I.,

Doctor of Biological Sciences, Prof. (Ukraine)

GUDKOV I.,

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

DEMYANYUK O.,

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

DOBRYAK D.,

*Doctor of Economics Sciences, Prof.,
Corresponding member of NAAS (Ukraine)*

ZAITSEV Yu.,

Doctor of Economic Sciences, Prof. (Ukraine)

KONISHCHUK V.,

Doctor of Biological Sciences, Prof. (Ukraine)

KOPIY L.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Ukraine)

KOSTENKO S.,

Doctor of Biological Sciences, Prof. (Ukraine)

LISOVYY M.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Ukraine)

MUDRAK O.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Ukraine)

NAGORNIUK O.,

Candidate of Agricultural Sciences, Docent (Ukraine)

PALAPA N.,

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

PARFENYUK A.,

Doctor of Biological Sciences, Prof. (Ukraine)

SYMOCHKO L.,

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

SYCHOV M.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Ukraine)

STAVETSKA R.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Ukraine)

TARARIKO O.,

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

TERTYCHNA O.,

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

TKACH Ye.,

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

FURDYCHKO O.,

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

CHOBOTKO G.,

Doctor of Biological Sciences, Prof. (Ukraine)

SHERSTOBOEVA O.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Ukraine)

SHERSHUN M.,

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

YUKHNOVSKYI V.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Ukraine)

WALAT W.,

Doctor of Humanities Sciences, Prof. (Poland)

DURSUN S.,

PhD, Prof. (Turkey)

KOWALSKA A.,

*Doctor of Engineering and Technical Sciences,
Docent (Poland)*

COELHO PINHEIRO M.,

PhD, Prof. (Portugal)

SOBCZYK V.,

Doctor of Agricultural Sciences, Prof. (Poland)

OKABE Y.,

Doctor of Economic Sciences, Prof. (Japan)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

ДРЕБОТ О.І., д-р екон. наук, проф., акад. НААН

Відповідальний секретар

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

БУДЗАНІВСЬКА І.Г.,

д-р біол. наук, проф. (Київ)

ВИСОЧАНСЬКА М.Я.,

д-р екон. наук, ст. досл. (Київ)

ВОВК Н.І.,

д-р с.-г. наук, проф. (Київ)

ГОНЧАРЕНКО І.В.,

д-р біол. наук, проф. (Київ)

ГУДКОВ І.М.,

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

ДЕМ'ЯНЮК О.С.,

д-р с.-г. наук, проф., чл.-кор. НААН (Київ)

ДОБРЯК Д.С.,

д-р екон. наук, проф., чл.-кор. НААН (Київ)

ЗАЙЦЕВ Ю.О.,

д-р екон. наук, проф. (Київ)

КОНІЩУК В.В.,

д-р біол. наук, проф. (Київ)

КОПІЙ Л.І.,

д-р с.-г. наук, проф. (Львів)

КОСТЕНКО С.О.,

д-р біол. наук, проф. (Київ)

ЛІСОВИЙ М.М.,

д-р с.-г. наук, проф. (Київ)

МУДРАК О.В.,

д-р с.-г. наук, проф. (Вінниця)

НАГОРНЮК О.М.,

канд. с.-г. наук, доцент (Київ)

ПАЛАПА Н.В.,

д-р с.-г. наук, проф. (Київ)

ПАРФЕНІЮК А.І.,

д-р біол. наук, проф. (Київ)

СИМОЧКО Л.Ю.,

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

СИЧОВ М.Ю.,

д-р с.-г. наук, проф. (Київ)

СТАВЕЦЬКА Р.В.,

д-р с.-г. наук, проф. (Біла Церква)

ТАРАРІКО О.Г.,

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

ТЕРТИЧНА О.В.,

д-р біол. наук, проф. (Київ)

ТКАЧ Є.Д.,

д-р біол. наук, ст. досл. (Київ)

ФУРДИЧКО О.І.,

д-р екон. і с.-г. наук, проф.,

акад. НААН (Київ)

ЧОБОТЬКО Г.М.,

д-р біол. наук, проф. (Київ)

ШЕРСТОБОЄВА О.В.,

д-р с.-г. наук, проф. (Київ)

ШЕРШУН М.Х.,

д-р екон. наук, доцент (Київ)

ЮХНОВСЬКИЙ В.Ю.,

д-р с.-г. наук, проф. (Київ)

ВАЛАТ В.,

д-р педаг. наук, проф. (Республіка Польща)

ДУРСУН С.,

д-р філософії, проф. (Туреччина)

КОВАЛЬСЬКА А.,

д-р інж.-техн. наук, доцент

(Республіка Польща)

КОЕЛЬО ПІНЕЙРО М.,

д-р філософії, проф. (Португалія)

СОБЧИК В.,

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

ЙОШПХІКО ОКАБЕ,

д-р екон. наук, проф. (Японія)

Дребот О.І., Мельников О.В.

Еколого-економічне оцінювання сільсько-господарських систем і продукції: проблеми та їх вирішення

Яковенко Д.О., Бородай В.В.

Глобальний ринок біологічних продуктів: тенденції, виклики та перспективи розвитку

Коніщук В.В., Хом'як І.В., Шумигай І.В., Мартиненко В.В.

Інвазійний потенціал *Nicandra physalodes* (L.) Gaertn. на території України

Мудрак О.В., Антонюк Ю.П., Мудрак Г.В., Щерблюк А.Л., Дем'янюк О.С.

Екологічні особливості вищих судинних рослин Національного природного парку «Кармелюкове Поділля»

Чорнобров О.Ю.

Оцінювання екологічного впливу змін клімату на лісові екосистеми

Мороз В.В., Душко П.М.

Стан соснових деревостанів Житомирського Полісся за впливу комах-шкідників і кліматичних чинників

Ковалів О.І.

Організаційно-економічні засади збалансованого користування природними об'єктами в агросфері України

Волкогон В.В., Дімова С.Б., Волкогон К.І., Сидоренко В.П., Шевченко Л.А., Сасіна Т.С.

Спрямованість процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у чорноземі виділюваному за різних систем удобрення сільськогосподарських культур

Грищенко О.М., Паламарчук Р.П., Шляхтуров Д.С., Запасний В.С., Крупко Г.Д.

Забруднення ґрунту рухомими формами важких металів унаслідок бойових дій на території Миколаївської обл.

Стецюк О.П., Кириченко Л.П., Любченко В.В., Штанько І.П.

Попередження дефляційних процесів у хмеленасадженнях Полісся

6 Drebot O., Melnykov O.

Environmental and economic assessment of agricultural systems and products: problems and their solutions

19 Yakovenko D., Boroday V.

Global market of biological products: trends, challenges, and future outlook

29 Konishchuk V., Khomiak I., Shumyhai I., Martynenko V.

Invasive potential of *Nicandra physalodes* (L.) Gaertn. in the territory of Ukraine

36 Mudrak O., Antonyuk Yu., Mudrak H., Shcherbliuk A., Demyanyuk O.

Ecological features of vascular plants flora of the Karmeliukove Podillia National Nature Park

47 Chornobrov O.

Assessing ecological impact of climate change on forest ecosystems

57 Moroz V., Dushko P.

State of pine stands in Zhytomyr Polissia under the influence of insect pests and climatic factors

70 Kovaliv O.

Organizational and economic principles of balanced use of natural objects in the agricultural sector of Ukraine

80 Volkogon V., Dimova S., Volkogon K., Sydorenko V., Shevchenko L., Sasina T.

Direction of mineralization ↔ synthesis processes of organic matter in chernozem leached under different systems of agricultural crop fertilization

96 Hryshchenko O., Palamarchuk R., Shliakhturov D., Zapasnyy V., Krupko H.

Soil contamination with mobile forms of heavy metals as a result of hostilities in the territory of Mykolaiv region

108 Stetsiuk O., Kyrychenko L., Lyubchenko V., Shtanko I.

Preventing deflationary processes in hop plantations in Polissia

**Паламарчук Р.П., Грищенко О.М.,
Яценко Ю.М., Нечитайло В.М.,
Міненко О.В.**

Просторова мінливість вмісту рухомих форм кадмію у ґрунтах Харківської обл. за воєнного впливу

**Садовий О.С., Мардзявко В.А.,
Руденко А.Ю.**

Оптимізація спектрального складу фітоламп у закритому ґрунті для покращання продовольчої стабільності України в умовах післявоєнного відновлення

Лазарєв М.М., Єрмоленко С.М.

Радіологічні аспекти застосування місцевих добрив на радіоактивно забрудненій території

Дем'янюк О.С., Полтава О.П.

Позакореневе підживлення як ефективний спосіб підвищення продуктивності сільськогосподарських культур

Глуховець Д.В., Матусевич Г.Д.

Фітосанітарний стан агроценозу кукурудзи залежно від систем хімічного захисту

Городиська І.М., Мурсюкаєв Ф.Ф.

Вплив густоти посіву на ріст, розвиток та продуктивність гібридів соняшника

**Гапоненко А.М., Гнатюк А.М.,
Кулик М.В., Бондарь В.І., Блом О.Б.**

Ртуть у надземних частинах *Trifolium repens* L. та *Trifolium pratense* L.: накопичення та перспективи фітоекстракції

Кравчук Ю.А., Безноско І.В.

Вплив сидеральних культур на чисельність ґрунтових мікроорганізмів в агроценозах пшениці озимої

**Цвігун В.О., Мазур С.О., Левішко А.С.,
Гуменюк І.І., Колодяжний О.Ю.**

Динаміка поширення *Cucumber mosaic virus* в агроценозах овочевих культур за контрастних погодних умов

Крайник Л.В., Сивулька П.М.

Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів у сільському господарстві: проблемні питання та сучасні підходи удосконалення

118 **Palamarchuk R., Hryshchenko O.,
Yatsenko Yu., Nechytailo V.,
Minenko O.**

Spatial variability of mobile cadmium compounds content in the soils of Kharkiv region under military influence

129 **Sadovyi O., Mardziavko V.,
Rudenko A.**

Optimization of the spectral composition of phytolamps in closed soil to improve food stability in Ukraine in the context of postwar recovery

136 **Lazariev M., Yermolenko S.**

Radiological aspects of the application of local fertilizers in a radioactively contaminated territory

143 **Demyanyuk O., Poltava O.**

Foliar fertilization as an effective method to increase the productivity of agricultural crops

151 **Glukhovets D., Matuskevych H.**

Phytosanitary condition of the maize agro-cenosis depending on chemical protection systems

161 **Horodyska I., Mursyukaev F.**

Effect of plant density on productivity, growth, and development of sunflower hybrids

173 **Gaponenko A., Gnatiuk A.,
Kulyk M., Bondar V., Blum O.**

Mercury in the aboveground parts of *Trifolium repens* L. and *Trifolium pratense* L.: accumulation and prospects of phytoextraction

182 **Kravchuk Yu., Beznosko I.**

Influence of side crops on the amount of soil microorganisms in agroecosystems of winter wheat

192 **Tsvihun V., Mazur S., Levishko A.,
Gumeniuk I., Kolodyazhnyi O.**

Dynamics of the spread of *Cucumber mosaic virus* in vegetable crop agroecosystems under contrasting climate change

205 **Kraynyk L., Syvulka P.**

Agroecological assessment of machine-tractor units in agriculture: problematic issues and modern approaches to improvement

Реферати 213 Abstract

Відомості про авторів 224 Information about the authors

Правила для авторів 227 Rules for the authors

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ СИСТЕМ І ПРОДУКЦІЇ: ПРОБЛЕМИ ТА ЇХ ВИРІШЕННЯ

О.І. Дребот, О.В. Мельников

Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: drebotoksana@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2681-1074

e-mail: alexej.mln@gmail.com; ORCID: 0009-0001-3710-9152

У статті досліджено теоретико-методичні засади еколого-економічної оцінки сільськогосподарських систем та їхньої продукції. Розглянуто такі методи еколого-економічної оцінки, як еколого-економічний аналіз (ЕЕА) та оцінка життєвого циклу (LCA). Запропоновано вдосконалення методу еколого-економічної оцінки, який би враховував інтегральний економічний ефект — алгебраїчну суму екологічного, медико-біологічного, соціального, енергетичного, технологічного, економічного ефектів органічного землекористування та відповідних ефектів і збитків традиційного. Висвітлено основні показники аналізу ефективності використання земельних ресурсів у рамках методу контрольних районів за порівняння органічної і традиційної систем землекористування. Розглянуто альтернативні методи підрахунку збитків у сільському господарстві з використанням світових наукових досліджень з інтерпретацією їхніх результатів у реаліях України. Встановлено, що витрати, які несуть сільськогосподарські підприємства України на охорону навколишнього середовища, не покривають навіть незначної частини завданих ними екологічних збитків. Так, сума загальних поточних витрат на охорону навколишнього середовища у сільському господарстві України в 2024 р. становила 122,04 млн грн, зокрема поточні витрати на захист і відновлення ґрунтів, підземних і поверхневих вод — усього 13,77 млн грн. Сума капітальних інвестицій на охорону навколишнього природного середовища у сільському господарстві сягала відповідно 45,05 млн грн, з них 4,98 млн грн — капітальні інвестиції на захист і відновлення ґрунтів, підземних і поверхневих вод. Окрім того, стан використання та охорони ґрунтових ресурсів у країні характеризується як незадовільний і має тенденцію до погіршення. Розглянуто основні недоліки та причини недостовірності методики оцінки життєвого циклу за порівняльного аналізу органічного та традиційного землекористування. Для їхнього усунення запропоновано використовувати функціональні одиниці на основі як кількості продукту, так і площі (території), враховувати втрату біорізноманіття, деградацію земель, вплив пестицидів, зокрема на якість продукції та здоров'я людини, соціальні наслідки.

Ключові слова: сталий розвиток, конкурентоспроможність, підвищення прибутковості, екобезпечне сільськогосподарське землекористування, агротехнології, екологічний стан, якість органічної продукції, екологізація.

ВСТУП

Донині немає єдиного системного й комплексного науково-методичного підходу в аналізі еколого-економічної оцінки сільськогосподарських систем та їхньої продукції, особливо органічної, який би враховував достатньою мірою всі складові елементи. Якщо економічні показники, які всім відомі, можна виміряти, то з вимірюванням соціальних, медико-біологічних та екологічних є певні складності — це питання нині не стало предметом систем-

ного наукового дослідження. Соціальні, медико-біологічні та екологічні наслідки шкоди, заподіяної сільськогосподарською діяльністю навколишньому середовищу та здоров'ю людини, не піддаються кількісному вираженню і належним чином не відображаються в економічній оцінці.

Еколого-економічна оцінка сільськогосподарських систем має охоплювати оцінку використання природоохоронного потенціалу, аналіз природоохоронних заходів, аналіз впливу продукції на здоров'я населення та соціальні наслідки, завдяки

чому безпосередньо до економічного ефекту буде додаватися прогнозований тривалий ефект, який враховуватиме економічні наслідки від зміни довкілля та впливу на здоров'я населення в найближчому майбутньому. Недосконалість методів еколого-економічної оцінки сільськогосподарських систем, що дають можливість правильно оцінити діяльність сільськогосподарських підприємств, спрямовану на охорону навколишнього середовища і раціональне використання природних ресурсів, стримує перехід до еколого-безпечних систем виробництва сільськогосподарської продукції, оскільки немає розуміння усіх наслідків шкоди довкіллю та здоров'ю населення.

Мета статті — дослідити теоретико-методичні засади еколого-економічного оцінювання сільськогосподарських систем та їхньої продукції, можливості вдосконалення еколого-економічного аналізу (ЕЕА), оцінки життєвого циклу (LCA), які б враховували екологічні, медико-біологічні та соціальні ефекти органічного землекористування та відповідні збитки традиційного.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В економічній літературі запропоновано багато методів еколого-економічного оцінювання систем сільського господарства та їхньої продукції, включаючи еколого-економічний аналіз (ЕЕА), або аналіз еколого-економічних співвідношень, оцінку життєвого циклу (LCA), аналіз екологічного сліду, стохастичний граничний аналіз (SFA) та аналіз охоплення даних (DEA) [1].

Праці G. Wang, R. Shi, L. Mi, J. Hu [1], Є.В. Мішеніна, І.М. Сотника [2] присвячені питанням еколого-економічного аналізу. Теоретико-методичні засади еколого-економічної оцінки та ефективності органічного землекористування досліджують багато вітчизняних вчених, зокрема А.В. Кучер [3], Н.В. Зіновчук [4], А.В. Вдовиченко, О.І. Шкуратов, В.А. Чудовська [5], Т.О. Чайка [6]. Питання соціальної та

медико-біологічної ефективності описані у дослідженнях А. Кучера [3], Р.М. Безуса [7], О.А. Корчинської [8] та ін. Методам оцінки життєвого циклу присвячено наукові праці закордонних вчених М.Т. Knudsen, С. Cederberg, Н. Van der Werf [9], А. Zagni, J. Guinée [10].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Під час написання статті використано теоретичні методи: аналізу — для оцінювання показників реальних витрат сільськогосподарських підприємств України на охорону навколишнього природного середовища; наукового синтезу — для визначення та оцінювання інтегрального економічного ефекту сільськогосподарських систем; теоретичного узагальнення — для підсумку результатів дослідження. Для розуміння неврахованих витрат у сільському господарстві застосовувалися статистичні дані провідних світових досліджень з інтерпретацією результатів у реаліях України. Інформаційною основою дослідження є матеріали періодичних видань, праці науковців, Інтернет-джерела, статистична інформація, наукова та методична література.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Протягом останніх десятиліть сільське господарство спричиняє дедалі більший негативний вплив на природне середовище, ніж будь-яка інша галузь народного господарства. Після 1970-х років значні інвестиції в сільськогосподарську техніку, хімічні добрива та пестициди не лише підвищили ефективність сільськогосподарського виробництва, але й спричинили істотне збільшення забруднення навколишнього середовища, зниження родючості і продуктивності ґрунтів, погіршення якості вод, атмосфери, втрати біорізноманіття, а також позначилося на здоров'ї населення.

Однією з основних рис індустріального сільського господарства є курс на невідновлювані ресурси промислового походження, зокрема засоби хімізації (мінеральні

добрива, пестициди). Використання цих ресурсів, очевидно, забезпечує стрімке збільшення врожайності сільськогосподарських культур та підвищення продуктивності серед сільськогосподарських тварин, однак, загалом, середній рівень забезпечення світового населення сільськогосподарською продукцією зростає з меншими темпами, ніж продуктивність сільського господарства. За 50-річний період середні темпи споживання мінеральних добрив та пестицидів у розрахунку на одиницю площі збільшувалися швидше за аналогічні показники продуктивності сільського господарства [11]. Отже, виробництво значної кількості продукції видається пріоритетним завданням, але це часто є ілюзією, якщо споживання ресурсів та енергії посилюється, ніж пропорційно до очікуваного додаткового врожаю.

Сьогодні у всьому світі виникає дилема між задоволенням суспільних потреб у матеріальних благах та природно-ресурсним і екологічним потенціалом навколишнього середовища, що може бути вирішена на основі об'єктивної еколого-економічної оцінки виробничих процесів у сільському господарстві і відповідних висновків.

Одним із методів еколого-економічної оцінки сільського господарства є еколого-економічний аналіз, який в широкому розумінні передбачає здійснення аналізу показників взаємодії, з одного боку, господарської діяльності в рамках регіону, національної економіки, світового господарства і, з іншого боку, навколишнього середовища. ЕЕА у вузькому розумінні охоплює господарську діяльність певного підприємства та її вплив на довкілля [2].

Об'єктами ЕЕА у сільському господарстві є показники впливу діяльності сільськогосподарських підприємств на земельні ресурси, водний басейн, атмосферне повітря, екосистему, якість кінцевої продукції, здоров'я населення (рис. 1).

Екологічний вплив від виробництва сільськогосподарської продукції, який може бути як позитивним (ефект), так і негативним (збитки), за своєю суттю — це грошова оцінка зміни екологічних параметрів,

що відбуваються під впливом сільськогосподарського виробництва. Ефект може бути екологічним, соціальним, медико-біологічним, економічним, технологічним, енергетичним та може оцінюватись обсягом додатково виробленої чи спожитої продукції, показниками покращання здоров'я населення: зниження захворюваності або смертності, виробничого травматизму, підвищення середньої тривалості життя тощо. Насамперед негативний збиток від виробництва сільськогосподарської продукції — це сукупність фактичних або можливих екологічних, соціальних, медико-біологічних та інших втрат, виражених у грошовій формі, які виникають внаслідок забруднення довкілля: земель, водного, повітряного басейну, порушень в екосистемах тощо.

Для оцінки еколого-економічного збитку у сільському господарстві на практиці застосовуються такі методи:

Метод контрольних районів (прямого рахунку). Величина збитку визначається за обраною територією шляхом прямої порівняльної калькуляції різних складових витрат на основі об'єктивних способів їхнього виявлення. Порівняння проводиться з екологічно безпечним районом, що задовольняє критеріям порівняльності з досліджуванним районом за ґрунтовими, кліматичними і техніко-економічними показниками.

Аналітичний (статистичний), заснований на статистичній обробці фактичних даних про вплив різних факторних ознак (включаючи чинники забруднення) на економічні показники сільського господарства та отриманні кореляційно-регресійних залежностей.

Непряма (емпірична) оцінка. Ґрунтується на принципі перенесення на приватний досліджуваний об'єкт загальних закономірностей взаємодії збиткоутворювальних чинників, що визначають розмір негативних наслідків забруднення. В основі лежать показники питомого економічного збитку, що характеризують середні екологічні зумовлені втрати в сільському господарстві за фіксованого одиничного рівня забрудненості навколишнього середовища [5].



Рис. 1. Об'єкти еколого-економічного аналізу
(індикатори впливу сільськогосподарських систем)

Примітка: розроблено авторами на основі [12].

Одним із підходів до визначення еколого-економічного ефекту є його трактування як сукупного екологічного й економічного ефектів, які досягаються з різним проміжком часу і лише в окремих випадках одночасно [3]. Отже, інтегральний економічний ефект сільськогосподарської системи буде алгебраїчною сумою екологічного, медико-біологічного, соціального, енергетичного, технологічного й економічного ефектів, виражених у грошовій (вартісній) оцінці.

Практичний досвід аналізу органічного землекористування порівняно із традиційним показує, що за органічного землекористування матимемо позитивний екологічний, соціальний, медико-біологічний, технологічний, енергетичний ефект, за традиційного — навпаки, зазначені ефекти

переважно будуть негативними і однозначно гіршими порівняно з органічним. Єдиним позитивним ефектом від традиційного землекористування є економічний, на що вказують переважно більші прибутки господарств порівняно з органічними. Втім варто зауважити, що цей ефект виражений більшою мірою на рівні господарств. І це є певною проблемою, адже без відповідного рівня економічного ефекту виробники сільськогосподарської продукції не зацікавлені у переході до органічного землекористування. Якщо ж оцінювати інтегральний економічний ефект як алгебраїчну суму всіх ефектів, то істотна перевага буде за органічним.

Енергетичний аналіз, який має вагоме місце за порівняння сільськогосподарських систем, є додатковим методом, що істотно

збільшує можливості економічного аналізу. Однією з головних переваг органічного агровиробництва над традиційним є система економії енергоресурсів, яка передбачає оптимізацію їхніх витрат на виробництво продукції без зниження її якості та номенклатури. Тому для повної економічної оцінки недостатньо показників рентабельності та прибутку, оскільки жоден із них повною мірою не враховує морального та виробничого ставлення до природних ресурсів, екологічні умови господарювання [6]. На думку О.І. Шкуратова, В.А. Чудовської, А.В. Вдовиченко [5], енергетичний аналіз дає можливість об'єктивно розрахувати еколого-економічний прибуток від виробництва органічної продукції з урахування впливу на довкілля.

Під час порівняння органічної та традиційної систем землекористування в рамках методу контрольних районів необхідно насамперед провести порівняльний аналіз ефективності використання земельних ресурсів, який повинен включати в себе екологічні та економічні показники. Ефективне використання земельних ресурсів є неможливим без достовірної інформації про якісний та кількісний стан ґрунтів, рівня їх забруднення.

До екологічних показників, які розраховуються на основі проведеної агрохімічної оцінки, еколого-агрохімічного стану і бонітету ґрунтів, належать такі якісні та кількісні показники ґрунту:

- *біологічні*: глибина гумусового горизонту, вміст у ґрунті гумусу, вміст у ґрунті елементів живлення, біологічна активність тощо;
- *агрофізичні*: гранулометричний склад ґрунту, щільність ґрунту, максимально можливий запас продуктивної вологи, тип засолення, ступінь засолення;
- *агрохімічні*: показник рН, сума увібраних основ, кислотність;
- *антропогенні*: забрудненість (залишки пестицидів у ґрунті, щільність забруднення ^{137}Cs та ^{90}Sr), негативні ознаки (засоленість, заболоченість, еродованість, зсуви, обвали, підтоплення, скелетність, деградованість, малопродук-

тивність, змитість, мочаристість, глесність, намитість, окультуреність, зольність, оторфовування, озалізнення, окарбоченість тощо) [13].

До економічних показників ефективності використання земельних ресурсів належать:

- *натуральні*: урожайність сільськогосподарських культур, виробництво сільськогосподарської продукції на 100 га земельних угідь;
- *вартісні*: вартість валової й товарної продукції з розрахунку на 1 га сільськогосподарських угідь, валовий і чистий дохід та прибуток із розрахунку на 1 га сільськогосподарських угідь;
- *показники інтенсивності використання земель*: ступінь господарського використання землі, ступінь розораності, рівень меліорованості, коефіцієнт повторного використання землі [14].

Відповідно до методики, розробленої Г.І. Чогут [15], яка заслуговує на увагу, визначаються додатково такі показники: витрати на проведення комплексу екологічно спрямованих заходів системи землеробства; підвищення цінності земельних угідь у результаті покращання їхньої екологічної якості і родючості; додаткові обсяги продукції, отримані в результаті проведення екологічно спрямованих заходів; додатковий чистий дохід від впровадження екологічно орієнтованих заходів; економічна ефективність екологічних витрат; відвернений екологічний збиток.

Аналіз ефективності використання земельних ресурсів дає змогу поррахувати показники екологічної ефективності органічного агровиробництва, такі як: оцінка рівня відновлення родючості сільськогосподарських угідь; оцінка впливу органічного агровиробництва на забруднення ґрунту радіонуклідами, важкими металами, пестицидами; оцінювання рівня витрат на зменшення вмісту нітратів, пестицидів, важких металів і хімічних сполук у продукції; оцінка впливу органічного агровиробництва на рівень активності бактерій і мікроорганізмів у ґрунті; оцінювання впливу органічного агровиробництва на рівень

захворюваності сільськогосподарських тварин та рослин; оцінка впливу органічного агровиробництва на стан природного середовища та ін. [6].

Еколого-економічну ефективність у широкому сенсі науковці визначають як відношення сумарних економічних та екологічних витрат, пов'язаних із ліквідацією або попередженням забруднення і руйнування довкілля до інтегрального еколого-економічного ефекту, тобто це сукупна економічна результативність процесу виробництва сільськогосподарської продукції з урахуванням його впливу на навколишнє середовище [5]. Якісно проведений еколого-економічний аналіз впливу господарського комплексу на навколишнє середовище дає можливість достовірно визначити еколого-економічну ефективність, важливими складовими якої є екологічна, соціальна, медико-біологічна ефективність.

Медико-біологічна ефективність пов'язана з взаємодією організму людини із зовнішнім середовищем. У нашому контексті вона відображає вплив сільського господарства та агропродовольчих товарів на здоров'я людей. Вимірюється показниками здоров'я населення: середня тривалість життя, показник дитячої смертності, показники захворюваності, демографічні дані, статистика інвалідності тощо. Як правило, це загальні регіональні або національні показники. Тому за підрахунку медико-біологічного впливу окремого господарства потрібно враховувати загальну картину по країні або регіону за традиційної системи землекористування, яка сьогодні є найпоширенішою в країні і наслідки діяльності якої є добре відомими і піддаються аналізу. Що стосується органічного виробництва — для підрахунку відповідного медико-біологічного ефекту можна посилатися на результати провідних наукових досліджень впливу органічного землекористування, зокрема на якість продукції та здоров'я населення.

Те саме стосується і соціальної ефективності, яку так само складно і не завжди можливо кількісно виміряти. Соці-

альна ефективність є результатом впливу сільськогосподарського виробництва на демографічну, виробничу, культурну й моральну сфери життя людини. Вона відображає поліпшення соціальних умов життя людей, а також умов праці та побуту, підвищення рівня зайнятості й безпеки життя людей, так само й безпеки (екологізації) фізичної праці тощо, покращання стану довкілля. Прикладами показників соціальної ефективності сільськогосподарського виробництва на рівні підприємств є питома частка прибутку, спрямованого на соціальні заходи, у чистому прибутку підприємства; частка прибутку, орієнтованого на соціальні заходи, у розрахунку на одного працівника підприємства; на рівні регіону, країни — рівень забезпеченості органічною продукцією населення [6], рівень зайнятості населення в органічному виробництві, показники поліпшення зовнішнього довкілля тощо.

Одним із найважливіших елементів обліку витрат має бути визначення величини збитку від забруднених харчових продуктів. Екологічно чиста продукція може бути вирощена лише на екологічно чистих ґрунтах, що відповідає принципам органічного землекористування.

Для порівняння ефективності виробництва продукції різної якості необхідно порівнювати витрати на виробництво продукції поліпшеної якості з витратами на виробництво продукції попередньої якості, з поправкою на коефіцієнти показників корисності продукції, що характеризують вміст корисних речовин: клітковини, білків, органічних кислот, енергетичну цінність, вітамінів, мікроелементів тощо, а також коефіцієнти безпеки споживачів під час вживання: ступінь забруднення токсинами, нітратами, важкими металами, пестицидами.

У своїх дослідженнях О.В. Лиса, Р.П. Андрушко пропонують цільову функцію для оцінювання вмісту поживних речовин в овочах, яка, на наш погляд, може бути доповнена додатковими показниками (вітаміни, мікроелементи та ін.) та застосовуватися і для оцінювання якості різних харчових

продуктів. За моделювання системи цілі й обмеження можуть бути сформовані нечітко, залежно від досліджуваних продуктів, враховуючи найважливіші характеристики, що потрібно дослідити.

$z(x) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + \dots \rightarrow \max$, (1)
де x_1 — вміст вуглеводів; x_2 — вміст білків; x_3 — вміст жирів; x_4 — клітковина; x_5 — вміст органічних кислот; x_6 — вміст вітамінів.

Цільова функція для оцінювання визначення вмісту забруднюючих речовин:

$z(x) = x_1 + x_2 + x_3 + \dots \rightarrow \max$, (2)
де x_1 — вміст нітратів; x_2 — вміст важких металів; x_3 — вміст пестицидів [16].

За результатами досліджень, органічні продукти містять набагато менше (від 4 до 150 разів у різних дослідженнях) залишків пестицидів, ніж звичайні, а ті, що там можна знайти, переважно отримані в результаті обробки, що була проведена на сусідніх ділянках, які обробляються традиційно. Залишки пестицидів, які є в харчових продуктах, навіть якщо вони відповідають нормам, можуть негативно впливати на здоров'я. Проблема в тому, що оцінка ризику, пов'язаного зі впливом пестицидів, проводиться для кожного окремого компонента, але дуже рідко — для всіх одразу. Дослідження, що вивчають «коктейльний» ефект пестицидів, показали посилення їхнього негативного впливу, при цьому жоден із пестицидів, що розглядаються в дуже низьких дозах окремо, не був пов'язаний із негативним ефектом [17].

Окрім того, згідно з науковими дослідженнями, органічні продукти корисніші за традиційні, вони містять, як правило, більше деяких мінералів, вітаміну С, поліфенолів (від +19 до +69%) у фруктах та овочах, омега-3 — в органічному м'ясі та молочних продуктах (від +50 до +60%). Поліфеноли, яких в органічних продуктах значно більше, зменшують ризик хронічних, серцево-судинних та нейродегенеративних захворювань, а також раку [17].

Альтернативні методи підрахунку збитків. Для розуміння неврахованих витрат у сільському господарстві загалом можна використовувати статистичні наукові дані

провідних світових досліджень у цьому напрямі з інтерпретацією результатів у реаліях України. Кілька останніх досліджень показують, що ціна, яку сплачують споживачі за придбання харчових продуктів, покриває лише невелику частину загальних витрат, що виникають у процесі виробництва, переробки, маркетингу та споживання цих товарів.

Фонд сталого розвитку, який розраховував негативні зовнішні ефекти британської продовольчої системи з точки зору витрат на харчування, дійшов висновку, що кожен фунт стерлінгів, сплачений споживачем, генерує 1 фунт стерлінгів додаткових витрат, які не несуть підприємства, а отже, перекладаються на суспільство. Ці витрати, отримані в результаті аналізу понад 50 позицій, поділяються на харчові захворювання — 37%, професійні захворювання — 13, деградація природного капіталу — 36, зокрема 11% через втрату біорізноманіття, імпорту харчових продуктів — 8, сільськогосподарські субсидії — 2,5% та ін. Загальна сума витрат за 2015 р. становила 120 млрд фунтів стерлінгів [18].

У звіті Фонду Рокфеллера «Реальна вартість продуктів харчування: вимірювання того, що має значення для трансформації продовольчої системи Америки» приховані витрати на харчування в США оцінювалися в 2,105 трлн дол. США у 2020 р., що майже вдвічі перевищує суму, витрачену на харчові продукти (1,1 трлн дол. США). Ці витрати пов'язані з сектором охорони здоров'я — 54%, екологічною шкодою — 38, поганими умовами праці — 6, сільськогосподарськими субсидіями — 1%.

Подібні звіти зроблені Науковим комітетом Саміту продовольчих систем ООН (UNFSS). Вони свідчать, що приховані витрати на довкілля сягали 45%, приховані витрати на здоров'я — 38%, та 18% на економіку.

Отже, результати діяльності традиційного сільського господарства є наглядним прикладом негативної екстерналії, яка є центральним елементом прихованих витрат: традиційне сільське господарство генерує негативні наслідки у своєму середовищі.

щі через свою діяльність, змушує громаду нести вищі витрати, ніж ті, що визначаються ціною, встановленою ринком [18].

Аналізуючи ці дослідження, не важко порахувати величину екологічних збитків, завданих сільським господарством у масштабах нашої країни. Враховуючи те, що середня тривалість життя в Україні менша, ніж у США і Великій Британії, співвідношення 1:1 (1 грн, витрачена на харчові продукти, дорівнює 1 грн прихованих витрат, які не несуть підприємства та перекладаються на суспільство) можна вважати мінімальним, фактично збитки від шкоди, завданої людині та довкіллю традиційним сільським господарством у нашій країні, можуть бути ще вищими.

Беручи до уваги статистичні дані по Україні, можна зробити закономірний невтішний висновок: реальні витрати сіль-

ськогосподарських підприємств на охорону навколишнього природного середовища в нашій країні не покривають навіть незначної частини справжніх екологічних збитків. Так, сума загальних поточних витрат на охорону навколишнього середовища у сільському господарстві України в 2024 р. становила 122,04 млн грн, зокрема поточні витрати на захист і відновлення ґрунтів, підземних і поверхневих вод — усього 13,77 млн грн (*табл. 1*). Сума капітальних інвестицій на охорону навколишнього природного середовища у сільському господарстві сягала відповідно 45,05 млн грн, з них 4,98 млн грн — капітальні інвестиції на захист і відновлення ґрунтів, підземних і поверхневих вод (*табл. 2*) [19].

Крім того, стан використання та охорони ґрунтових ресурсів у країні характеризується як незадовільний і має тенденцію

Таблиця 1. Поточні витрати на охорону навколишнього природного середовища у сільському господарстві України з розподілом за видами природоохоронних заходів, тис. грн

Рік	Поточні витрати	У тому числі на				
		охорону атмосферного повітря, попередження змін клімату та захист озонового шару	забір і очищення стічних вод	поводження з відходами	захист і відновлення ґрунтів, підземних і поверхневих вод	інші заходи
2024	122037,3	29710,7	15458,0	16898,4	13772,1	46198,1
2023	744844,8	28531,5	13492,8	14490,8	679611,6	8718,1
2022	55395,6	11749,5	7327,7	15887,3	12799,4	7631,7
2021	59661,1	10499,8	10892,3	18916,3	6014,6	13338,1

Примітка: * систематизовано авторами на основі статистичних даних [19].

Таблиця 2. Капітальні інвестиції на охорону навколишнього природного середовища у сільському господарстві України з розподілом за видами природоохоронної діяльності, тис. грн

Рік	Капітальні інвестиції	У тому числі на				
		охорону атмосферного повітря, попередження змін клімату та захист озонового шару	забір і очищення стічних вод	поводження з відходами	захист і відновлення ґрунтів, підземних і поверхневих вод	інші заходи
2024	45051,5	13756,8	22916,2	1455,2	4984,1	55609,2
2023	7144,5	5201,8	505,3	205,5	640,6	591,3
2022	19253,0	1710,2	15921,8	288,4	646,5	686,1
2021	11669,0	5816,3	5093,9	621,4	126,8	10,6

Примітка: систематизовано авторами на основі статистичних даних [19].

до погіршення. За даними фахівців ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського», для ґрунтів України найбільш характерними є втрата гумусу та поживних речовин — 43%, переущільнення — 39, замулення та кіркоутворення — 38, водна ерозія — 17, підкислення — 14, вітрова ерозія, втрата верхнього шару ґрунту — 11, засолення — 4,1, забруднення важкими металами — 8,0, пестицидами — 9,3, радіонуклідами — 11,1%. Загальна площа деградованих ґрунтів в Україні — майже 10–12 млн га, що становить понад 25% від площі земель сільськогосподарського призначення [20]. Деградація ґрунтів в Україні підсилюється з кожним роком внаслідок недооцінки реальної загрози, відсутності механізмів виконання законів про охорону ґрунтів, незбалансованого й науково необґрунтованого землекористування. До того ж ґрунтові ресурси зазнають масштабної руйнації, погіршення якості та посилення процесів деградації через військові дії (рис. 2).

Розмір шкоди, завданої конкретним господарством через забруднення (засмічення) земель будь-якого цільового призначення, можна порахувати згідно з «Методикою визначення шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохорон-

ного законодавства», яка розроблена відповідно до Законів України «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про відходи» та інших нормативно-правових актів [21]. Однак ця методика не враховує показники втрати гумусу, деградаційні процеси, радіаційне та бактеріальне забруднення тощо, тому потребує доопрацювання та не підходить для визначення повного обсягу збитків.

Фактично сільськогосподарська та промислова діяльність підприємств в Україні призвела до того, що, за оцінками фахівців, лише 4,5 млн га сільськогосподарських земель України придатні для ведення органічного землеробства. Решта земель забруднена та не відповідає вимогам органічного землекористування. Втім реальне впровадження органічного землеробства присутнє лише на 320 тис. га, менш ніж на 1% від загальних площ [22].

Що стосується водних ресурсів, то високоінтенсивне сільське господарство тут є як і забруднювачем, так і найбільшим споживачем. Мінеральні добрива, середній рівень споживання яких за даними Світового банку (World Bank) становить 138 кг д.р./га ріллі, легко розчиняються у воді (причому набагато швидше, наприклад, порівняно з органічним компостом) і тому можуть швидко змиватися в поверхневі

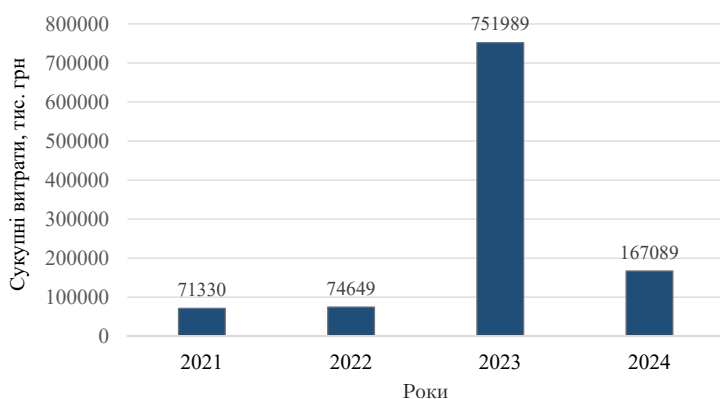


Рис. 2. Поточні витрати та капітальні інвестиції на охорону навколишнього природного середовища у сільському господарстві України з розподілом за видами природоохоронної діяльності

Примітка: систематизовано авторами на основі статистичних даних [19].

водоймища (викликаючи евтрофікацію та збіднення води киснем) і просочуватися в горизонти підземних вод (збільшуючи концентрацію нітратів). Окрім того, переважна частина води, що використовується, припадає на процес іригації. За прогнозами до 2030 р. частка зрошення становитиме до 70% від загального споживання води у світі, що може спричинити проблеми не лише у сфері продовольчої безпеки, а й у галузі міжнародних відносин [11].

Отже, основною проблемою за порівняння сільськогосподарських систем за еколого-економічного аналізу є правильне визначення величини ефекту та збитку сільськогосподарських підприємств, адже, по-перше, всі процеси забруднення важко врахувати, а по-друге, саме сільськогосподарські підприємства традиційної системи землекористування не зацікавлені в подібному аналізі. Як правило, економічний оцінці підлягає лише та частина, яку можна побачити і оцінити, тому обчислені витрати завжди в рази менші за реальні та не враховують екологічні, соціальні, медико-біологічні збитки. Ці збитки вимірюються в кращому разі лише в масштабах регіону або країни, але не знаходять свого відображення в діяльності окремого підприємства і не враховується в собівартості продукції та, відповідно, у роздрібній ціні, що сплачується споживачем. Тому ціна сільськогосподарської продукції повинна включати вартість руйнування ресурсів — втрату ґрунтом органічної речовини, враховувати збитки від процесів деградації та забруднення ґрунтів, а також медико-біологічні, соціальні, екологічні збитки. Дієвим способом включення цих збитків у ціну продукції може бути додаткове оподаткування сільськогосподарських підприємств за використання пестицидів, надмірне використання мінеральних добрив тощо (податки на забруднення). Втім це можливо запровадити лише за належного державного контролю стану земельних ресурсів. Ідеальним рішенням є створення таких ринкових умов, за яких органічне землекористування з економічної точки зору для власників сільськогос-

подарських підприємств стало би більш вигідним, ніж традиційне.

Фактично, лише ринкова ціна на продукти, вирощені органічними методами, може вважатися «справжньою ціною», вона показує реальну вартість харчових продуктів за обережного ставлення до природи, враховуючи принципи екологічного землекористування.

Оцінка життєвого циклу (Life cycle assessment — LCA). Ще одним із найпоширеніших методів оцінки впливу сільськогосподарських систем та їхньої продукції на навколишнє середовище є оцінка життєвого циклу. Цей метод передусім використовується як інструмент порівняння, надаючи інформацію про вплив продукту на навколишнє середовище та порівнюючи його з наявними альтернативами. Метод є прозорим, стандартизованим та базується на міжнародному консенсусі.

Широко визнані процедури LCA включені в серію стандартів екологічного менеджменту 14000 Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), зокрема, в ISO 14040 та ISO 14044. Так, ISO 14040 визначає «принципи та структуру» стандарту, в той час як ISO 14044 містить загальний опис «вимог та настанов».

Дослідження LCA передбачає ретельну інвентаризацію енергії та матеріалів, необхідних на всіх етапах галузевого ланцюжка створення вартості продукту, процесу або послуги (добування чи використання сировини; виробництво, транспортування, розповсюдження, використання, повторне використання, переробка чи остаточне знищення), а також розрахунок відповідних викидів у навколишнє середовище. Тому, оцінка життєвого циклу оцінює кумулятивний потенціальний вплив системи (продукту) на навколишнє середовище, враховуючи всі етапи від початку (видобуток сировини), через виробництво та використання до утилізації або переробки. Системою в цьому випадку може бути ділянка, ферма, продукт, територія тощо. Викиди забруднювальних речовин та використання ресурсів кількісно визначаються за допомогою показників, які виражаються функціональ-

ною (еталонною) одиницею, що кількісно визначає ефективність системи. Для досліджень сільськогосподарських систем такою одиницею зазвичай є кількість продукту. І це є головним недоліком цього методу, адже оцінка сільськогосподарської системи виключно з точки зору виробництва продукції не враховує таких критеріїв, як вплив на біорізноманіття, забруднення води та ґрунту пестицидами, родючість ґрунтів, рівень секвестрації вуглецю, здоров'я населення, соціальні зміни тощо [9].

Існує два основних типи LCA, залежно від цілей дослідження. Атрибутивний LCA, що надає інформацію про вплив процесів, безпосередньо пов'язаних із життєвим циклом продукту, та послідовний LCA, який враховує наслідки змін у рівні виробництва продукту, включаючи непрямі впливи поза життєвим циклом продукту [10]. Ще один тип LCA, який називається «соціальна ОЖЦ» (Social Life Cycle Assessment, SLCA), перебуває на стадії розробки і є окремим підходом, призначеним для оцінки потенційних соціальних і соціально-економічних наслідків і впливів. SLCA є корисним інструментом для компаній для визначення та оцінювання потенційних соціальних впливів протягом життєвого циклу продукту або послуги на різні зацікавлені сторони (наприклад, працівників, місцеві громади, споживачів).

Незважаючи на спроби стандартизувати LCA, результати різних LCA часто суперечать один одному. За відсутності формального набору вимог LCA, виконаний 10 різними сторонами, може дати 10 різних результатів, залежно від поглядів фахівця-практика та його переконань щодо методології.

Згідно з дослідженнями LCA, які порівнювали органічне і традиційне сільське господарство, лише у 26% з 34 досліджень брався до уваги вплив пестицидів на здоров'я людини, у 12% — вплив на біорізноманіття, майже не враховується вплив на якість ґрунту ключових практик органічного землеробства, як-от диверсифікація сівозмін та використання покривних культур [9]. Окрім того, підтверджено, що

органічне сільське господарство підтримує приблизно на 30% вищий рівень біорізноманіття, ніж традиційне [23] й позитивно впливає на відновлення природних властивостей та функцій ґрунту.

Органічне землеробство має менший вплив на навколишнє середовище на одиницю зайнятих сільськогосподарських угідь, ніж традиційне землеробство. Однак, з точки зору оцінки життєвого циклу, органічне землеробство може оцінюватися як менш ефективне, ніж традиційне, оскільки дослідження LCA виражають вплив на одиницю продукції. Втім насправді це не відповідає дійсності, тому що такий підхід не враховує всі критерії впливу на навколишнє середовище, включаючи вплив на здоров'я населення та соціальні наслідки.

Основними причинами недостовірної оцінки за методом LCA є такі:

- відсутність операційних показників для ключових екологічних проблем;
- вузький погляд на функції сільськогосподарських систем;
- непослідовне моделювання непрямих впливів.

Для вирішення цих недоліків запропоновано використовувати функціональні одиниці на основі як кількості продукту, так і площі (території), враховувати втрату біорізноманіття, деградацію земель, вплив пестицидів, зокрема на якість продукції та здоров'я людини, соціальні наслідки та доповнювати LCA показниками екосистемних послуг, які оцінюють забезпечувальні, регулювальні та культурні послуги, що надаються системою.

В Україні діє «Примірна методика визначення вартості життєвого циклу», затверджена наказом № 1894 від 28.08.2020 р. Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України. Ця методика розроблена з метою введення в Україні європейських підходів за проведення процедур публічних закупівель товарів і технологій, враховуючи вартість життєвого циклу [24].

Для практичного впровадження європейських підходів Примірної методики недостатньо, вона не дає фінансових механізмів

мів своєї реалізації, відбору перспективних технологій, включаючи розробку та реалізацію пілотних проєктів, тому потребує вдосконалення з урахуванням світових та європейських стандартів, а також враховуючи недоліки оцінки життєвого циклу, про які було вказано вище.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз методів еколого-економічного оцінювання сільськогосподарських систем, як-от еколого-економічний аналіз та оцінка життєвого циклу, показує наявність таких недоліків: економічній оцінці підлягає лише незначна частина збитків, завданих сільським господарством навколишньому середовищу; екологічні, соціальні, медико-біологічні збитки традиційного землекористування не знаходять свого відображення в діяльності окремого підприємства і не враховуються в собівартості продукції, та, відповідно, у роздрібній ціні, що сплачується споживачем.

Фактично лише ринкова ціна на продукти, вирощені органічними методами, може вважатися «справжньою ціною», що засвідчує справжню вартість харчових продуктів за обережного ставлення до природи, враховуючи принципи екологічного землекористування.

«Методика визначення шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства», що наразі діє, потребує доопрацювання, адже вона не враховує всіх негативних складових. Методи оцінювання соціальних, медико-біологічних збитків відсутні, тому потребують розробки.

Впровадження інновацій та перехід до еколого-безпечих систем виробництва сільськогосподарської продукції в Україні стримуються через недосконалість методів еколого-економічної оцінки сільськогосподарських систем, відсутністю належного державного контролю за якістю продукції та контролю за реєстрацією та ринком пестицидів і мінеральних добрив, відсутністю мотивуючих умов для переходу до органічного землекористування, як-от впровадження системи дотацій органічним виробникам, зменшення ставки оподаткування, полегшення процедури сертифікації та зниження її вартості, запровадження вживання органічної продукції в громадському харчуванні (досвід ЄС), введення додаткового оподаткування сільськогосподарських підприємств, які використовують пестициди та мінеральні добрива (додатковий податок на забруднення).

ЛІТЕРАТУРА

1. Wang, G., Shi, R., Mi, L., & Hu, J. (2022). Agricultural Eco-Efficiency: Challenges and Progress. *Sustainability*, 14(3), 1051. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14031051>.
2. Мішенін, Є. В., Сотник, І. М., Мішеніна, Н. В., & Галиця, І. О. (2014). *Теорія еколого-економічного аналізу: навч. посіб.* (Є. В. Мішенін, Ред.). Суми: Сумський державний університет.
3. Кучер, А. (2017). Ефективність органічного землекористування. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 3(3), 41–62. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/areis_2017_3_3_6.
4. Зиновчук, Н. В., & Чудовська, В. А. (2013). Сучасні чинники розвитку органічного сільського господарства в Україні. *Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету*, 1–2(2), 296–303.
5. Шкуратов, О. І., Чудовська, В. А., & Вдовиченко, А. В. (2015). *Органічне сільське господарство: еколого-економічні імперативи розвитку*. Київ: ТОВ «ДІА».
6. Чайка, Т. О. (2013). *Розвиток виробництва органічної продукції в аграрному секторі економіки України*. (Н. М. Сіренко, Ред.). Донецьк: Ноулідж.
7. Безус, Р. М. (2014). *Організаційно-економічні засади ефективного розвитку органічного агровиробництва*. Дніпро: Лізунов Пресс.
8. Корчинська, О. А. (2015). *Організаційно-економічне регулювання розширеного відтворення родючості ґрунтів*. Київ: ННЦ «ІАЕ».
9. Knudsen, M. T., Cederberg, C., & Van der Werf, H. (2020). Evaluer les impacts environnementaux de l'agriculture biologique: l'analyse du cycle de vie doit faire mieux. *Innovations Agronomiques*, 80, 113–121. URL: https://www.researchgate.net/publication/354493195_Evaluer_les_impacts_environmentaux_de_l'agriculture_biologique_l'analyse_du_cycle_de_vie_doit_faire_mieux.
10. Zamagni, A., Guinée, J., Heijungs, R., Masoni, P., & Raggi, A. (2012). Lights and shadows in consequential LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 17(7), 904–918. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0423-x>.

11. Дребот, О. І., & Лазаренко, В. І. (2023). Оцінка передумов розвитку органічного сільського господарства. *Агроекологічний журнал*, 4, 108–115. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293810>.
12. Бурляй, А. П., Бурляй, О. Л., & Непочатенко, О. А. (2018). Вплив діяльності сільськогосподарських підприємств на навколишнє природне середовище. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*, 20(1), 64–69. URL: <http://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/7824>.
13. Бордюжа, А. С. (2014). Еколого-економічні показники оцінювання стану сільськогосподарського землекористування. *Агросвіт*, 11, 48–53.
14. Томчук, О. Ф., & Кожухар, В. В. (2019). Аналіз ефективності використання земельних ресурсів. *Агросвіт*, 19, 38–46. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2019.19.38>.
15. Чогут, Г. І. (2005). Визначення еколого-економічної ефективності використання сільськогосподарських земель. *Вісник ВДУ*, 2, 74–78.
16. Лиса, О. В., & Андрушко, Р. П. (2017). Оцінка якості сільськогосподарської продукції. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/12/122.pdf>.
17. Aubert, C., Mayer Mustin, C., Mustin, M., & Lairon, D. (2023). *L'agriculture biologique malmenee, 10 mythes a deconstruire*. URL: <https://www.generations-futures.fr/wp-content/uploads/2023/08/labio-malmenee-vf-bad-31-juillet-2023.pdf>.
18. Rastoin, J-L. (2022). Coûts cachés et juste prix de notre alimentation. *l'Academie d'Agriculture de France*. URL: <https://academie-agriculture.fr/publications/encyclopedie/questions-sur/1007q06-couts-caches-et-juste-prix-de-notre-alimentation>.
19. Державна служба статистики України. (2025). Поточні витрати та капітальні інвестиції на охорону навколишнього природного середовища у сільському господарстві України з розподілом за видами природоохоронних заходів. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>.
20. Балюк, С. А., Шимель, В. В., & Соловей, В. Б. (2024). Про стан та завдання відновлення, охорони і управління ґрунтовими ресурсами України. *Вісник аграрної науки*, 2, 5–10. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202402-01>.
21. Методика визначення шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища № 171 (1997). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98#Text>.
22. OrganicInfo. *Загальна площа органічних сільськогосподарських земель, 2024 рік*. URL: <https://organicinfo.ua/infographics/organic-map-of-ukraine-2024/>.
23. Tuck, S. L., Winqvist, C., Mota, F., Ahnström, J., Turnbull, L. A., & Bengtsson, J. (2014). Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. *J. Appl. Ecol.*, 51, 746–755. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12219>.
24. Примірня методика визначення вартості життєвого циклу. Наказ Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства № 1894 (2020). (Україна). URL: <https://me.gov.ua/LegislativeActs/Detail?lang=uk-UA&id=32140d03-d5eb-4988-8790-6d60d1c84a93>.

Стаття надійшла до редакції журналу 28.10.2025

GLOBAL MARKET OF BIOLOGICAL PRODUCTS: TRENDS, CHALLENGES, AND FUTURE OUTLOOK

D. Yakovenko^{1,3}, V. Boroday^{1,2}

¹ Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: yakovenko.do@gmail.com; ORCID: 0009-0008-8239-7684

² Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)
e-mail: veraboro@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8787-8646

³ ТОВ «Компанія «БТУ-Центр»

Біологічні препарати — біопестициди, біостимулятори та біодобрива — дедалі більше розглядаються як ключові інструменти сталого розвитку агросектору, що дають змогу зменшити застосування хімічних засобів, покращити стан ґрунтів і підвищити стійкість культур до біотичних та абіотичних чинників. Актуальність дослідження зумовлена політичними стратегіями, зокрема «Від лану до столу» Європейського Союзу, яка передбачає скорочення використання пестицидів на 50% та мінеральних добрив на 20–30% до 2030 р. Проведено комплексний мета-аналіз наукових публікацій 2020–2024 рр., галузевих аналітичних звітів та регуляторних документів, що визначають правила реєстрації біологічних продуктів у країнах ЄС та інших юрисдикціях. Отримані результати свідчать про стабільні агрономічні переваги застосування біологічних продуктів, біодобрива забезпечують приріст урожайності в середньому на 12–25%, а біостимулятори підвищують ефективність використання елементів живлення на 9–15% та посилюють стійкість рослин до абіотичних стресів. Однак складність і тривалість реєстраційних процедур для біопестицидів, обмеження переліку дозволених мікроорганізмів у законодавстві ЄС для біостимуляторів, а також відсутність уніфікованих методів оцінки «здоров'я ґрунтів» на сьогодні є основними перешкодами розвитку ринку біопрепаратів. Найбільші труднощі відчують малі та середні підприємства (МСП), які не мають ресурсів для проходження багаторічних регуляторних процедур, що сприяє ринковій концентрації на користь транснаціональних корпорацій. Для досягнення цілей сталого розвитку необхідна реформа регуляторних систем, гармонізація міжнародних стандартів та впровадження пропорційних до ризику вимог. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням технологій формуляції біопрепаратів, інтеграцією цифрових інструментів моніторингу та проведенням довгострокових досліджень впливу біологічних продуктів на екосистемні послуги та відновлення ґрунтів.

Ключові слова: біопестициди, біостимулятори, біодобрива, здоров'я ґрунтів, Європейський зелений курс, стратегія «Від лану до столу», малі та середні підприємства (МСП), бар'єри для інновацій.

INTRODUCTION

The agricultural sector faces unprecedented challenges in meeting growing food demand while addressing environmental sustainability imperatives [1]. Biological products such as encompassing biocontrol agents, biostimulants, and biofertilizers have emerged as critical tools for sustainable intensification, offering alternatives to synthetic inputs while maintaining or enhancing productivity [2]. This transition is not merely market-driven but mandated by policy frameworks, most notably the European Union's Farm to Fork

Strategy, which establishes legally binding targets for pesticide and fertilizer reduction by 2030 [3].

The biologicals market has experienced remarkable growth, with global valuations exceeding USD 10 billion in 2023 and compound annual growth rates (CAGR) of 12–16% across product categories [4]. The biopesticide segment alone demonstrates a CAGR of 16.1% for 2019–2025, while the U.S. biofertilizer market is projected to surpass USD 1 billion by 2029 [5; 6]. This commercial momentum reflects both regulatory pressure and growing recognition of biological products'

potential to address soil health degradation, climate resilience, and sustainable intensification challenges [7].

However, significant barriers persist in translating scientific advances into commercial success. Regulatory frameworks, particularly in developed markets, impose complex, lengthy approval processes that disproportionately affect small and medium-sized enterprises (SMEs). The European Union's dual-tier authorization system, requiring both active substance approval and product-specific registration, can extend market entry timelines to nearly a decade, effectively excluding innovative SMEs from key markets [8].

Analysis of the current state of the global biologicals market through multiple lenses: scientific evidence supporting product efficacy, market dynamics and growth projections, regulatory challenges affecting innovation accessibility, and emerging technological trends likely to shape the sector through 2035 is actual. Particular attention needs to the tension between ambitious sustainability targets and regulatory frameworks that may inadvertently impede the transition they seek to accelerate.

The objective of this review is to analyze the global market of biological products by integrating evidence on scientific efficacy, market growth dynamics, and regulatory frameworks. Special attention is given to the challenges faced by small and medium-sized enterprises (SMEs) under current regulatory systems, as well as to emerging technological innovations likely to shape the sector through 2035.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

Literature Search Strategy. We conducted a comprehensive literature review using multiple databases (Google Scholar, PubMed, Web of Science) covering the period 2020–2024. Search terms included combinations of «biological products», «biostimulants», «bio-control», «biofertilizers», «sustainable agriculture», and «regulatory framework». The search strategy employed both keyword and

semantic search approaches to ensure comprehensive coverage of relevant literature.

Market Data Analysis. Market data were compiled from industry reports, regulatory documents, and peer-reviewed publications. We analyzed trends using compound annual growth rate (CAGR) calculations and regional market segmentation. The main sources included market reviews from research of the market companies such as Dunham Trimmer market analyses, Mixing Bowl Hub landscape reports, and official regulatory agency publications.

Regulatory Framework Assessment. Regulatory requirements were analyzed across major jurisdictions in the EU and other parts of the world using official regulatory guidance documents and industry compliance reports. We examined registration timelines, data requirements, and cost implications for different enterprise sizes.

Selection Criteria. We included peer-reviewed articles, government reports, and industry analyses published in English between 2020–2024, focusing on quantitative data and evidence-based assessments. Studies were selected based on methodological rigor, sample size adequacy, and relevance to commercial biological product applications.

RESULTS AND DISCUSSION

Scientific Evidence and Efficacy Data. Quantitative Performance Metrics. Recent meta-analytical studies provide robust evidence for biological product efficacy across diverse agricultural systems. Biofertilizers demonstrate consistent yield improvements of 12–25% compared to untreated controls, with particularly strong effects in nutrient-limited environments [9]. Biostimulants enhance nutrient use efficiency by 9–15% while improving crop tolerance to abiotic stresses including drought, salinity, and temperature extremes [10]. Field trial data from standardized multi-environment studies reveal quantifiable soil health improvements. Three-year trials demonstrate that biostimulant applications increase soil humus content by 1.4–12.8% compared to baseline conditions, while no-till systems combined with biostimulants

raise water-soluble soil carbon by approximately 9.0% versus 2.3% under reduced tillage alone [11].

Mechanistic Understanding and Variability. Despite documented benefits, mechanistic understanding remains incomplete, contributing to variable field performance across environments and cropping systems. Microbial biostimulants, including bacterial and fungal inoculants, show particular sensitivity to indigenous microbiome interactions and environmental conditions, resulting in inconsistent efficacy across locations [12].

Market Dynamics and Growth Projections. Global Market Segmentation. The global biologicals market exhibits strong segmentation across product categories and geographic regions. Dunham Trimmer Market Analysis (2024), that reproduced with data from publicly available market presentation for academic research purposes, demonstrates robust growth across all segments, with biocontrol products representing the largest segment, projected to reach USD 14.5 billion by 2027 with a CAGR ranging from 12.31% to 13.42% (Fig. 1) [4].

Biostimulants follow with projections reaching USD 7 billion by 2027, while biofertilizers, though smaller in absolute terms, show the highest growth rate at 13.42% CAGR. This growth pattern reflects increasing recognition of biological products' role in addressing soil health concerns and input cost volatility [17].

Industry Landscape and Corporate Positioning. The Mixing Bowl Hub (2025) developed the comprehensive landscape of crop biostimulant companies, organized by product categories and technological approaches, reproduced from publicly available industry report for academic analysis. The map categorizes companies by product type including microbial extracts, botanical extracts, seaweed extracts, protein hydrolysates, and other specialized categories, demonstrating the diversity and segmentation within the biologicals market (Fig. 2).

The landscape reveals significant diversity in technological approaches, with companies positioned across multiple categories inclu-

ding microbial extracts, botanical extracts, seaweed derivatives, protein hydrolysates, and specialized nutrient-cycling inoculants. This segmentation reflects both market opportunities and complex regulatory challenges facing different product categories [13].

Regulatory Framework Analysis. European Union Regulatory Complexity. The European Union's regulatory framework creates significant barriers for biological product commercialization. EU Regulation 2019/1009 establishes classification challenges for bacterial products, as definitions and permitted claims differ between the categories of fertilizers, biostimulants and plant protection products [14]. The two-tier authorization system requires both active substance approval and product-specific authorization, creating duplicative data requirements and extended timelines approaching 10 years for novel products [8].

Biostimulants and Biofertilizers Regulatory Pathways. In the European Union, biostimulants and microbial fertilizers follow a partially distinct regulatory trajectory compared to biocontrol products. Until recently, most microbial biostimulants could only be registered at the national level, often under categories such as plant aids, soil conditioners, or microbial fertilizers. Mutual Recognition mechanisms have provided opportunities for cross-border market access; however, certain Member States, including Romania, Hungary, and France, apply restrictive policies that limit recognition of foreign registrations.

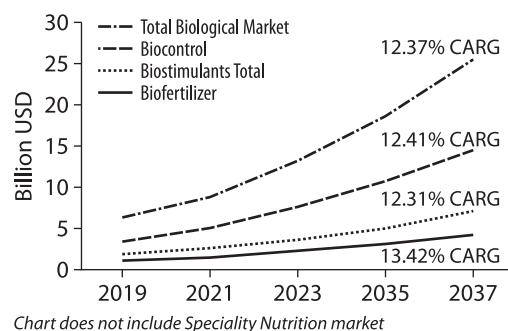


Fig. 1. Global Biological Market Evolution (2019–2027)

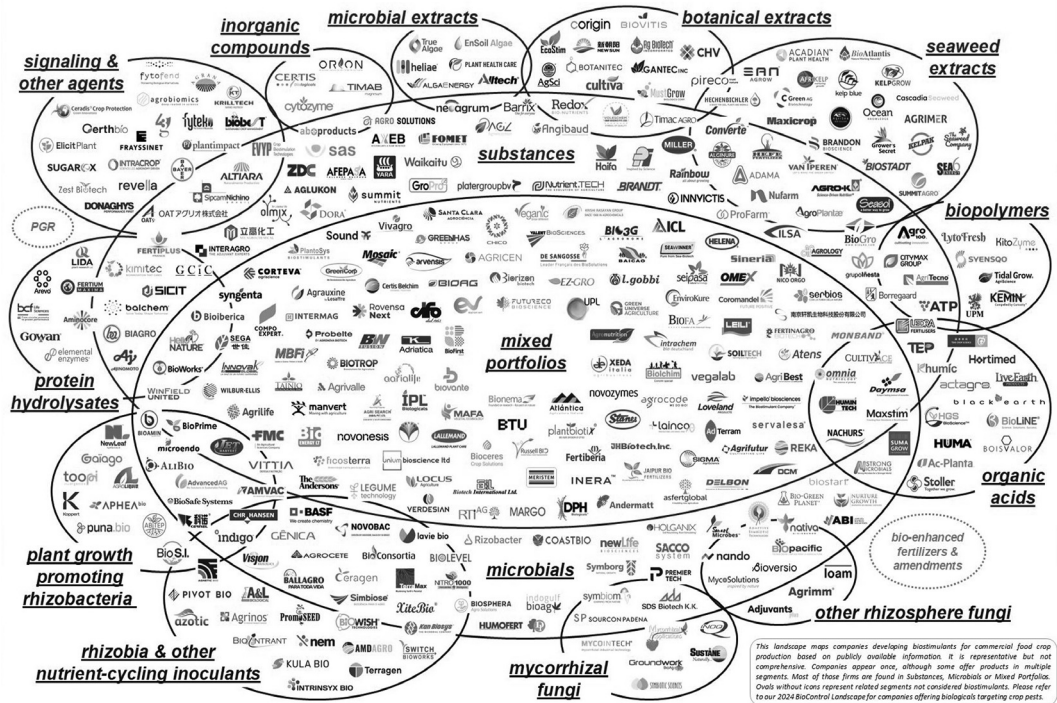


Fig. 2. Comprehensive overview of agricultural biostimulants companies and segmentation of crop biostimulants (2025) [13]

The adoption of Regulation (EU) 2019/1009 on EU Fertilising Products introduced a harmonized pathway for biostimulants at the EU level. Nevertheless, the regulation currently permits only a narrow set of microbial taxa – specifically *Azotobacter* spp., *Azospirillum* spp., *Rhizobium* spp., and arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus* spp.) – to be used in EU-labelled microbial fertilizers. Expansion beyond this limited list requires regulatory updates.

Ongoing discussions within the European Commission and expert working groups focus on developing science-based criteria to include additional microbial strains. However, substantial revisions are not expected before 2027, leaving many innovative microbial biostimulants outside the harmonized framework in the near term. This regulatory lag slows innovation diffusion and disproportionately affects SMEs seeking EU-wide market access [14].

SME-Specific Market Access Barriers for Biopesticides. Small and medium-sized enterprises face disproportionate regulatory burdens that effectively exclude them from major markets. Regulatory costs can exceed USD 1–5 million per product for comprehensive dossiers, representing prohibitive investments for companies with limited resources [15]. Extended approval timelines compound these challenges by delaying revenue generation and increasing financial risk.

Technological Innovation Trends. Advanced Formulation Technologies. Formulation remains one of the most critical bottlenecks for the widespread commercialization of biological products. Many companies continue to rely on first-generation liquid formulations, which typically provide only limited shelf life and moderate field stability. Although effective in controlled conditions, their variability under diverse environments restricts farmer confidence and adoption.

Industrial research has explored microencapsulation technologies, which can extend microbial viability and allow controlled release. However, these methods are often expensive, difficult to scale, and therefore remain limited to niche products. Other approaches, such as spray drying and lyophilization, offer industrial feasibility but are only applicable to a narrow range of microbial species.

Formulation innovation addresses critical commercialization bottlenecks including shelf-life limitations and environmental stability. Encapsulation technologies using biopolymer matrices and controlled-release systems extend microbial viability to three months or longer, addressing critical shelf-life limitations that have historically constrained biological product adoption.

As a result, there is a clear market demand for stable, efficient, and cost-effective formulations that can maintain microbial efficacy during storage, transport, and field application. Continuous innovation in carriers, protective agents, and formulation processes is expected to remain a central research focus in the coming years [16–20].

From Mechanistic Research to Field-Relevant Evidence. Beyond formulation, another important frontier lies in strengthening the scientific evidence base for biologicals. While a large body of highly specific academic research exists — often at the molecular or physiological level — there is a relative scarcity of generalized, field-relevant datasets that demonstrate consistent impacts on soil health, crop productivity, and stress resilience.

Current challenges include the difficulty of defining and measuring soil health, as well as linking laboratory findings with practical farm-scale outcomes. Even when products demonstrate promising results in trials, the mechanisms of action frequently remain only partially understood, limiting their acceptance in regulatory frameworks.

With more systematic research, meta-analyses, and cross-environment datasets, the industry will gain a more precise and consistent approach to biological product use. This integration — combining detailed mechanistic insights with large-scale, field-validated

evidence — will be crucial for building farmer trust, supporting regulatory dossiers, and accelerating mainstream adoption.

Evidence Base and Practical Implementation Gaps. The accumulated scientific evidence demonstrates that biological products deliver significant agronomic benefits across diverse cropping systems. Meta-analytical studies consistently report yield improvements of 12–25% with biofertilizers and nutrient-use efficiency gains of 9–15% with biostimulants [9; 10]. These findings are corroborated by large-scale industry datasets, including systematic commercial trials spanning multiple crop groups and geographic regions, which independently confirm yield increases exceeding 10% under practical farming conditions.

However, aggregate performance metrics mask substantial field-to-field variability driven by soil characteristics, environmental conditions, indigenous microbiome composition, and agronomic management. This variability represents the sector's most critical challenge: while biologicals consistently demonstrate positive effects in controlled meta-analyses, individual farmer experiences may diverge significantly from expected outcomes. The problem lies not in insufficient efficacy data but in the absence of standardized testing protocols, predictive models for environment-specific performance, and universally accepted metrics for soil health improvement.

Addressing these gaps requires several complementary approaches. They could include such ones. First, the establishment of standardized multi-environment testing protocols that enable cross-study comparisons and meta-analytical synthesis is necessary. Second, the development of diagnostic tools, including NDVI imaging, drone-based monitoring, and microbiome profiling platforms such as BIOTREX and Biome Makers that enable real-time performance validation and adaptive management recommendations. Third, the integration of omics-technologies to identify molecular markers associated with efficacy, enabling both mechanistic understanding and environment-specific product selection.

The transition from promising laboratory results to consistent field performance thus depends less on additional proof-of-concept studies than on systematic evidence generation at scales relevant to commercial agriculture.

Regulatory Frameworks as Innovation Bottlenecks. Market projections indicate robust growth potential, with compound annual growth rates of 12–13% across biological product categories driven by policy mandates and farmer demand for sustainable alternatives. Yet regulatory complexity systematically constrains this potential, creating a paradox wherein ambitious sustainability targets coexist with approval systems that impede the innovations necessary to achieve those targets.

The European Union's regulatory politic exemplifies these contradictions. For biocontrol products, Regulation (EC) No 1107/2009 establishes a two-tier authorization system requiring both active substance approval and product-specific registration. This process imposes timelines approaching ten years and costs that according to industry estimates reach several million Euros per product [15]. For biostimulants and microbial fertilizers, Regulation (EU) 2019/1009 created a harmonized pathway but with severely restricted scope: only four microbial genera (*Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, and arbuscular mycorrhizal fungi) currently qualify for EU-wide registration as microbial fertilizers. Expansion of this list remains under discussion but is not anticipated before 2027, leaving most innovative microbial products confined to fragmented national registration systems where Mutual Recognition is applied inconsistently, particularly in restrictive markets such as Romania, Hungary, and France.

These barriers disproportionately affect small and medium-sized enterprises, which lack the regulatory expertise, capital reserves, and product portfolios to absorb extended approval timelines and duplicative data generation costs. The result is market consolidation favoring established multinationals capable of navigating regulatory complexity, while

innovative SMEs, which are often the source of technological innovations, face effective exclusion from key markets.

International associations including IBMA, EBIC, and IBPA have advocated for regulatory harmonization and streamlined approval pathways for two decades. While these efforts have yielded incremental improvements, the fundamental structure remains prohibitively complex for most SMEs. More importantly, the regulatory lag between scientific innovation and market authorization creates a temporal mismatch: by the time novel biologicals complete registration, market conditions, agronomic challenges, and competitive landscapes may have shifted substantially.

Beyond Europe, this regulatory model exerts global influence. Many OECD countries and markets influenced by EU standards — including Morocco, Kenya, and South Africa — effectively require prior EU or OECD registration as a prerequisite for domestic approval. This regulatory cascading amplifies the EU system's SME-exclusionary effects across multiple continents, limiting farmer access to biological innovations precisely in regions where climate challenges and soil degradation create the most urgent need for sustainable intensification tools.

Policy Reform Imperatives. Achieving the European Union's Farm to Fork Strategy targets, which include 50% reduction in chemical pesticide use and 20–30% reduction in fertilizer use by 2030, requires policy coherence between sustainability ambitions and regulatory enablement [3]. Current frameworks create structural contradictions that undermine stated objectives by restricting access to the very tools needed for chemical input substitution. Priority reforms should address such critical dimensions as regulatory harmonization across jurisdictions to eliminate duplicative testing requirements and enable mutual recognition of safety assessments (International standards developed through organizations such as OECD would reduce the burden of multiple national submissions while maintaining appropriate safety oversight); risk-proportionate data requirements

that match regulatory stringency to product risk profiles (low-risk biologicals with established safety records should face expedited pathways rather than requirements designed for novel synthetic chemistry); SME-specific approval mechanisms including tiered data packages, extended proprietary protection periods to justify investment, and technical assistance programs that democratize regulatory navigation.

The biostimulant and biofertilizer regulatory pathway offers a model for accelerated reform. Expanding the approved microbial genera list beyond the current four taxa, establishing clear criteria for inclusion of new strains based on risk assessment rather than arbitrary restrictions, and harmonizing national registration systems would substantially accelerate innovation diffusion. These measures need not compromise safety; rather, they would align regulatory procedures with the lower risk profiles that distinguish biological products from synthetic chemistry.

Without such reforms, the Farm to Fork Strategy's ambitious targets risk becoming aspirational rhetoric rather than achievable objectives. The gap between policy intention and regulatory reality creates a credibility challenge that undermines stakeholder confidence in sustainability transitions.

Technological Trajectories and Industry Evolution. The sector's future development will be shaped by advances across three interconnected domains: formulation technologies, scientific evidence of integration systems, and digital agriculture platforms.

Formulation innovation addresses the sector's most persistent commercialization bottleneck. Many current products rely on first-generation liquid formulations with limited shelf life and environmental stability, constraining distribution infrastructure and farmer adoption. While microencapsulation technologies using biopolymer matrices offer promising pathways to extended viability — potentially achieving shelf lives exceeding three months — these approaches remain expensive and difficult to scale [16–20]. Industrial techniques including spray drying and lyophilization provide manufacturability but

apply to limited microbial species. The development of cost-effective, widely applicable stabilization technologies represents a critical enabling requirement for market expansion, particularly in distribution-challenged regions.

Evidence-based integration systems will determine the sector's credibility trajectory. The current evidence base, while demonstrating aggregate efficacy, lacks the standardization and environmental specificity needed for precision application recommendations. Future advances depend less on additional laboratory proof-of-concept studies than on systematic, multi-environment field trials that generate predictive models for product-by-environment interactions. Integration of real-time diagnostic tools — foliar analysis, NDVI monitoring, soil microbiome profiling — with machine learning algorithms can transform biologicals from inputs applied on faith to precision tools deployed based on measured soil-plant-microbe status.

Digital agriculture convergence represents the sector's most transformative potential. Artificial intelligence platforms that integrate trial data, environmental monitoring, and agronomic management can optimize application timing, predict performance, and enable adaptive management strategies. Start-ups specializing in AI-based diagnostics and decision support systems are increasingly acquisition targets for multinationals seeking to differentiate commodity biologicals through data-enhanced value propositions. This convergence of biotechnology, agronomy, and data science signals the sector's evolution from product-centric to system-solution business models.

These technological trajectories will unfold against a backdrop of continued industry consolidation. Large corporations will likely continue acquiring innovative SMEs and specialized technology platforms, leveraging scale advantages in regulatory navigation, distribution infrastructure, and market access. However, the sector's innovation vitality depends on maintaining a diverse ecosystem where niche SMEs can develop novel formulations, target specialty crops, and create

diagnostic-integrated services before potential acquisition. Regulatory frameworks that facilitate rather than impede SME market entry thus serve not only equity objectives but also innovation sustainability.

Limitations and Future Research Directions. This review has several limitations that warrant acknowledgment. First, the market data synthesis relies heavily on industry reports rather than peer-reviewed economic analyses, reflecting the paucity of academic attention to biologicals market dynamics. Second, regulatory analysis focuses primarily on European and OECD systems, with limited coverage of rapidly evolving frameworks in LATAM and Asia-Pacific regions that may offer alternative models. Third, the efficacy evidence reviewed, while extensive, derives predominantly from biofertilizer and biocontrol categories, with biostimulants remaining less thoroughly documented in peer-reviewed literature.

Future research should prioritize several critical gaps. Among them the systematic meta-analyses examining moderators of biological product efficacy—particularly soil properties, climate variables, and management interactions—would enable environment-specific recommendations. In addition, economic analyses comparing total cost-of-ownership for biological versus conventional input systems, accounting for soil health improvements and long-term sustainability benefits, would strengthen adoption business cases. Moreover, comparative regulatory analyses examining approval efficiency, safety outcomes, and innovation rates across different jurisdictional frameworks would inform evidence-based policy reform. Finally, longitudinal studies documenting soil microbiome shifts, carbon sequestration, and ecosystem service provision under biological product regimes would quantify sustainability benefits beyond immediate yield effects.

CONCLUSIONS

The global biologicals market represents a critical pathway toward sustainable agriculture, supported by robust scientific evidence and driven by policy imperatives including the EU's Farm to Fork Strategy. The market analysis demonstrates significant growth potential, with projections indicating expansion from USD 10 billion in 2023 to USD 25+ billion by 2027, driven by CAGRs exceeding 12% across all product categories.

However, regulatory frameworks create substantial barriers to innovation and market access, particularly for SMEs that drive sector innovation. The current system's complexity, exemplified by EU registration timelines approaching 10 years and duplicative data requirements, contradicts policy objectives by impeding the innovations needed to achieve sustainability targets.

The industry landscape reveals a diverse ecosystem of companies employing varied technological approaches, yet regulatory barriers may consolidate this diversity into fewer, larger players with regulatory resources. This consolidation risks reducing innovation potential and limiting farmer access to biological tools.

Future success in biologicals depends on regulatory reform that democratizes access to innovation while maintaining appropriate safety standards. This requires harmonized international frameworks, SME-specific approval pathways, and risk-proportionate data requirements that match the urgency of sustainability imperatives.

The transition to sustainable agriculture is not merely a technical challenge but a systemic transformation requiring aligned policies, accessible innovations, and supportive market frameworks. The biologicals sector offers proven tools for this transition, but unlocking their full potential requires regulatory evolution that matches the urgency of global sustainability challenges.

REFERENCES

1. 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>.
2. Jindo, K., Goron, T. L., & Pizarro-Tobías, P. (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>
3. European Commission. (2020). A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM (2020) 381 final. URL: https://www.food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en.
 4. Trimmer, M. (2023). Biocontrol Market: Status and Trends. Presentation at Biocontrol & Biomes, November 29, 2023. DunhamTrimmer LLC. URL: <https://www.informaconnect.com/biocontrol-biomes/speakers/mark-trimmer-phd/>.
 5. Khangura, R., Ferris, D. D., & Wagg, C. D. (2023). Regenerative Agriculture — A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. *Sustainability*, 15(3), 2338. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032338>.
 6. Jiang, Y., Yue, Y., & Wang, Z. (2024). Plant Bio-stimulant as an Environmentally Friendly Alternative to Modern Agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(9), 4771–4785. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c09074>.
 7. Miranda, A., Hernandez-Tenorio, F., & Villalta, F. (2024). Advances in the Development of Biofertilizers and Biostimulants from Microalgae. *Biology*, 13(3), 199. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology13030199>.
 8. Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market. *Official Journal of the European Union*, L30 9, 24.11.2009. URL: <https://www.eur-lex.europa.eu/eli/reg/2009/1107/oj/eng>.
 9. Schütz, L., Gattinger, A., & Meier, M. (2018). Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization — A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2204. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>.
 10. Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1–2), 3–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11044-014-2131-8>.
 11. Butkevičienė, L. M., Steponavičienė, V., & Pupaliene, R. (2023). Effect of Different Tillage Systems and Soil Biostimulants on Agrochemical Properties and Intensity of Soil CO₂ Emission in Wheat Crop. *Agronomy*, 13(2), 338. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020338>.
 12. Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., & Yakhin, I. A. (2017). Biostimulants in plant science: a global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>.
 13. Mixing Bowl Hub (2025). 2025 Crop Biostimulant Landscape. *Salinas Biological Summit*. URL: <https://www.mixingbowlhub.com/landscape/2025-crop-bio-stimulant-landscape>.
 14. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products. *Official Journal of the European Union*, L 170, 25.6.2019. URL: <https://www.eur-lex.europa.eu/eli/reg/2009/1107/oj/eng>.
 15. Ansari, M. (2021). Biopesticide Registration: Difficulties and Challenges Within the Industry. *Outlooks on Pest Management*, 32, 255–257. DOI: https://doi.org/10.1564/v32_dec_08.
 16. John, R. P., Tyagi, R. D., Prévost, D., Brar, S. K., Pouleur, S., & Surampalli, R. Y. (2011). Bio-encapsulation of microbial cells for targeted agricultural delivery. *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(3), 211–226. DOI: <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.513327>.
 17. Dunham Trimmer. (2024). Global Biostimulant Market Report. URL: <https://www.dunhamtrimmer.com/>.
 18. Bashan, Y., & de-Bashan, L. E. (2010). How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment and improvements. *Advances in Agronomy*, 108, 77–136. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8) (section on formulations & shelf-life).
 19. du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>.
 20. Roupheal, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), 1461. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>.
 21. Corsi, S., Ruggeri, G., & Zamboni, A. (2022). A Bibliometric Analysis of the Scientific Literature on Biostimulants. *Agronomy*, 12(6), 1257. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061257>.
 22. Reyes, P., Oliveros, J. C., & Racedo, C. (2024). Uso de la biodiversidad para mejorar la agricultura: tendencias en la investigación y el mercado en biofertilizantes en Colombia. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, 10, 06. DOI: <https://doi.org/10.53010/nys10.06>.
 23. Godlewska, K., Pacyga, P., & Michalak, I. (2021). Systematic Investigation of the Effects of Seven Plant Extracts on the Physiological Parameters, Yield, and Nutritional Quality of Radish (*Raphanus sativus* var. *sativus*). *Frontiers in Plant Science*, 12, 651152. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.651152>.
 24. Malik, A., Mor, V. S., & Tokas, J. (2020). Biostimulant-Treated Seedlings under Sustainable Agriculture: A Global Perspective Facing Climate Change. *Agronomy*, 11(1), 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010014>.
 25. Malusá, E., Pinzari, F., & Canfora, L. (2016). Efficacy of biofertilizers: challenges to improve crop production. *Microbial Biotechnology*, 9(3), 285–299. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12328>.
 26. Yakovenko, D. (2024). Takeouts of 2300+ Trials with Biofertilizers. *AgroPages*. URL: <https://news.agropages.com/News/NewsDetail—50714.htm>.
 27. Panagos, P., Borrelli, P., & Poesen, J. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Euro-

- pe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.
28. Vejan, P., Abdullah, R., & Khadiran, T. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability — a review. *Molecules*, 21(5), 573. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>.
29. Chabili, A., Minaoui, F., & Hakkoum, Z. (2024). A Comprehensive Review of Microalgae and Cyanobacteria-Based Biostimulants for Agriculture Uses. *Plants*, 13(2), 159. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13020159>.
30. Bulgari, R., Cocetta, G., & Trivellini, A. (2015). Bio-stimulants and crop responses: a review. *Biological Agriculture & Horticulture*, 31(1), 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1080/01448765.2014.964649>.
31. Povero, G., Mejia, J. F., & Di Tommaso, D. (2016). A systematic approach to discover and characterize natural plant biostimulants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 435. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00435>.
32. Backer, R., Rokem, J. S., & Ilangumaran, G. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>.
33. Neuhoff, D., Neumann, G., & Weinmann, M. (2024). Testing plant growth promoting microorganisms in the field — a proposal for standards. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1324665. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.132466>.

Стаття надійшла до редакції журналу 24.10.2025

ІНВАЗІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ *NICANDRA PHYSALODES* (L.) GAERTN. НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

В.В. Коніщук¹, І.В. Хом'як², І.В. Шумигай¹, В.В. Мартиненко¹

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

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

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

e-mail: martinenko.vasil@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2526-6732

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

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

Стаття присвячена визначенню інвазійного потенціалу *Nicandra physalodes* на території України. Метою цього дослідження є еколого-ценотичний аналіз особливостей *Nicandra physalodes* (L.) Gaertn. у локалітетах, що розташовані на межі Центрального Полісся та Правобережного Лісостепу, а також оцінити інвазійний потенціал у природно-географічному районі зростання. Задля досягнення зазначеної мети були поставлені такі завдання: класифікувати рослинні угруповання локалітетів зростання *N. physalodes* згідно з фітосоціологічною системою Браун-Бланке; встановити ценотичну приуроченість виду на межі Центрального Полісся та Правобережного Лісостепу; визначити екологічний спектр *N. physalodes* із використанням методів синфітоіндикації; оцінити інвазійний потенціал виду в межах досліджуваної території. Вид виявлено переважно на оброблюваних ділянках із насадженнями картоплі та цибулі, а також на перелогах першого та другого року після припинення обробітку ґрунту. Фітоценози з участю *Nicandra physalodes* належать до 1 класу, 3 порядків, 4 союзів і 4 асоціацій, серед яких виділено варіанти: *Ambrosio artemisiifoliae*—*Chenopodietum albi* var. *Nicandra physalodes*, *Echinochloo*—*Setarietum* var. *Nicandra physalodes*, *Portulacacetum oleraceae* var. *Nicandra physalodes* та *Erigeronto*—*Lactucetum serriolae* var. *Nicandra physalodes*. Рослинність описаних угруповань характеризується низьким флористичним різноманіттям (7–11 видів) і переважанням сегетальних та рудеральних елементів класів *Stellarietete mediae* та *Plantaginetea majoris*. За синфітоіндикаційним аналізом умови місцезростань виду визначено як субмезофітні-мезофітні, субацедофільні-нейтрофільні, мезотрофні-семіевтрофні, із найвищими амплітудами показників для багаторічного режиму зволоження (6,09%) та аерації ґрунту (6,93%) і найширшими — для змінності зволоження (15,91%) й вмісту сполук нітрогену (11,82%). Мікроклімат місцезнаходжень *N. physalodes* характеризується мезотермними, субконтинентальними умовами з еугемеробним рівнем антропогенної трансформації (11–11,5 балів). Встановлено низьку ефективність гербіцидів суцільної дії на основі *N*-(фосфометил) гліцину щодо контролю виду, що свідчить про його резистентність і високу екологічну пластичність. Отже, вид має високу екологічну пластичність і значний інвазійний потенціал, що сприяє його подальшому поширенню на території України, зокрема в умовах кліматичних змін і активного землекористування. Рекомендовано здійснити постійний моніторинг популяцій *N. physalodes* у межах агроландшафтів для запобігання його подальшому поширенню.

Ключові слова: інвазійний вид трансформер, насінні бур'яни, антропогенна трансформація, зміни клімату.

ВСТУП

Поширення інвазійних видів є комплексною та багатовекторною проблемою сучасного світу. Воно несе не лише прямі загрози сільськогосподарському виробництву чи здоров'ю людини, а й має не-

гативний вплив на природні екосистеми [1]. Часто відбувається зниження біорізноманіття природних екосистем та втрата його раритетних компонентів, через конкурентні переваги над аборигенною біотою [2]. До того ж порушуються структура та функції екосистем, які спричиняють зниження обсягів їхніх екосистемних послуг,

що стає доволі помітно, коли інвазійний вид — трансформер. Наприклад, останній переводить екосистеми в стан катастрофічного клімаксу і вони не в змозі депонувати вуглець у кількостях природних екосистем у стані термодинамічного клімаксу [3]. Порухення вертикальної структури через витіснення аборигенних видів нижніх ярусів зумовлює втрату функції водорегуляції та зменшення ресурсів для багатьох консументів.

Інвазійні види мають складні стратегії поведінки та добре прилаштовані до антропогенного тиску [1]. Це ускладнює боротьбу із їхнім поширенням. У більшості випадків заходи боротьби із ними дають незадовільні результати. Тому, заходи профілактики поширення інвазійних видів та ранні сповіщення про них можуть запобігти майбутнім катастрофам. Первинним заходом боротьби із інвазіями є моніторинг видів, які мають значний потенціал для цього. Такий моніторинг має бути спрямований на основні шляхи поширення цих видів. До них слід віднести свідоме перенесення видів із витою використання їх у сільському чи лісовому господарстві або декоративному квітникарстві та ландшафтному дизайні. Також часто відбувається спонтанне перенесення видів разом із саджанцями, плодами або насінням, переміщенням товарів та на частинах транспортних засобів.

Під час проведення досліджень території межі між Центральним Поліссям та Правобережним Лісостепом нами було помічено і обстежено кілька ділянок зайнятих *Nicandra physalodes* (L.) Gaertn. Ці особини знаходилися за межами їхнього попереднього культивування, що дало можливість висунути гіпотезу про інвазійний потенціал нікандри фізалісоподібної на цих територіях.

Метою дослідження є аналіз еколого-ценотичних характеристик *Nicandra physalodes*, локалітет розташованого на межі Центрального Полісся та Правобережного Лісостепу, а також визначення її інвазійного потенціалу. Відповідно до мети поставлено такі завдання:

- класифікувати рослинні угруповання локалітетів *Nicandra physalodes* за системою Браун-Бланке;
- визначити ценотичну приуроченість *Nicandra physalodes* на межі Центрального Полісся та Правобережного Лісостепу;
- розрахувати екологічний спектр *Nicandra physalodes* за допомогою методів синфітоіндикації;
- описати інвазійний потенціал *Nicandra physalodes* на межі Центрального Полісся та Правобережного Лісостепу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Нікандра фізалісоподібна представник родини *Solanaceae*. Цей вид походить із Південної Америки (території Перу, Аргентини, Болівії, північної та центральної частини Чилі), а із Перу її пов'язує народна назва «перуанське яблуко». З часом *Solanaceae* інтродукований майже по всьому світу в тропічних та помірних регіонах, та зустрічається, як у сегетальних, так і в рудеральних оселищах. В окремих випадках вид проникає на ділянки із порушеним або розрідженим травостоєм без значного антропогенного навантаження, а поширенню сприяє використання в квітникарстві та додавання насіння до корму деяких птахів.

У публікаціях А. Patzelt із співавт. [1] поширення *Nicandra physalodes* як інвазійного виду описується у різних частинах світу. Він є активним бур'яном в Азії, Австралії, Східній та Південній Африці та Південній Америці, а також є одним із найгірших бур'янів посівів сої в Бразилії. Наприклад, в Омані інвазійні види зустрічаються в 11 типах середовищ існування. Часто мова йде про стресові умови середовища, де нікандра трапляється в п'яти із них.

В Огайо (США) *Nicandra physalodes*, відома як Shoofly вперше зафіксована, як адвентивний вид ще в XIX ст. [3]. Улітку 2002 р. цей вид виявлений на полях та вздовж полезахисних лісосулг практично повсюдно в округах Сенека (Seneca) та Сандаскі

(Sandusky). В 2003 р. було встановлено, що інвазія проявляється на площі 809 га у радіусі 8 км навколо Фремонта. Середньостатистична популяція в районі Вудстера налічувала 1452 особини на площі 0,4 га, що зумовило зниження врожайності 1,2 т/га. Аналогічні зони масового поширення спостерігаються в Північній Кароліні, Вірджинії, Теннессі та Джорджії. Найчастіше вражаються поля арахісу, помідорів та сої. Через свою стійкість до гербіцидів та здатності виробляти спляче насіння вона завдає шкоди посівам таких культур, як соя, перець, огірки, помідори, дині, гарбузи та цибуля.

Досить широко вражений цими інвазіями африканський континент. В Ефіопії вона входить до переліку небезпечних бур'янів, що помітно шкодять сільськогосподарському виробництву. За співвідношенням (RF) абсолютного значення частоти виду до загальної абсолютної частоти всіх видів вона є рекордсменом серед інших бур'янів (RF=73%). Для порівняння: *Galinsoga parviflora* (RF=64%), *Cyperus rotundus* (RF=64%), *Xanthium strumarium* (RF=54%), *Amaranthus hybridus* (RF=56%), *Setaria verticillata* (RF=50%), *Datura stramonium* (RF=50%), *Argemone mexicana* (RF=43%), *Erucastrum abyssinicum* (RF=45%), *Xanthium spinosum* (RF=43%). Значення важливості цього виду, визначено за Shabbir і Bajwa 92%, що є максимальним для всіх інших бур'янів. У проведеному дослідженні А.Е. Terfa на території Північно-Східної Африки [5] встановлено, що вона разом із *Datura stramonium* є основними поширювачами вірусів роду *Capsicum*, мозаїки помідорів, огірків та картоплі.

У Південній Америці безпосередньо неподалік від природного ареалу виду є небезпечним бур'яном для значної кількості традиційних культур. Найбільше від них страждають плантації квасолі в Бразилії та Перу, що висвітлено у публікаціях таких іноземних учених, як С. da C. de Matos та J.L. Tejada [6; 7].

В Україні *Nicandra physalodes* до цього часу не привертала великої уваги дослідників, ні як бур'ян, ні як інвазійний вид.

Однак, зміни клімату в бік тропічних погодних умов, спроби адаптування до них сільськогосподарського виробництва наразі вимагають здійснення досить глибоких досліджень. Вона описана у наукових роботах О.М. Курдюкової, В.В. Тарасова, Р. Яворівського [8–10], як бур'ян для плантацій картоплі та овочевих культур на території Посушливого Степу та у степовій флорі Подніпров'я та на території Збарзького р-ну Тернопільської обл.

Nicandra physalodes не лише поширений бур'ян для деяких культур та інвазійний вид трансформер, і небезпечний для екосистем. Знайдені дані Lewis Walter H. [11], що вона отруйна й причетна до смертельного отруєння овець у Новому Південному Уельсі (Австралія) на пасовищі, де проективне покриття та розміри тіла виду були досить значними.

Отже, *Nicandra physalodes* несе три основні загрози для довкілля: як бур'ян для окремих сільськогосподарських культур, як інвазійний вид трансформер для біоти природних екосистем і як отруйна рослина для домашніх та диких травоядних.

МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Емпіричною базою дослідження послугували стандартні геоботанічні описи рослинності із участю *Nicandra physalodes*, зроблених у районі м. Корнин (Житомирська обл.) у 2025 р. Збір даних проводився за допомогою стандартних геоботанічних польових методів [12], що відповідають еколого-флористичним принципам швейцарсько-французької школи Браун-Бланке [5]. Розміри ділянок для опису відповідали візуальним гомогенним контурам рослинності площею близько 1 м².

Проективне покриття видів оцінювалось за семибальною шкалою Браун-Бланке. Класифікація геоботанічних описів виконувалась у програмному середовищі Turboveg 2.0 та JUICE 7.0. [13]. Диференціація рослинних угруповань на синтаксони здійснювалась завдяки «Продромусу рослинності України» [14]. Назви видів вищих судинних рослин використовуються згідно

зі списками наведеними в «Vascular plants of Ukraine. A nomenclatural checklist» [2].

Синфітоіндикаційний аналіз виконувався за допомогою програми Simargl на основі принципів закладених у роботі Я.П. Дідуха [15].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Nicandra physalodes зустрічається на оброблюваних ділянках із насадженнями картоплі та цибулі, а також на перелогах першого та другого року після припинення обробки ґрунту. Рослинність цих ділянок належить до 1 класу, 3 порядків, 4 союзів, 4 асоціацій та 4 її варіантів. Синтаксономічна схема має такий вигляд.

Stellarietea mediae R.Tx., Lohmaer et Preising 1950: *Atriplici-Chenopodietalia albi* (Tx. 1937). Nordhagen 1940: *Polygono-Chenopodion* Koch 1926: *Ambrosio artemisiifoliae-Chenopodietum albi* Marjushkina et Solomakhina 1985: *Ambrosio artemisiifoliae-Chenopodietum albi* var. *Nicandra physalodes*; *Panico-Setarion* Sissingh in Westhoff et al. 1946: *Echinochloo-Setarietum* Felföldy corr. 1942 Mucina in Mucina et al. 1993: *Echinochloo-Setarietum* var. *Nicandra physalodes*; *Eragrostietalia* J. Tx. ex Poli 1966: *Eragrostion* Tx. in Oberd. 1954: *Portulacetum oleraceae* Felföldy 1942: *Portulacetum oleraceae* var. *Nicandra physalodes*; *Sisymbrietalia sophiae* J. Tx. ex Görs 1966: *Sisymbion officinalis* Tüxen et al. ex von Rochow 1951: *Erigeronto-Lactucetum serriolae* Lohmeyer in Oberd. 1957: *Erigeronto-Lactucetum serriolae* var. *Nicandra physalodes*.

У флористичному оточенні цих видів переважають сегетальні види, характерні для класу *Stellarietea mediae* та рудеральні види класу *Plantaginetea majoris* (табл. 1). У кожному маловидовому описі зустрічаються *Ambrosia artemisiifolia* L. та *Chenopodium album* L., де кількість видів коливається від 7 до 11.

За даними синфітоіндикаційного аналізу едафічні умови місцезростань *Nicandra physalodes* субмезофітні-мезофітні, гемігідроконтрастобфобні-гемігідроконтрастобфільні, субацедофільні-нейтрофільні,

мезотрофні-семіевтрофні, гемікарбонатобфобні-акарбонатобфільні, гемінітрофільні-нітрофільні, субаеробфільні-геміаеробфобні (табл. 2). Це перекриває від 6,09% до 15,91% синфітоіндикаційних шкал.

Отже, найвужчі екологічні амплітуди мають багаторічний режим зволоження (6,09%) та аерація ґрунту (6,93), а найширші — змінність зволоження (15,91) й вміст сполук нітрогену (11,82%).

Мікроклімат описаних місцезнаходжень мезотермний-субмезотермний, геміокеанічний-субконтинентальний, мезоаридофітний-субаридофітний, гемікріофітний-акріофітний (табл. 3). Мікрокліматичні показники дають можливість встановити потенційний ареал інвазій *Nicandra physalodes* на території України. За показниками термо-, омборежиму та морозності, це спостерігається практично на всій території, крім крайньої північної та північно-східної частини Українського Полісся і високогір'я Карпат. Широка амплітуда показників чинників середовища за змінністю зволоження, термо- та омборежиму також вносить глобальні зміни клімату, що сприятливі для поширення виду.

Антропогенна трансформація екосистем, в яких нами описана *Nicandra physalodes*, коливається у межах 11–11,5 балів за шкалою Дідуха-Хом'яка, що відповідає еугемеробним умовам середовища (див. табл. 3). До того ж зміна показників антропогенних чинників коливається мінімально — 3,11% перекриття синфітоіндикаційної шкали. Відомо, що на деяких із описаних нами ділянок на початку літа застосовувались системні гербіциди суцільної дії на основі N-(фосфометил) гліцину.

Однак, він не розкрив своєї ефективності щодо *Nicandra physalodes* та певних видів насінних бур'янів, що не підвищило показники антропогенної трансформації до полігемеробності. На аналогічну неефективність більшості гербіцидів за винятком триазинової групи вказують дослідники із Огайо (США) [4; 16]. Це ускладнює контроль за поширенням виду в районі активного сільськогосподарського обробітку ґрунту.

Таблиця 1. Фітоценотична таблиця рослинних угруповань, до складу яких входить *Nicandra physalodes*

Номер опису Номер синтаксону	Синтаксони				
	1	2		3	4
Кількість видів	9	11	7	9	8
<i>Nicandra physalodes</i> (L.) Gaertn	5	4	4	3	3
<i>Portulaca oleracea</i> L.	4	2	2		
<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	1	1	1	1	1
<i>Polygonum aviculare</i> L.		r	r		
<i>Chenopodium album</i> L.	3	3	5	2	4
<i>Setaria glauca</i> (L.) P.Beauv	r	1		3	
<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.	2	2		5	
<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.				1	1
<i>Erigeron canadensis</i> L.					3
<i>Convolvulus arvensis</i> L.				2	1
<i>Lactuca serriola</i> L.					2
D.s. All. <i>Panico-Setarion</i>					
<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	1	3			
D.s. Cl. <i>Stellarietea mediae</i>					
<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.			1	2	
D.s. Cl. <i>Plantaginetea majoris</i>					
Tx. et Preising ex von Rochow 1951					
<i>Poa annua</i> L.		r			
<i>Plantago major</i> L.			r		
Інші види					
<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	r	4		2	
<i>Cuscuta epilinum</i> Weihe	1				
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L.Her.		1			
<i>Myosotis arvensis</i> (L.) Hill.					r

Примітки: синтаксони: 1 — *Portulacetum oleraceae* var. *Nicandra physalodes*; 2 — *Ambrosio artemisiifoliae-Chenopodietum albi* var. *Nicandra physalodes*; 3 — *Erigeronto-Lactucetum serriolae* var. *Nicandra physalodes*; 4 — *Echinochloo-Setarietum* var. *Nicandra physalodes*.

Таблиця 2. Синфітоіндикаційні показники едафічних чинників місцезнаходжень *Nicandra physalodes*

Статистичні характеристики	Показники чинників середовища (в балах за шкалою Дідуха-Плюти)						
	HD	FH	RC	SL	CA	NT	AE
Середнє	10,34	7,00	7,92	7,78	6,32	6,56	6,07
Максимум	11,18	7,61	8,61	8,56	7,00	7,13	6,68
Мінімум	9,78	5,86	7,21	6,46	5,83	5,83	5,64
Амплітуда	1,40	1,75	1,40	2,10	1,17	1,30	1,04
Відсоток від шкали	6,09	15,91	10,77	11,05	9,00	11,82	6,93

Примітки: HD — багаторічний режим зволоження, FH — змінність зволоження, RC — кислотність ґрунту, SL — загальний сольовий режим, CA — вміст карбонатів, NT — вміст сполук нітрогену, AE — аерація ґрунту.

Таблиця 3. Синфітоіндикаційні показники мікрокліматичних чинників, антропогенної трансформації та показники природної динаміки місцезнаходжень *Nicandra physalodes*

Статистичні характеристики	Показники чинників середовища, антропогенної трансформації та природної динаміки (в балах за шкалами Дідуха-Плюти та Дідуха-Хом'яка)						
	ТМ	ОМ	KN	CR	LC	HE	ST
Середнє	9,84	11,3	8,88	8,68	7,81	11,4	2,71
Максимум	10,46	11,8	9,13	9,12	7,94	11,5	3,12
Мінімум	9,28	10,2	8,22	8,33	7,57	11,0	2,33
Амплітуда	1,18	1,53	0,91	0,79	0,37	0,56	0,79
Відсоток від шкали	6,94	6,65	5,35	5,27	4,11	3,11	3,76

Примітки: ТМ — терморежим, ОМ — омборежим, KN — континентальність, CR — кріорежим, LC — освітленість, HE — ступінь антропогенної трансформації, ST — показник природної динаміки.

За показниками природної динаміки вид може існувати в досить вузькому діапазоні сукцесійних серій, пов'язаних із порушенням ґрунту (3,76%). На межі Полісся та Лісостепу — це рілля без активного застосування певних видів гербіцидів та перелоги перших двох років після припинення рільництва. Однак, південніше, де через мікрокліматичні умови може зустрічатися більш розріджена рослинність на таких типах ґрунтів, нікандра може проникати в екосистеми із показниками динаміки 2,33–3,12 бали [8; 9].

ВИСНОВКИ

За результатами дослідження було встановлено, що *Nicandra physalodes* (L.) Gaertn. на межі Центрального Полісся та Правобережного Лісостепу зростає на антропогенно-трансформованій території — землі сільськогосподарського обробітку та перелоги після першого року припинення рільництва. Рослинність даних ділянок належить до сегетально-рудеральних видів класу *Stellarietea mediae*, з домінуванням *Ambrosia artemisiifolia*, *Chenopodium album*, *Portulaca oleracea* та інших бур'янів, стійких до агротехнічних впливів. За синтаксономією ценози належать до чотирьох асоціацій: *Ambrosio artemisiifoliae*–*Cheno-*

podietum albi var. *Nicandra physalodes*, *Echinochloo*–*Setarietum* var. *Nicandra physalodes*, *Portulacetum oleraceae* var. *Nicandra physalodes* та *Erigeronto*–*Lactucetum serriolae* var. *Nicandra physalodes*.

За синфітоіндикаційними показниками *Nicandra physalodes* тяжіє до субмезофітних-мезофітних, мезотрофних-семіевтрофних, нейтрофільних-субацедофільних умов із достатньою аерацією ґрунту. Найширші екологічні амплітуди виявлено для змінності зволоження (15,91%) і вмісту сполук нітрогену (11,82%), що свідчить про адаптацію виду до коливань вологості та високої трофності ґрунту.

Мікроклімат місцезростань характеризується мезотермними, субконтинентальними умовами з еугемеробним рівнем антропогенної трансформації (11–11,5 балів). *Nicandra physalodes* є стійким видом до препаратів гербіцидної дії та має здатність утворювати стабільні угруповання в агроценозах та перелогах.

Тому, вид має велику екологічну пластичність та високий інвазійний потенціал, що є сприятливим для подальшого поширення його по всій території України навіть попри кліматичні зміни та активне використання земель за сільськогосподарським призначенням.

ЛІТЕРАТУРА

- І. Patzelt, A., Pyšek, P., Pergl, J., & van Kleunen, M. (2022). Alien flora of Oman: invasion status, taxonomic composition, habitats, origin, and pathways of introduction. *Biological Invasions*, 24(4), 955–970.

2. Mosyakin, S. L., & Fedoronchuk, M. M. (1999). *Vascular plants of Ukraine. A nomenclatural checklist*. Kyiv. National Academy of Sciences of Ukraine. MG Kholodny Institute of Botany.
3. Khomiak, I., Harbar, O., Kostiuk, V., Demchuk, N., & Vasylenko, O. (2024). Synphytoindication models of the anthropogenic transformation of ecosystems. *Natura Croatica*, 1, 65–77. DOI: <https://doi.org/10.20302/NC.2024.1.5>.
4. Khomiak, I. V., Onyshchuk, I. P., Vakerych, M. M., & Hasynech, Y. S. (2024). Adaptation strategies of *Heracleum sosnowskyi* in Ukrainian Polissia. *Biosystems Diversity*, 32(1), 99–106. DOI: <https://doi.org/10.15421/012409>.
5. Terfa, A. E. (2018). Weed species diversity, distribution and infestation trend in small scale irrigated vegetable production area of mid-rift-valley of Ethiopia. *Biodiversity International Journal*, 2(1), 75–81. DOI: <https://doi.org/10.15406/bij.2018.02.00047>.
6. De Matos, C. da C., Gandini, E. M. M., Silva, E. A., Dos Santos, J. B., & Ferreira, E. A. (2018). Accumulation potential and nutrient 909 cycling of apple of Peru. *Revista Caatinga*, 31(2). DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n212rc>. URL: <https://www.redalyc.org/journal/2371/237158160012/html/>.
7. Tejada, J. L., Lemos, L. B., Silva, E., & Da Costa Aguiar Alves, P. L. (2023). Planting season alters the interference of weeds in the common bean. *Australian Journal of Crop Science*, 17(12), 902–909. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.12.p3922>.
8. Курдюкова, О. М. (2015). *Ботаніко-біологічна характеристика бур'янових синузій агрофітоценозів Лівобережного Степу України та заходи їх контролю* [Автореф. дис. д-ра с.-г. наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України]. Інституційний репозиторій Національного університету біоресурсів і природокористування України. URL: <https://dglb.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/209bd90c-1237-48fc-bd1c-6c0ce3b9b815/content>.
9. Тарасов, В. В. (2012). *Флора Дніпропетровської і Запорізької областей*. (2-ге вид.). Дніпропетровськ: Ліра.
10. Яворівський, Р., & Заблоцька, С. (2024). Характеристика видового складу та раритетної фракції родини *Solanaceae* Berth. et Hook. f. у флорі Збараського (Тернопільського) району Тернопільської області. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи: матеріали XVI Міжнарод. наук.-практ. інтернет-конф.* (с. 6–8). Переяслав.
11. Lewis, Walter H., & Elvin-Lewis, P. F. (1977). *Medical Botany: Plants Affecting Man's Health*. pub. Wiley-Interscience John Wiley & Sons Inc.
12. Якубенко, Б. Є., Попович, С. Ю., Устименко, П. М., Дубина, Д. В., & Чурілов, А. М. (2020). *Геоботаніка: методичні аспекти досліджень*. Київ: Ліра.
13. Hennekens, S. M. (2009). *TURBOVEG for Windows*. (Version 2). Inst. voor Bos en Natuur, Wageningen.
14. 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*. Київ: Наукова думка.
15. Дідух, Я. П. (2012). *Основи біоіндикації*. Київ: Наукова думка.
16. Лихолат, Ю. В., Хромих, Н. О., Дідур, О. О., Оковитий, С. І., Матюха В. Л., Савосько, В. М., & Лихолат, Т. Ю. (2019). *Сучасний стан антропогенної трансформації екосистем степового Придніпров'я*. Кривий Ріг: ФОП Чернявський Д.О.

Стаття надійшла до редакції журналу 31.08.2025

ЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИЩИХ СУДИНИХ РОСЛИН НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «КАРМЕЛЮКОВЕ ПОДІЛЛЯ»

О.В. Мудрак¹, Ю.П. Антонюк², Г.В. Мудрак³, А.Л. Щерблюк², О.С. Дем'янюк²

¹ КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти» (м. Вінниця, Україна)
e-mail: ov_mudrak@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1776-6120

² Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: yuraantoniu22@gmail.com; ORCID: 0009-0006-3257-0843
e-mail: alina.shcherbliuk@gmail.com; ORCID: 0000-0003-1606-4554
e-mail: demolena@ukr.net; ORCID: 0000-0002-4134-9853

³ Вінницький національний аграрний університет (м. Вінниця, Україна)
e-mail: galina170971@ukr.net; ORCID: 0000-0003-1319-9189

У статті вперше здійснено аналіз таксономічної, флористичної, еколого-ценотичної та хорологічної структури флори вищих судинних рослин Національного природного парку (НПП) «Кармелюкове Поділля», який знаходиться на території Гайсинського р-ну Вінницької обл. в адміністративних межах Чечельницької селищної, Ольгопільської та Ободівської сільських територіальних громад. Територія парку поєднує унікальні фітоценози Східного Поділля, дослідження яких дають можливість визначити закономірності формування флори для планування заходів з охорони екосистем. Виявлено, що в складі флори наявні 668 видів вищих судинних рослин, з яких провідне місце належить родинам Складноцвітих (Asteraceae), Злакових (Poaceae), Бобових (Fabaceae), Розових (Rosaceae), Губоцвітих (Lamiaceae), Зонтичних (Apiaceae), Капустяних (Brassicaceae). Співвідношення провідних родин Asteraceae, Poaceae, Fabaceae становить 5,7:3,5:2,9. Визначено, що за класифікацією Раункієра на території парку переважають гемікриптофіти (351 вид). Значну частку мають терофіти (120 видів) і геофіти (78 видів). Найменша кількість видів представлена хамефітами (7 видів), видами зануреними у воду (3 види) і з плаваючими листками (3 види). За основною біоморфою преvalюють багаторічні полікарпічні трави (60%), одно- дворічні монокарпічні трави — 27,4%. Встановлено, що еколого-ценотична структура характеризується різноманіттям видів за основною лісові 18%, рудерали 13%, степові 4,5%, лучні 3%) та перехідною ценоморфою (лісо-лучні 7,6%, лісо-степові 4,5%, лучно-лісові 4,2%, рудерально-лісові 3,1% та лісові рудеральні 2,8%). Зазначено, що за хорологічним аспектом флора національного природного парку характеризується переважанням європейських, євразійських та євросибірських видів. Виявлено, що в флорі присутні рослини-ендемики малопольсько-подільського (*Carlina oporordifolia* Bess et Szaf. Kulcz. et Pawl.), паннонсько-понтичного (*Glechoma hirsuta* Waldst. & Kit., *Salvia nutans* L., *Stachystrans silvanica* L., *Lactuca chaixii* Vill.), причорноморського (*Lathyrus pannonicus* (Jacq.) Garcke, *Lotus ucrainicus* Klokov, *Asperula cynanchica* L.), східнокарпатсько-подільського (*Chamaecytisus podolicus* (Blocki) Klaskova) та широко причорноморського (*Linum hirsutum* L.) ареалів, що додатково підкреслює унікальність сформованої флори. Окреслено низку заходів, які необхідно здійснювати в межах НПП для збереження та охорони лісових, лучно-степових і водно-болотних екосистем.

Ключові слова: видове різноманіття, охорона видів, еколого-ценотична структура, хорологічний аналіз, екологічна мережа, Східне Поділля.

ВСТУП

Одним із стратегічних напрямів збереження біотичного різноманіття в Україні є менеджмент охоронних екосистем запо-

відних об'єктів, розбудова і оптимізація національної і смарагдової мереж України, основу яких становлять екосистеми заповідних територій.

Біорізноманіття є важливим компонентом довкілля і є незамінною складовою

екологічного балансу Східного Поділля (Вінницької обл.). У зв'язку з цим виникає потреба у вдосконаленні існуючих і введенні нових заходів для підтримки рівня біорізноманіття та зменшення впливу антропогенного навантаження на місцевому й регіональному рівнях.

Особливої уваги потребують природні й напівприродні екосистеми, що зазнають трансформації внаслідок сільськогосподарської діяльності, урбанізації та зміни клімату. Збереження біорізноманіття цих територій є основою стабільності екосистем і забезпечення екологічних послуг [1; 2].

Важливим напрямом роботи для охорони біорізноманіття на цих територіях стає впровадження екологічної мережі, моніторинг стану популяцій рідкісних видів і проведення відновлювальних заходів у деградованих біотопах.

Станом на 01.01.2025 р. Східне Поділля має 433 об'єкти природно-заповідного фонду загальною площею 66741,1437 га, що сягає 2,52% від площі регіону. Крім того, в регіоні налічується 11 об'єктів Смарагдової мережі, утворених відповідно до вимог про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ їх існування в Європі. Порівняно із загальноєвропейськими показниками, рівень заповідності перебуває на дуже низькому рівні. За показником заповідності регіон знаходиться на останньому місці серед усіх регіонів України [3].

Осередком збереження, відтворення і раціонального використання біотичного та ландшафтного різноманіття Східного Поділля (Вінницької обл.) є Національний природний парк (НПП) «Кармелюкове Поділля» створений відповідно до Указу Президента України від 16.12.2009 № 1057 «Про створення Національного природного парку «Кармелюкове Поділля».

Згідно з геоботанічним районуванням території України (2003), НПП «Кармелюкове Поділля» відноситься до Південно-подільського округу дубових лісів і лучних степів Української лісостепової підпровінції Східноєвропейської лісостепової провінції дубових лісів, остепнених

луку та лучних степів Лісостепової підобласті Євразійської степової області [4].

Згідно з фізико-географічним районуванням території України (2005) НПП «Кармелюкове Поділля» належить до Південно-Подільського Лісостепу Дністровсько-Дніпровського лісостепового краю лісостепової зони Східноєвропейської рівнинної ландшафтною країни [5].

Мета дослідження — оцінити рівень різноманіття та сучасного стану флори НПП «Кармелюкове Поділля» шляхом комплексного аналізу її таксономічної, флористичної, еколого-ценотичної та хронологічної структури.

Об'єкт дослідження — флора вищих судинних рослин (ВСР) НПП «Кармелюкове Поділля».

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідження структури флори в межах національних природних парків має ключове значення для оцінювання стану природних екосистем, моніторингу змін біорізноманіття та виявлення напрямів трансформації рослинного покриву за впливу антропогенних і кліматичних чинників. Такі дослідження дають змогу визначити екологічну цінність окремих територій, виділити осередки рідкісних і зникаючих видів, а також сформувати наукові основи для планування природоохоронних та відновлювальних заходів.

У межах НПП «Кармелюкове Поділля» проводилась низка досліджень, зокрема аналіз поточного стану флори здійснювали А.В. Гудзевич (1998, 2006), М.І. Гордієнко, А.О. Бондар, Г.Т. Криницький (2006), Я.П. Дідух, І.А. Коротченко, (2008), А.А. Куземко, О.Г. Яворська, Є.І. Ворона, М.М. Федорончук, Є.О. Воробійов, Л.В. Марківська, Н.П. Шпак (2015), Л.В. Марківська, О.Г. Яворська, А.А. Куземко (2019), Г.П. Леонтьяк, Г.Л. Дудник (2019), Г.І. Кравчук (2020), В.П. Шлапак, Н.П. Шпак, І.В. Козаченко, С.А. Адамченко, В.В. Мамчур (2022), Н.П. Шпак, О.П. Романчук, Л.В. Марківська, Г.Л. Дудник (2023), перспективи розширення тери-

торії парку розглядали Л.В. Марківська, О.Г. Яворська, Н.П. Шпак, А.А. Корнелюк, В.Є. Любченко (2020), О.В. Мудрак, Г.В. Мудрак, В.В. Серебряков, А.Л. Щерблюк, О.П. Романчук (2021) [6–15].

Дослідження флори НПП «Кармелюкове Поділля» є надзвичайно актуальним, оскільки територія поєднує унікальні фітоценози Східного Поділля, що потребують постійного наукового супроводу та охорони.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження видового складу і структури рослинності виконували у межах НПП «Кармелюкове Поділля», що знаходиться на території Гайсинського р-ну Вінницької обл. в адміністративних межах Чечельницької селищної, Ольгопільської і Ободівської сільських територіальних громад (ТГ).

Площа парку сягає 20203,4 га. У межах парку закладаються постійні пробні площі, які дають можливість проводити спос-

тереження за компонентами природних комплексів та станом популяцій окремих видів рослин, як типових, так і рідкісних. З урахуванням природоохоронного законодавства, територія парку поділена на функціональні зони: заповідну, зони регульованої і стаціонарної рекреації та господарську (рис. 1) [16].

У кожній із зон є визначені пробні площі, до прикладу, в Бритавському ПНДВ – у господарській (32/9), зоні регульованої рекреації (70/9) та заповідній зонах (105/1). Порівняльний аналіз даних із постійних пробних площ дає змогу виявити зміни фітоценозів, поширення та зникнення видів, відсоток покриття видів тощо [16].

Під час дослідження флори парку застосовувались загальнонаукові методи, комплексний, системний і порівняльний аналізи.

Ідентифікація видів проводилась у камеральних умовах за зібраними гербарними зразками, назви рослин наведені відповідно до International plant name index [17], таксономічну структуру виділено за

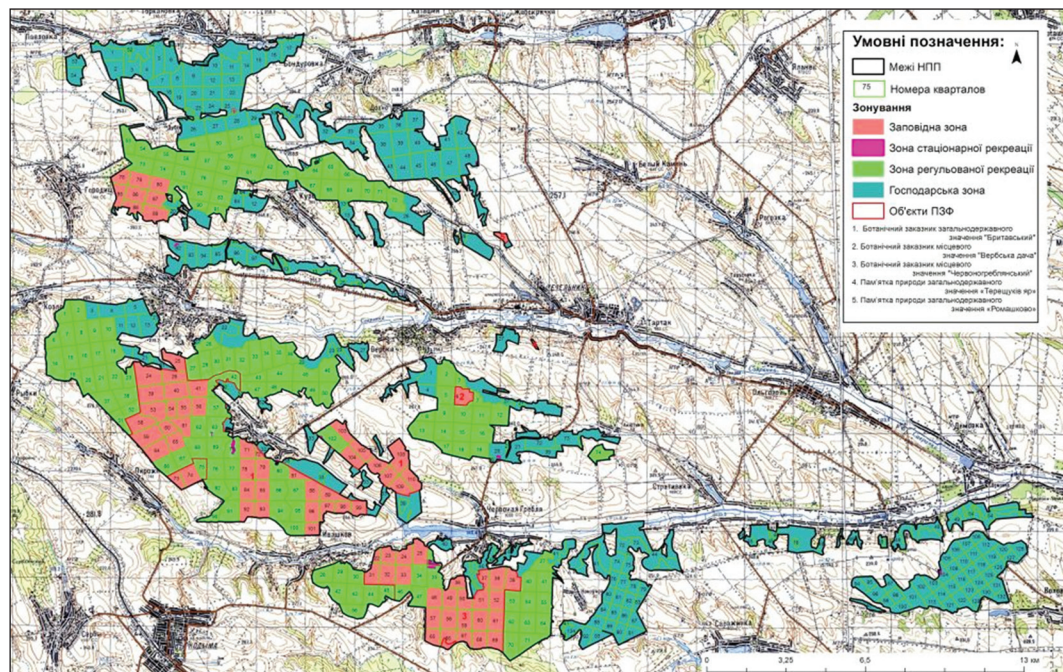


Рис. 1. Функціональне зонування НПП «Кармелюкове Поділля»

системою S.L. Mosyakin, M.M. Fedoronchuk [18]. Життєві форми описано за основною біоморфою (за І.Г. Серебряковим), кліматоформою (за К. Раункієром), окреслено еколого-ценотичну структуру і хорологічний аспект флори за даними літературних джерел [19]. Созологічний статус рідкісних видів визначено за даними списків МСОП, ЄЧС, CITES, Бернської конвенції, Червоної книги України, Зеленої книги України, Списку регіонально-рідкісних видів Вінницької обл. [1; 2; 20–23].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Кількість видів, родів і родин є важливим кількісним показником досліджуваної флори. До складу флори НПП «Кармелюкове Поділля» входить 668 видів вищих судинних рослин (ВСР) [16; 24], які у таксономічному відношенні належать до 4 відділів (*Equisetophyta*, *Polypodiophyta*, *Pinophyta* і *Magnoliophyta*), 5 класів (*Equisetopsida*, *Polypodiopsida*, *Pinopsida*, *Liliopsida*, *Magnoliopsida*), 63 порядків, 94 родин, 348 родів. Відділ *Equisetophyta* представлений 4 видами (0,6%), *Polypodiophyta* — 3 видами (0,45%), *Pinophyta* — 2 видами (0,3%), відповідно основне видове різноманіття належить відділу *Magnoliophyta* (98,65%).

Провідне місце серед видів ВСР займають декілька родин, які об'єднують найбільшу кількість видів і визначають типову структурну організацію флори лісостепової зони, зокрема це родини Складноцвітих (*Asteraceae*), Злакових (*Poaceae*), Бобових (*Fabaceae*), Розових (*Rosaceae*), Губоцвітих (*Lamiaceae*), Зонтичних (*Apiacea*), Капустяних (*Brassicaceae*).

До найбагатших видів родин належать також і Ранникові (*Scrophulariaceae*), Шорстколисті (*Boraginaceae*), Осокові (*Cyperaceae*), Гвоздичні (*Caryophyllaceae*), Жовтецеві (*Ranunculaceae*), Маренові (*Rubiaceae*), Гречкові (*Polygonaceae*), Лілійні (*Liliaceae*). Високий показник видового різноманіття цих родин узгоджується з типовими тенденціями для флор Центральної і Східної Європи, де вони формують основу

лучних, узлісних і рудеральних угруповань. Кількісний склад провідних родин за кількістю родів і видів у відсотковому співвідношенні наведено в *табл. 1*.

Разом ці 15 провідних родин охоплюють близько 66% усієї флори парку, що свідчить про наявність чітко вираженого ядра флористичної структури. Співвідношення провідних родин *Asteraceae*, *Poaceae*, *Fabaceae* становить 5,7:3,5:2,9. Домінування родини *Asteraceae* (13,8%) є типовим для флор лісостепової зони. Висока частка *Poaceae* (8,5%) і *Fabaceae* (7,0%) відображає значну роль лучних і степових формацій у структурі флори. *Lamiaceae* (5,8%), *Rosaceae* (4,8%) і *Apiaceae* (4,2%) формують важливу частину лісових ценозів, часто представлених медоносними і лікарськими видами. *Brassicaceae*, *Caryophyllaceae*, *Ranunculaceae* і *Scrophulariaceae* утворюють основу флори відкритих біотопів, особливо узлісь, схилів і узбіч.

Менш чисельні, але екологічно вагомі родини — *Cyperaceae*, *Boraginaceae*, *Rubiaceae*, *Polygonaceae*, *Liliaceae* — підкрес-

Таблиця 1. Кількісний склад провідних родин флори НПП «Кармелюкове Поділля»

Родина	Види	%
<i>Asteraceae</i>	92	13,8
<i>Poaceae</i>	57	8,5
<i>Fabaceae</i>	47	7,0
<i>Lamiaceae</i>	39	5,8
<i>Rosaceae</i>	32	4,8
<i>Apiacea</i>	28	4,2
<i>Brassicaceae</i>	22	3,3
<i>Caryophyllaceae</i>	22	3,3
<i>Ranunculaceae</i>	20	3,0
<i>Scrophulariaceae</i>	20	3,0
<i>Cyperaceae</i>	18	2,7
<i>Boraginaceae</i>	14	2,1
<i>Rubiaceae</i>	10	1,5
<i>Polygonaceae</i>	10	1,5
<i>Liliaceae</i>	8	1,2
Разом	439	65,7

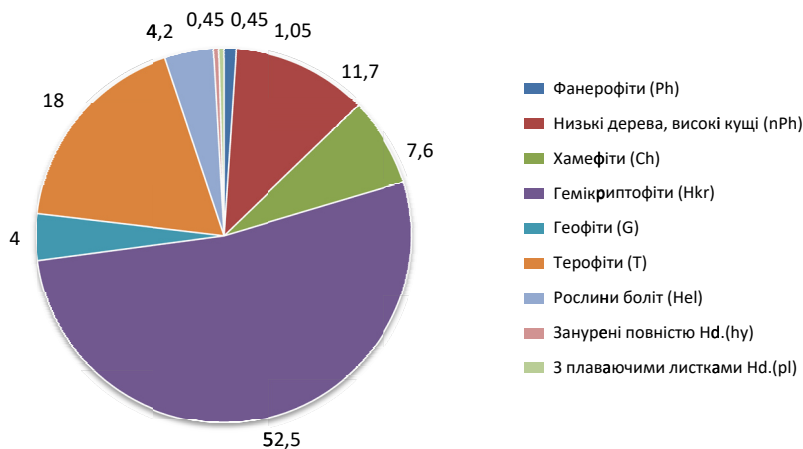


Рис. 2. Розподіл видів за класифікацією К. Раункієра

люють різноманітність вологих, тіньових і напіввідкритих мікробіотопів. Решта родин (*Aposynaceae*, *Solanaceae*, *Geraniaceae*, *Caprifoliaceae*, *Salicaceae*, *Urticaceae*, *Fumariaceae*, *Asparagaceae*, *Convallariaceae* тощо) мають нижчий рівень флористичного запасу, що становить майже 33% від загальної кількості видів. Розподіл видів за кліматоморфою (класифікацією К. Раункієра) подано на діаграмі (рис. 2).

Згідно з отриманими даними, на території парку переважають гемікриптофіти (351 вид). Значну частку — терофіти (120 видів) і геофіти (78 видів). Фанерофіти та низькі дерева, високі кущі — 11,6% від усієї кількості видів (51 вид і 27 видів відповідно). Рослини боліт — 4,2% (28 видів). Найменша кількість видів представлена хамефітами (7 видів), видами зануреними у воду (3 види) і з плаваючими листками (3 види). Виділено один вид ліан — *Hedera helix* L.

За основною біоморфою (класифікацією І.Г. Серебрякова), частка багаторічних полікарпічних трав (410 видів, або 60%), переважає над одно-дворічними монокарпічними травами (183 види, або 27,4%). Деревя, кущі і напівкущі сягають 12,4% (46 видів, 32 види і 5 видів відповідно).

Екологічна структура флори НПП «Кармелюкове Поділля» відображає різ-

номанітність природних умов території. Результат проведеного аналізу флори за відношенням рослин до світла (геліоморфи), вологи (гігроморфи), температури (термоморфи), живлення (трофоморфи) представлені у табл. 2.

Щодо світла, у флорі превалюють сціогеліофіти (323 види) — рослини, що витримують широкий діапазон освітленості, з перевагою помірного або розсіяного світла. Висока їх частка свідчить про значну роль напівзатінених біотопів — узлісь, лісових галявин, заплав. Другою за чисельністю групою є геліофіти (243 види), що характерно для відкритих просторів. Наявність геліосціофітів (84 види) і сціофітів (18 видів) підкреслює наявність тіньових мікроекотопів, зокрема лісових ділянок із щільним покривом. Склад флори вказує на мозаїчний характер ландшафтів парку.

Щодо води, то провідне місце становлять мезофіти (207 видів) і ксеромезофіти (179 видів), що пояснює про помірно зволожені умови з періодичними посушливими періодами. Високий відсоток мезоксерофітів (149 видів) пояснює про поширення угруповань сухих луків, узлісь і степових схилів.

Менш чисельні, але екологічно важливі групи — гігрофіти (18 видів) і гігромезофіти (40 видів), які відображають локальні

Таблиця 2. Екологічна структура флори НПП «Кармелюкове Поділля»

Екоморфа	Кількість видів	% від загальної кількості
<i>Геліоморфа</i>		
Геліофіт	243	36,4
Геліосціофіт	84	12,6
Сціогеліофіт	323	48,3
Сціофіт	18	2,7
<i>Трофоморфа</i>		
Оліготроф	39	5,8
Олігомезотроф	68	10,2
Олігоевтроф	28	4,2
Евтроф	137	21,0
Мезотроф	376	56,3
Галофіт	2	0,3
Галофітомезотроф	2	0,3
Галофітоевтроф	5	0,8
Напівпаразити	7	1,1
Паразити	3	0,4
Сапротрофи	1	0,1
<i>Гігоморфа</i>		
Ксерофіт	35	5,3
Ксеромезофіт	179	27,0
Мезоксерофіт	149	22,3
Мезофіт	207	31,0
Мезогірофіт	32	4,8
Гігомезофіт	40	6,0
Гірофіт	18	2,7
Плейстофіт	5	0,75
Плейстогірофіт	1	0,15
Гідатофіт	2	0,3
<i>Термоморфа</i>		
Мегатерм	356	53,3
Мезотерм	277	41,5
Мікротерм	10	1,5
Еврітерм	25	3,7

вологі біотопи: заплави, джерела, прибережні смуги водойм. Наявність гідатофітів (2 види) і плейстофітів (5 видів) фіксує про стабільну водну компоненту флори.

Домінування мезофітів і перехідних форм підтверджує помірний клімат території.

За термоморфою флора парку мають перевагу мегатермна (356 видів) і мезотермна (277 видів), що також є свідченням помірно континентального клімату. Незначна частка мікротермів (10 видів) демонструє присутність холодостійких видів у затінених або підвищених місцях, а еврітерми (25 видів) підтверджують адаптивність флори до широкого температурного діапазону.

За трофістю у структурі флори НПП «Кармелюкове Поділля» превалюють мезотрофи (376 видів) — рослини помірно родючих ґрунтів, що є типовими для більшості лучно-лісових біотопів і біотопів узлісь. Значну частку становлять мегатрофи (евтрофи) (137 видів), що свідчить про наявність ділянок із підвищеним вмістом поживних речовин.

Меншою, але помітною групою є олігомезотрофи (68) і оліготрофи (39), що приурочені до бідніших, піщаних або кам'янистих ґрунтів. Додатково виділяються рослини з особливими трофічними стратегіями, а саме рослини-паразити (3) і напівпаразити (7). Окремо в трофічній структурі постають рослини засолених ґрунтів та їх перехідні форми (разом 9 видів). Сапротрофи представлені одним видом — *Neottianidus-avis* (L.) Rich., такий вид трофоморфи є рідкісним для ВСР парку.

Залежно від адаптації до біогеоценозу, в межах парку виділено такі види ценоморф:

- *основні*: лісові (122 види), рудерали (88), степові (30), лучні (20), культивовані (12), болотні (10), акванти (6 видів), що сягає 43,1% від загальної кількості видів;
- *перехідні типи* ценоморф: лісо-лучні (51 вид) і лучно-лісові (28), лісо-степові (30), рудерально-лісові (21) та лісові рудеральні (19), лучно-степові (17), лучно-болотні (17), степові рудерали (15) та рудерально-степові (14), степово-лучні (15), лучні рудерали (14) і рудерально-лучні (13), лісово-болотні (12), рудеральні лісово-лучні (10), степо-лісові

(9), скельно-степові (7), піщано-лісові (6), лісові культурні (5 видів), що становить 45,3% від загальної кількості видів;

- *інші типи перехідних ценоморф* сягають 11,6% від загальної кількості видів і є властивими для незначної кількості видів (1–3 види для 1 перехідної ценоморфи), що також є відображенням адаптації видів до зміни умов середовища.

Провідну роль відіграють лісові й лучні види, що показує домінування лісових і лучних угруповань. Значна кількість рудералів пояснює про вплив антропогенних чинників і вторинну флористичну динаміку. Високий відсоток лісо-лучних і лучно-лісових видів підтверджує перехідний характер флори між лісовими і лучними екотопами.

Степові та лучно-степові елементи відображають участь ксерофітних видів, характерних для сухих схилів і відкритих ділянок. Тому, флора парку має мозаїчну структуру з домінуванням мезофільних лісо-лучних комплексів і включенням степових та рудеральних компонентів.

Невід'ємною частиною аналізу структури досліджуваної флори є розподіл видів за типами ареалів. Розподіл видів за основ-

ними типами ареалів наведено на діаграмі (рис. 3).

Хорологічний аналіз флори вказує на переважання євразійських елементів (217 видів). Значну частку становлять європейські види (83 види) та євросибірські елементи (49 видів), які у сукупності формують понад 20% флори. Їх присутність свідчить про тісні флористичні зв'язки з Центральною і Східною Європою, а також із північними широтами континенту. Важливо, що європейські види переважно приурочені до лісових і узлісних біотопів, тоді як євросибірські — до лучно-степових екотопів.

Помітною є також участь європейсько-середземноморських (59 видів) і європейсько-малоазійських (18 видів) флоро-елементів, які вказують на проникнення теплолюбних компонентів у флору парку і зв'язок її з південними флористичними провінціями. Це відображає історичну міграцію видів із Середземноморського басейну. Євразійсько-північноафриканські (25 видів) та євразійсько-середземноморські (13 видів) елементи підсилюють південний компонент флори, демонструючи адаптацію до посушливих умов і відкритих біотопів.

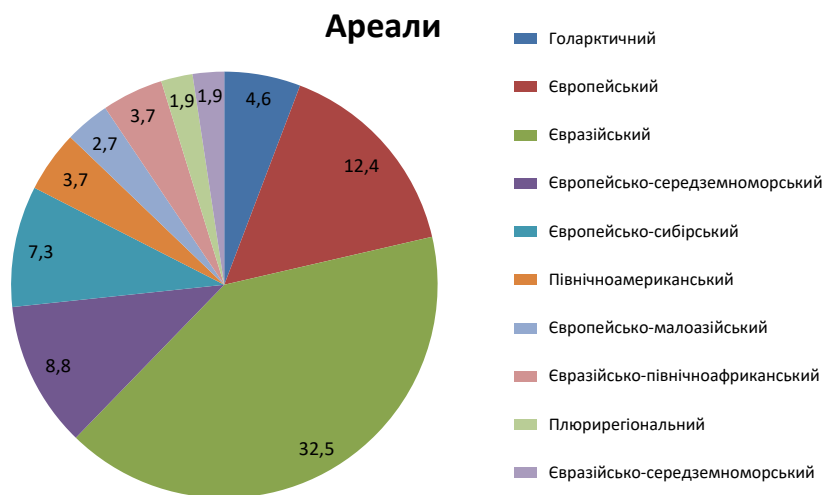


Рис. 3. Розподіл видів за типами ареалів

Наявність північноамериканських видів (25) і плурирегіональних (13) свідчить про наявність адвентивного шару флори, що сформувався під впливом антропогенних чинників.

Менший флористичний запас мають види євразійсько-північноамериканського (12 видів), циркумполярного (10), європейсько-кавказького (10), понтичного (9), європейсько-передньоазійського (8), європейсько-середземноморсько-сибірського (7) ареалів та рослин-космополітів (7 видів).

Особливо варто відмітити рослини-ендемики малопольсько-подільського (*Carlina onopordifolia* Bess et Szaf. Kulcz. et Pawl.), паннонсько-понтичного (*Glechoma hirsuta* Waldst. & Kit., *Salvia nutans* L., *Stachystrans silvanica* L., *Lactucac haixii* Vill.), причорноморського (*Lathyrus pannonicus* (Jacq.) Garcke, *Lotus rainicus* Klokov, *Asperula cynanchica* L.), східнокарпатсько-подільського (*Chamaecytisus podolicus* (Blocki) Klaskova) та широко причорноморського (*Linum hirsutum* L.) ареалів, що додатково підкреслює унікальність сформованої флори.

На основі опрацьованих даних про флору було наведено характеристику видів, які мають созологічний статус. Конспект рідкісних (раритетних) видів флори НПП «Кармелокове Поділля» налічує 73 види, що занесені до:

- ЧС МСОП (Червоного списку Міжнародного союзу охорони природи, 2018) — 2 види;
- ЄЧС (Європейського Червоного списку, 1991) — 3 види;
- Конвенції про охорону дикої флори і фауни та природних середовищ їх існування в Європі (Берн, 1979, Додаток I) — 2 види;
- Конвенції про охорону дикої флори і фауни та природних середовищ їх існування в Європі (Берн, 1979, Додаток II) — 9 видів;
- Конвенції про міжнародну торгівлю видами дикої флори і фауни, що перебувають під загрозою зникнення (CITES, Вашингтон, 1973) — 9 видів;

- ЧКУ (Червоної книги України, рослинний світ, 2009) — 29 видів;
- регіонально-рідкісних видів, що знаходяться під охороною на території НПП «Кармелокове Поділля» — 42 види [16; 20; 22–24].

До видів державної охорони, що занесені до ЧКУ (2009), віднесено види з статусом «Вразливі» — 10 видів, «Рідкісні» — 5 видів, «Неоцінені (Невизначені)» — 14 видів, що становить 14,5%, 7,2 і 20,1% відповідно від загальної кількості раритетних видів [22].

До Зеленої книги України (2009) занесено 8 рідкісних рослинних угруповань, виявлених на території парку [21]. Природні рослинні угруповання, віднесені до Зеленої книги України, подані в табл. 3.

Вся територія парку увійшла до переліку Смарагдових об'єктів України.

З метою збереження, відновлення і раціонального використання екосистем НПП

Таблиця 3. Природні рослинні угруповання, занесені до ЗКУ (2009)

Степовий тип рослинності
Формация ковили волосистої (<i>Stipeta capillatae</i>)
Формация ковили найкрасивішої (<i>Stipeta pulcherrimae</i>)
Лісовий тип рослинності
Формация звичайнодубових лісів плющових (<i>Querceta roboris hederosa helix</i>)
Формация звичайнодубових лісів ведмежоцибулевих (<i>Querceta roboris alliosa ursini</i>)
Формация звичайнодубових лісів деревених (<i>Querceta (roboris) cornosa (maris)</i>)
Формация звичайнодубових лісів свидинових (<i>Querceta (roboris) swidosa (sanguineae)</i>) (<i>Carex brevicollis</i>)
Формация скельно- та звичайнодубових лісів (<i>Querceta (petraeae)</i> — <i>Querceta (roboris)</i>)
Формация скельнодубових лісів свидинових (<i>Querceta (petraeae) cornosa (maris)</i>)

«Кармелюкове Поділля» запропоновано здійснювати такий комплекс заходів:

1. *Для лучно-степових екосистем:*
 - 1.1. Заборона на розорювання і заліснення ділянок із природною степовою рослинністю;
 - 1.2. Введення режиму регульованої заповідності;
 - 1.3. Регульоване здійснення випасання і сінокошення;
 - 1.4. Контроль за поширенням інвазійних видів;
 - 1.5. Розробка нових методів збереження і відтворення цінного генофонду.
2. *Для лісових екосистем:*
 - 2.1. Введення еколого-безпечних методів боротьби з лісовими пожежами, захисту рослин і тварин від хвороб та шкідників;
 - 2.2. Врахування екологічних обмежень під час заготівлі деревини, проведення вибіркового рубок замість суцільних;
 - 2.3. Створення охоронних лісосулуг;
 - 2.4. Контроль за рекреаційним навантаженням;
 - 2.5. Проведення заходів лісовідновлення з використанням місцевих видів.
3. *Для водно-болотних екосистем:*
 - 3.1. Збереження природного гідрологічного режиму;
 - 3.2. Контроль за рибальством та полюванням;
 - 3.3. Відновлення деградованих боліт;
 - 3.4. Побудова еколого-туристичних маршрутів із мінімальним рекреаційним навантаженням;
 - 3.5. Використання водно-болотних екосистем з урахуванням їхнього природоохоронного значення та здатності накопичувати вуглець.
4. *Спільні заходи для всіх типів екосистем:*
 - 4.1. Залучення місцевих громад до охорони природи, активна еколого-просвітницька робота;
 - 4.2. Проведення наукових досліджень у напрямі адаптивного менеджменту;
 - 4.3. Інвентаризація видів і картування цінних ділянок (оселищ), особливо для місцезростань раритетних видів;

4.4. Інтеграція природоохоронних заходів у стратегії і плани просторового розвитку територіальних громад;

4.5. Обмеження господарської діяльності.

ВИСНОВКИ

За результатами дослідження, вперше здійснено комплексний аналіз флористичної структури вищих судинних рослин національного природного парку «Кармелюкове Поділля». Флора парку відзначається високим рівнем екологічної різноманітності, що зумовлено поєднанням лісових, лучних і степових біотопів. Склад флори характеризується типовим для лісостепу співвідношенням провідних родин — переважанням складноцвітих, злакових і бобових, що забезпечують структурну стабільність фітоценозів і виконують важливу екологічну роль у формуванні біорізноманіття території. Водночас висока представленість родин різних екологічних груп свідчить про екотонний характер флори, в якій поєднуються елементи лісової, лучної, степової та синантропної рослинності.

Уточнено співвідношення основних життєвих форм і екологічних груп у флорі парку, що дало можливість визначити домінуючі адаптаційні стратегії рослин у межах різних біотопів. Переважання мезофітів, мезотермів і мезотрофів вказує на загалом помірно зволожені, родючі умови середовища, характерні для території парку.

Встановлено просторові відмінності у флористичному складі між природними та трансформованими ділянками, що дало змогу оцінити ступінь стабільності і потенціал до самовідновлення рослинного покриву. Значна частка рудеральних і перехідних елементів свідчить про вплив антропогенних чинників, зокрема господарського використання прилеглих земель. Водночас наявність степових і водних видів підкреслює природну мозаїчність ландшафтів і потенціал для збереження різних типів екосистем.

Відповідно до проведеного хорологічного аналізу, флора має переважно гол-

арктичний тип із домінуванням євразійських і європейських флороелементів, що повністю відповідає її географічному положенню в межах Правобережного Лісостепу. Присутність середземноморських і північно-американських елементів вказує на високий ступінь флористичних зв'язків і динамічність формування флори під впливом як природних, так і антропогенних процесів. Такий склад зазначає про перехідний характер флори парку, де поєднуються центральноєвропейські, середземноморські і євразійські риси, що робить її цінним осередком біорізноманіття Подільського регіону.

Вперше проаналізовано соціологічну структуру флори парку: визначено, що ра-

ритети рослинного світу мають види вищих судинних рослин, занесені до ЧС МСОП, ЄЧС, Конвенції про охорону дикої флори і фауни та природних середовищ їх існування в Європі (Бернської конвенції), ЧКУ та ЗКУ, списку регіонально-рідкісних видів.

Загалом, екологічна структура флори НПП «Кармелюкове Поділля» демонструє високий рівень екотопічного різноманіття, що є ознакою стабільної та зрілої природної системи. Співіснування видів різних екологічних груп забезпечує стійкість рослинного покриву до зовнішніх впливів і формує екологічну рівновагу між природними та вторинними угрупованнями.

ЛІТЕРАТУРА

- Мудрак, О. В. (2012). *Збалансований розвиток екомережі Поділля: стан, проблеми, перспективи: моногр.* Вінниця: СПД Главацька Р.В.
- Мудрак, О. В., & Мудрак, Г. В. (2013). *Особливості збереження біорізноманіття Поділля: теорія і практика: моногр.* Вінниця: ТОВ «Нілан—ЛТД».
- Екологічний паспорт Вінницької області за 2024 рік. Вінниця: Вінницька ОВА. URL: <https://surfl.i/oahvgw>.
- Дідух, Я. П., & Шеляг-Сосонко, Ю. Р. (2003). Геоботанічне районування України та суміжних територій. *Український ботанічний журнал*, 60, 1, 6–17.
- Маринич, О. М., & Шищенко, П. Г. (2005). *Фізична географія України: підруч.* Київ: Знання.
- Гудзевич, А. (1998). *Науково-пошукові роботи по забезпеченню підготовки матеріалів щодо створення Чечельницького національного природного парку (звіт з наукової роботи № д/р 4/17).* Вінниця.
- Гудзевич, А. (2006). Ландшафтна і біотична різноманітність проектованого Подільського національного природного. *Екологічний вісник*, 5 (39), 2–4.
- Марківська, Л. В., Яворська, О. Г., & Куземко, А. А. (2019). Класифікація лісової рослинності національного природного парку «Кармелюкове Поділля» (Вінницька область, Україна). *Чорноморський ботанічний журнал*, 15(2), 134–155. DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2019-15-2-4>.
- Леонтьяк, Г. П., & Дудник, Г. Л. (2019). Роль НПП «Кармелюкове Поділля» у збереженні лісової екосистеми. *Науковий вісник НЛТУ України*, 29(10), 93–96.
- Марківська, Л. В., Яворська, О. Г., Шпак, Н. П., Корнелюк, А. А., & Любченко, В. Є. (2020). Перспективна ділянка для розширення території НПП «Кармелюкове Поділля». *Моніторинг і охорона біорізноманіття в Україні. Сер.: Conservation Biology in Ukraine*, 16(3), 392–401.
- Шлапак, В. П., Шпак, Н. П., Козаченко, І. В., Адаменко, С. А., & Мамчур, В. В. (2022). Біологічний моніторинг стану лісових масивів в умовах Південно-Подільського Лісостепу України. *Науковий вісник НЛТУ України*, 32(1), 7–12.
- Шпак, Н. П., Романчук, О. П., Марківська, Л. В., & Дудник, Г. Л. (2023). Характеристика корінних дубових деревостанів у Національному природному парку «Кармелюкове Поділля». *Екологічні науки*, 1(46), 200–206. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.33>.
- Кравчук, Г. І. (2020). Екологічна оцінка стану лісових екосистем Національного природного парку «Кармелюкове Поділля». *The 9th International scientific and practical conference «Dynamics of the development of world science»* (pp. 563–573). Perfect Publishing, Vancouver, Canada.
- Дідух, Я. П., & Коротченко, І. А. (2008). Збереження степів на території національного природного парку «Кармелюкове Поділля» (Вінницька область). *Пріоритети збалансованого (сталого) розвитку України. Матеріали II Українського екологічного конгресу* (с. 271–276). Київ: Центр екологічної освіти та інформації.
- Мудрак, О. В., Мудрак, Г. В., Серебряков, В. В., Шерблюк, А. Л., & Романчук, О. П. (2021). Обґрунтування розширення території національного природного парку «Кармелюкове Поділля». *Агроекологічний журнал*, 1, 14–30. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2021.227234>.
- Літопис природи національного природного парку «Кармелюкове Поділля». (2024). Т. XII. Чечельник.
- International plant name index (IPNI). URL: <https://www.ipni.org>.
- Mosyakin, S. L. (Ed.), & Fedoronchuk, M. M.

- (1999). *Vascular plants of Ukraine. A nomenclatural checklist*. Kyiv: MG Kholodny Institute of Botany.
19. Дідух, Я. П. (Ред.), Плюта, П. Г., Протопопова, В. В., Єрмоленко, В. М., Коротченко, І. А., Каркущів, Г. М., & Бурда, Р. І. (2000). *Екофлора України*. Київ: Фітосоціоцентр.
20. IUCN: RedList. URL: <https://www.iucnredlist.org>.
21. Дідух, Я. П. (Ред.). (2009). *Зелена книга України*. Київ: Альтерпрес.
22. Дідух, Я. П. (Ред.). *Червона книга України. Рослинний світ* (2009). Київ: Глобалконсалтинг.
23. Конвенція про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_032#Text.
24. Національний природний парк «Кармелюкове Поділля». URL: <http://karmelukove.com>.

Стаття надійшла до редакції журналу 27.10.2025

ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ЗМІН КЛІМАТУ НА ЛІСОВІ ЕКОСИСТЕМИ

О.Ю. Чорнобров

Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: oleksandr.chornobrov@ukr.net; ORCID: 0000-0001-8251-1573

Кліматичні спостереження доводять існування тенденції підвищення глобальної температури повітря на земній кулі, що спричинено викидами парникових газів в атмосферу. У статті проаналізовано основні екологічні впливи змін клімату на лісові екосистеми помірного кліматичного поясу, зосереджуючись на помірному континентальному біокліматичному регіоні Європи. Дослідження виконано шляхом аналізу та синтезу літературних джерел та Інтернет-ресурсів. Основними прямими впливами змін клімату на ліси є підвищення концентрації CO₂, зміни температури, кількості та режиму опадів. Непрямі впливи є результатом взаємодії між змінами кліматичних показників, абіотичними та біотичними чинниками. Прогнозоване збільшення концентрації CO₂ може стимулювати підвищення росту та продуктивності лісових насаджень. Наслідки підвищення температури в Європі відрізнятимуться залежно від біокліматичного регіону, що характеризуються відповідними лімітуючими чинниками росту і розвитку лісів. Збільшення температури спричинить зміни в ареалах видів рослин, породному складі лісів та конкуренції між деревними видами. У лісах зони помірного біокліматичного регіону потенційна нестача літніх опадів із подальшими посухами може обмежувати підвищення продуктивності лісів. В окремих регіонах екстремальні погодні умови (зокрема, тривалі посухи) будуть посилюватися та матимуть негативні наслідки на лісові екосистеми. В Україні внаслідок змін клімату відбуватиметься значне звуження зони оптимального росту за вологістю клімату для двох основних лісотвірних порід — сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) та дуба звичайного (*Quercus robur* L.). Зміни клімату можуть збільшити частоту та інтенсивність стихійних природних явищ, спричинених абіотичними чинниками (буреломи, вітровали і сніголами, пожежі в екосистемах), а також посилити вразливість лісів до них. Загалом вважається, що зміна клімату може підвищити інтенсивність спалахів шкідників та сприяти успішній колонізації грибкових патогенів. Значна частина цих наслідків призведе до збільшення шкоди лісам, однак потрібно враховувати взаємодію між абіотичними чинниками. Зміна клімату є однією з найбільших поточних і майбутніх загроз біорізноманіттю лісів, оскільки вона безпосередньо впливає як на види, так і на їхні середовища існування. Вивчення екологічних впливів змін клімату є необхідним для розроблення стратегій адаптації до них та пом'якшення їхніх негативних наслідків.

Ключові слова: лісові насадження, деревні види, ареал, абіотичні та біотичні чинники, вразливість, стійкість, біорізноманіття.

ВСТУП

Вплив людської діяльності на клімат Землі посилюється і дедалі стає більш очевидним [1; 2]. Кліматичні спостереження доводять існування тенденції глобального потепління: глобальна середня температура зросла на 0,8°C з 1900 р. [1; 3; 4]. Разом з потеплінням відбувається зменшення снігового та льодового покриву, підвищується рівень моря. З 1900 по 2005 рр. спостерігалося значне збільшення кількості опадів у східній частині Північної та Південної

Америки, Північної Європи та Північної та Центральної Азії [4]. Водночас, у південній частині Африки та частково Азії кількість опадів зменшується. Посухи стали тривалішими та сильнішими в усьому світі та вразили більші території з 1970-х років, особливо в тропіках і субтропіках [4]. Нові прогнози сценарії зміни клімату для Європи припускають, що до 2100 р. температура підвищиться приблизно від 2°C у Північно-Західній Європі до 3°C у Центральній Європі та 4–5°C у північній частині бореальної зони та Середземномор'ї [1].

Як відомо, основною причиною глобальної зміни клімату є парниковий ефект. Глобальне підвищення температури спричинено людською діяльністю, а саме викидами парникових газів, передусім діоксиду вуглецю та метану [5]. Докази з багатьох джерел свідчать про те, що зміна клімату стає дедалі серйознішою, і, зважаючи на поточні тенденції, можна очікувати, що ця тенденція до підвищення посилиться в майбутньому [2; 5]. Нині спостереженнями вже підтверджено різні зміни кліматичних умов у Європі. Збільшення середньої температури призвело до екстремальних погодних умов, безпрецедентних посух, повеней і вітровалів (буреломів), і прогнозується, що розвиток зазначених явищ і процесів посилиться [6; 7].

Нині розроблено низку моделей щодо майбутніх кліматичних змін. Важливим питанням під час розгляду заходів щодо адаптації та пом'якшення наслідків зміни клімату є невизначеність у прогнозах майбутнього клімату. Як зазначають науковці, на додаток до нинішніх невизначеностей, які виникають під час розроблення моделей, існують чинники, пов'язані з майбутніми викидами в атмосферу. Тому, діапазон прогнозу відображає невизначеність щодо майбутніх викидів, а також щодо власне кліматичних моделей [1]. Для демонстрації потенційних змін клімату було розроблено різні кліматичні сценарії. Найпоширенішими серед них є сценарії на основі Спеціального звіту про сценарії викидів (SRES) [8] та репрезентативних траєкторій концентрацій (RCP, Representative Concentration Pathways) [9].

Згідно з даними оцінювання без ефективної глобальної політики пом'якшення наслідків змін клімату, збільшення температури становитиме від 1,8°C до 4°C до 2100 р. порівняно з 1990 р. [1]. Це набагато вище, ніж підвищення температури з доіндустріальних часів. Ці зміни відрізняються залежно від регіону та сценарію викидів. Наприклад, за сценарієм A1B, прогнозоване середньорічне потепління з 1980/1999 до 2080/2099 становить від 2,3°C до 5,3°C у Північній Європі та від 2,2°C до 5,1°C

у Південній Європі та Середземномор'ї. Всі моделі прогнозують, що найбільше підвищення температури буде у Східній Європі взимку та у Західній та Південній Європі влітку [1].

Майбутні зміни клімату також проявлятимуться у зміні режиму та кількості опадів, значно відрізнятимуться за своїм просторовим і часовим розподілом. Загалом у Європі прогнозують збільшення кількості опадів на півночі та зменшення їх на півдні [1]. З даними моделювання річна зміна середньої площі з опадами від 1980–1999 рр. до 2080–2099 рр. змінюється від 0 до 16% у Північній Європі і від –4 до –27% у Південній Європі та Середземномор'ї [10]. Найбільше зростання в Північній і Центральній Європі прогнозується взимку.

Станом на 2020 р. ліси займають 4,1 млрд га, що становить 31% загальної площі суходолу [11]. Вони виконують важливі екологічні, економічні та соціальні функції. Зокрема, лісові екосистеми відіграють важливу роль у кругообігу речовин та енергії, виконуючи важливу функцію у депонуванні вуглецю шляхом поглинання його з атмосфери у процесі фотосинтезу, зберігання в біомасі та ґрунті. Паризькою угодою (2015) підтверджено важливу роль лісів планети у запобіганні змінам клімату [12].

Мета роботи — оцінити основні екологічні впливи змін клімату на лісові екосистеми помірного континентального біокліматичного регіону Європи.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідженням впливу змін клімату на лісові екосистеми займалося низка вчених. С. Loehle у роботі [13] проаналізовано низку досліджень, заснованих на імітаційних моделях, що передбачають значні зміни породного складу, відмирання дерев або зменшення лісового покриву у відповідь на підвищення температури змін клімату. Науковці R. Ceulemans, S. Kellomäki, R.J. Norby, M.U.F. Kirschbaum зі співавт. вивчали вплив підвищення концентрації

CO₂ в атмосфері на інтенсивність фотосинтезу у деревних рослинах [14–17], Н. Sahe, S. Palmroth зі співавт. — на ріст і продуктивність лісових насаджень [18–20]. Вченими W. Thuiller, M.K. Dyderski зі співавт. змодельовано потенційні довгострокові зміни в ареалах деревних порід в умовах змін клімату [21; 22], а X. Morin та G. Van Houtven зі співавт. аналізували ймовірні зміни у породному складі деревостанів [23; 24]. Комплексне оцінювання основних впливів змін клімату на ліси Європи викладено у наукових працях [1; 7]. Огляд підходів до оцінювання впливу змін клімату на стихійні природні явища в європейських лісах подано у роботі [25], зокрема щодо реакції лісових комах на такі зміни [26; 27]. Також вивчалось питання впливу змін клімату на біорізноманіття лісових екосистем D.G. Hole [28].

В Україні дослідження впливу зміни клімату на лісові екосистеми розпочалися у 90-х роках ХХ ст. та проводилися українськими науковцями в рамках низки проєктів міжнародної співпраці з Європейським Інститутом Лісу й науковцями різних країн Європи, лісовими та кліматичними експертами зі США, Продовольчої та сільськогосподарської організації Об'єднаних Націй, Європейського, Світового банку та Всесвітнього фонду охорони природи. Серед українських науковців слід відмітити праці І.Ф. Букши та ін. [29–32], які стосуються оцінювання кліматичних впливів на вразливість лісів на основі біо-екологічних характеристик головних лісотвірних порід і за прогнозними сценаріями регіональних кліматичних моделей. С. Стойко [33] охарактеризував вплив змін клімату на лісові екосистеми Карпат. Однак, методи моделювання впливу зміни клімату на життєздатність лісових порід розроблені ще недостатньо.

Оцінювання чутливості лісової екосистеми до змін клімату здійснюється за впливом біотичних та абіотичних чинників, як на фізіологічні реакції деревних рослин, так і на екосистемні процеси загалом. Це питання є складним і потребує подальшого вивчення.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження виконано шляхом аналізу та синтезу літературних джерел та Інтернет-ресурсів. Застосовано підхід комплексного оцінювання основних чинників прямого та непрямого впливу змін клімату, а також їх взаємодії на лісові екосистеми помірного кліматичного поясу з фокусуванням на помірному континентальному біокліматичному регіоні Європи [1].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Усі впливи змін клімату на лісові екосистеми поділяються на прямі та непрямі [1]. Прямі впливи виникають внаслідок підвищення концентрації CO₂, зміни температури та кількості опадів. Непрямі — результат взаємодії між змінами кліматичних показників, абіотичними та біотичними чинниками (*рис.*).

Основними чинниками прямого та непрямого впливу змін клімату на ліси є [1; 34]:

- збільшення концентрації CO₂ в атмосфері;
- зміни температури;
- зміни в режимі та кількості опадів, поведінках, тривалості та частоти посух;
- стихійні природні явища, спричинені абіотичними чинниками (зміни у виникненні і поширенні пожеж, частоти та інтенсивності буреломів і вітровалів, сніголомів);
- стихійні природні явища, спричинені біотичними чинниками (зміни в частоті та інтенсивності спалахів чисельності шкідників та хвороб).

Як зазначають автори [13] низка досліджень, заснованих на імітаційних моделях, передбачають істотну зміну складу і структури лісів, відмирання дерев або навіть втрату лісового покриву у відповідь на підвищення температури, що пов'язано зі збільшенням концентрації вуглекислого газу в атмосфері. Водночас, не лише кліматичні чинники визначають межі ареалу поширення деревних видів за майбутніх змін клімату. На зростання деревних видів

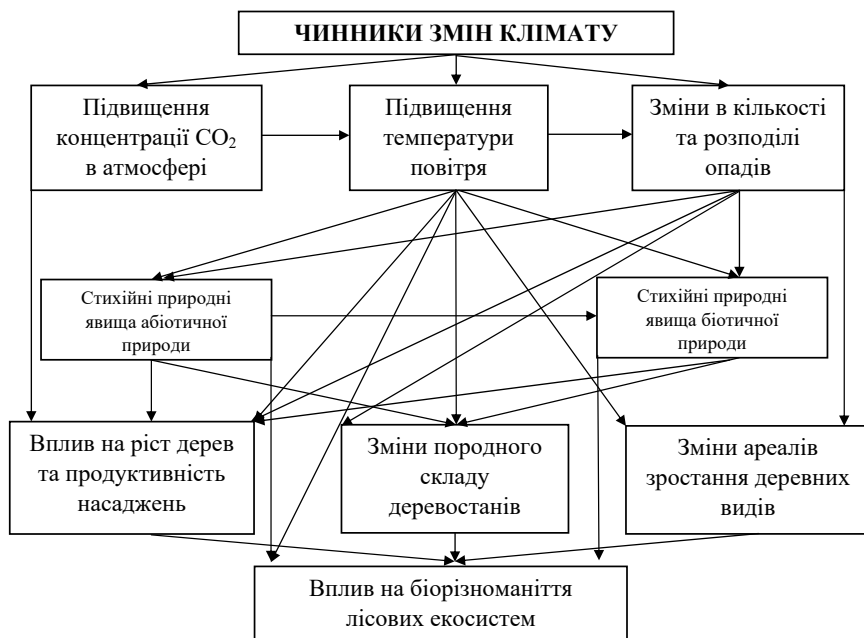


Схема основних екологічних впливів кліматичних змін та їх взаємодії на лісові екосистеми

впливають такі чинники, як ґрунтові умови ділянки, конкуренція з іншими видами, перешкоди для поширення шкідників і патогенів. Тому у моделюванні реакції лісів на швидкі зміни клімату необхідне точніше відображення фізіологічних основ реакції деревних видів на кліматичні показники [1; 7].

Оцінювання чутливості лісової екосистеми до змін клімату аналізується за впливом різних чинників на процеси (ріст, відпад, відтворення, стихійні природні явища біотичної природи, зміна видового складу тощо) [1].

Вважається, що збільшення концентрації CO_2 в атмосфері може сприяти підвищенню інтенсивності фотосинтезу [35; 36]. Однак, швидкість росту дерев може не збільшуватися пропорційно з підвищенням швидкості фотосинтезу, оскільки інші чинники (зокрема, наявність поживних речовин) можуть стати більш важливими, обмежуючи здатність дерев збільшувати приріст, особливо в природних екосистемах [16]. Очікуваний ефект посилення росту рослин у відповідь збільшення кон-

центрації CO_2 буде обмежений температурою і опадами, що підтверджено низкою досліджень [36]. В огляді короточасних експериментів із підвищенням вмісту CO_2 (менше одного сезону) науковці виявили, що фотосинтез листяних видів був більш чутливим до підвищеного вмісту діоксиду вуглецю, ніж у хвойних дерев [14]. Однак результати тривалих досліджень (більше одного сезону) свідчать, що стимуляція фотосинтезу, посилена підвищеним вмістом CO_2 , була подібною у хвойних та листяних деревах, у межах 50–60% [16]. Більшість польових експериментів показали, що підвищений вміст CO_2 в повітрі посилює ріст молодих дерев або сіянців незалежно від умов зростання [14]. Результати нового експерименту [19] засвідчили, що в умовах підвищення концентрації CO_2 чиста первинна продуктивність дерев сосни та широколистяних порід була більшою на 38% та 52% порівняно зі звичайними умовами. Додавання азоту за підвищених концентрацій вуглекислого газу додатково збільшило продуктивність сосни на 11%. Нині науковцями було виявлено, що не тільки

молоді дерева, але й насадження старшого віку також підвищують продуктивність за збільшення діоксиду вуглецю. Науковці у статті [20] встановили, що 180-річний лісовий масив дуба звичайного у Центральній Англії підвищив продуктування деревної біомаси за дії посиленого вмісту CO_2 у повітрі. Крім того, відбулося збільшення виділення вуглецю з коріння в ґрунт, що, ймовірно, вплинуло на кругообіг поживних речовин.

Підвищення вмісту CO_2 в атмосфері спричиняє часткове закриття продихів, що зменшує втрату вологи під час транспірації [1]. Це призводить до збільшення співвідношення між надходженням вуглецю та втратою вологи, тобто підвищується ефективність використання вологи на рівні листків і всього насадження [37].

Згідно з моделюванням змін клімату у помірному континентальному біокліматичному регіоні, середньорічна температура підвищиться приблизно на $3\text{--}4^\circ\text{C}$, за винятком більш континентальних регіонів Центральної Європи та Причорномор'я, де температура може збільшитися на $4\text{--}4,5^\circ\text{C}$ [1].

Наслідки підвищення температури в Європі відрізнятимуться залежно від біокліматичного регіону, що характеризуються відповідними лімітуючими чинниками для росту і розвитку лісів [1]. Тому збільшення температури матиме різні наслідки — позитивні або негативні залежно від регіону та основного лімітуючого чинника. Більш високі температури подовжують вегетаційний період у північних широтах. Однак в інших регіонах вони мають негативний вплив, особливо якщо кількість опадів не збільшуються, як у випадку Середземноморського біокліматичного регіону [1; 7]. За даними аналітичного звіту [34], згідно з моделями зміни клімату очікується підвищення температури по всій території України, зокрема на близько $1,65^\circ\text{C}$ (Степ) та $1,74^\circ\text{C}$ (Лісостеп) для сценарію RCP 4.5 та між $2,68^\circ\text{C}$ (зона мішаних лісів) та $2,98^\circ\text{C}$ (Степ) для сценарію RCP 8.5.

Продуктивність лісів у північній частині бореального біокліматичного регіону

обмежена низькою температурою та доступністю поживних речовин. За цих умов більш висока температура повітря буде подовжувати тривалість вегетаційного періоду та підвищувати продуктивність [7]. У південній частині бореального регіону та у помірному регіоні продуктивність більше обмежена вологою, а менше температурою та поживними речовинами. Вища температура збільшує тривалість вегетаційного періоду, але підвищення продуктивності може бути обмежене наявністю вологи. Збільшення температури може призвести до зростання кількості посух, особливо в Середземноморському та помірному континентальному регіонах [7]. За даними окремих вчених підвищення лише температури було б позитивним для бореальних лісів [15] та мішаних і широколистяних лісів [18], але взаємодія з іншими чинниками все ще вивчається [1; 7].

Зміни в структурі опадів, ймовірно, матиме великий відповідний вплив на продуктивність лісів у регіонах, де продуктивність обмежена вологою [17]. Інший кліматичний сценарій моделювання підтверджує загальне збільшення зимових опадів у Північній та Центральній Європі і (у деяких районах дуже значне) зменшення літніх опадів у центральній та південній частині Європи [1]. Зростання температури без збільшення кількості опадів, або зменшення кількості опадів може призвести до посухи, особливо в Середземноморському, а також у помірному континентальному регіонах. Мінливість клімату особливо важлива у зв'язку зі зміною кількості опадів, оскільки екстремальні явища, такі як тривалі посухи та спекотні періоди, мають більш різкі наслідки для росту та виживання дерев, ніж поступові зміни помірних кліматичних умов. Автори [38] узагальнили вплив спеки та посухи на дерева на рівні рослин і виявили зменшення поглинання CO_2 та продуктування біомаси під час посухи. Зміни, спричинені посухою, особливо знижують ріст чутливих видів деревних рослин.

За даними прогнозування кліматичних змін у помірному біокліматичному регіоні

Європи очікується збільшення середньорічної кількості опадів на 10% переважно взимку, в той час як кількість літніх опадів зменшиться в кількох регіонах (до -10%) [1]. За даними аналітичного звіту [34] зміна клімату істотно не вплине на кількість опадів в Україні. За сценарієм RCP 4.5 зміна кількості опадів становитиме від 13 мм у зоні Степу до 55 мм у Лісостепу. В умовах сценарію RCP 8.5 зміна кількості опадів — понад 80 мм у зоні мішаних лісів [34].

Наслідками підвищення температури є також зміни у породному складі лісів та конкуренції між деревними видами [1; 7; 23; 24]. Науковцями змодельовані потенційні довгострокові зміни в ареалах деревних порід в умовах змін клімату [21], які прогнозують, що території з помірним кліматом втратять багатство видів і різноманіття через загибель широколистяних дерев. Тому, передбачалося, що вони мігруватимуть у бореальні ліси, збільшуючи їх видове багатство та різноманітність. Хвойні ліси за умови тривалих змін демонструють більш швидкий перехід до домінування бука та інших твердолистяних порід помірного регіону. Затримка міграції нових видів, включно з видами роду бук (*Fagus* L.), сприятиме перевазі таких видів, як береза повисла (*Betula pendula* Roth.) та дуб (*Quercus* L.) у лісах із низькою продуктивністю та різноманітністю [1].

Вчені у іншому дослідженні [22] оцінили зміни в ареалах 20 європейських лісових видів помірної зони за чотирма сценаріями зміни клімату. Сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.) і ялина звичайна (*Picea abies* (L.) H. Karst.) втратять більшу частину кліматично придатних для росту територій у помірній зоні навіть за оптимістичних сценаріїв, за винятком Західної Європи та гірських регіонів. Серед листяних видів найбільша прогнозована втрата кліматичного оптимуму для берези повислої за найгіршого сценарію. Види роду дуб і бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.), за позитивним сценарієм, зберігатимуться в своєму кліматичному оптимумі на більшій частині свого поточного ареалу, за винятком південно-східної частини ареалу.

Згідно зі сценарієм A1B в Україні надалі відбуватиметься зсув меж природних зон у північно-західному напрямку. Згідно з оцінювання ефектів впливу зміни клімату на лісостани, проведеного в Україні групою науковців [32] у період 2080–2100 рр. відбуватиметься значне звуження зони оптимального росту за вологістю клімату для сосни звичайної та дуба звичайного. Вже у середині XXI ст. площа територій із незадовільними умовами для дуба становитиме 26% території. Наприкінці століття сприятливі для росту дуба умови (оптимальні та субоптимальні) залишаться лише на заході, на решті території сучасної зони мішано-широколистяних лісів умови для дуба будуть малозадовільними і навіть екстремальними. Для сосни — звуження зони субоптимальних умов на заході та розширення зони непридатних умов на схід і до центру [32].

Зміни клімату також впливатимуть на абіотичні стихійні природні явища з істотними наслідками для лісових екосистем [1; 25]. В Європі такими явищами є вітровали і буреломи (сніголоми), пожежі в екосистемах, повені та посухи, на кожне з яких можуть вплинути зміни клімату. У період 1950–2000 рр. середньорічно 35 млн м³ деревини було пошкоджено внаслідок стихійних природних явищ (близько 8% від загального обсягу рубок у Європі), з них частка пошкоджень від вітру становила 53%, пожежі спричинили 16% від загального обсягу [7]. В умовах зміни клімату екстремальні погодні умови та явища (посуха, повені, урагани) будуть посилюватися, вони мають прямі й непрямі впливи на ліси. Дослідження показали, що лісові пожежі матимуть значно більші наслідки, коли переважають масштабні посухи [7]. Зі змінами клімату прогнозують, що в окремих регіонах повені відбуватимуться частіше з відповідними наслідками для лісових насаджень прибережних зон.

Очікується, що внаслідок змін клімату зросте пожежна небезпека лісів по всій Європі, зокрема у бореальній зоні та центральноевропейських регіонах.

Сильні вітри є істотним чинником у Центральній, а також у Західній і Північній Європі [1; 39] та спричиняють пошкодження в середньому 18,7 млн м³ деревини щороку [40]. Пошкодження лісу внаслідок дії вітровалів, буреломів і сніголомів є постійною причиною економічних втрат у лісовому господарстві по всій Європі [1]. Економічні збитки становлять сотні мільйонів євро щороку.

Моделі глобальної циркуляції передбачають дуже ймовірним, що більша кількість опадів випадатиме у Північній Європі, особливо взимку та навесні, зумовлюючи значне збільшення ризику повеней у Центральній та Північній Європі. Кількість дощових днів зменшиться, але кількість днів із сильними дощами зростатиме. Така зміна призводить до більшої кількості літніх посух, а також до більш екстремальних повеней влітку [1]. Повінь є більш шкідливою, якщо вона відбувається під час періоду вегетації, ніж у період спокою рослин. Дереву найбільш вразливі до наслідків затоплення пізньої весни, відразу після першого інтенсивного росту [41].

Основні чинники змін клімату (підвищення концентрації CO₂ в атмосфері, зміни температури, опадів та стихійних явищ абіотичної природи) істотно впливають на біотичні чинники, зокрема на рослиноідні організми та патогени, прямо чи опосередковано шляхом змін у живленні рослин та їх стійкості або взаємодії між угрупованнями [1; 25]. Зміна клімату впливатиме на часову та просторову динаміку (потенційних) видів шкідників, впливаючи на частоту й наслідки спалахів їх чисельності, а також на їх просторовий розподіл та географічний ареал. Загалом вважається, що зміна клімату вплине на кількість спалахів шкідників та успішну колонізацію грибок-вих патогенів [7; 25].

Кліматичні зміни матимуть значний вплив на поширення живих організмів, оскільки, розмір та розташування ареалів видів залежить від взаємодії доступних середовищ існування з відповідним кліматом [1]. Ймовірним є також вплив на фенологічну синхронність між рослиноідними

організмами та відповідними рослинами. Зміни в кількості опадів та вологості впливатимуть на утворення спор та інфікування патогенами. Водночас, як зазначають вчені, складні взаємодії між температурою, опадами, доступністю поживних речовин, якістю рослин, продуктивністю комах та розширенням ареалу поширення ускладнюють прогнозування майбутніх проблем зі шкідниками лісу.

Науковці [27] провели аналіз літературних джерел на цю тему і встановили, що основними ідентифікованими механізмами позитивної реакції лісових комах на зміну клімату є більша кількість поколінь на рік і вища виживаність за високих температур, нижча стійкість дерев до нападу комах під час сильніших посух, більша кількість субстрату для розмноження короїдів після вітровалів та буреломів та зміни якості субстрату для дефоліаторів через підвищений вміст CO₂. Більшість цих наслідків призведуть до зростання шкоди лісам, однак деякі кліматичні процеси матимуть негативні наслідки для комах також (зокрема, хвилі спеки можуть посилити смертність). Водночас, вчені зазначають, що чинники зміни клімату, ймовірно, взаємодіють між собою — протидіють, що призводить до процесу анігіляції, або в результаті виникають синергетичні ефекти. Це потрібно враховувати під час прогнозування впливу змін клімату на біотичні чинники у лісових насадженнях [27]. Недавні дослідження також показали, що взаємодія між комахами та деревами відбувається через мікоризні та ендоефітні гриби [42; 43] або бактерії. Питання, як ці мікроорганізми реагують на зміну клімату і чи впливає їхня реакція на резистентність дерева-господаря до хвое- та листогризухих комах, залишається відкритим [27].

Зміна клімату є однією з найбільших поточних і майбутніх загроз біорізноманіттю лісів. Вона безпосередньо діє як на види, так і на їхні середовища існування [44]. Подальші зміни клімату можуть мати значний вплив на місцеве та регіональне біорізноманіття та зусилля щодо його збереження. Абіотичні умови місцевості та придатність

середовищ існування для певних видів будуть змінюватися, тому прогножуються або вже нині спостерігаються зміни в ареалах певних видів. Зміна клімату сприяє видам із певними ознаками, тоді як чисельність інших видів може зменшитися або навіть вимерти, принаймні локально [26]. Водночас, може підвищитись ризик вимирання видів там, де відповідне середовище існування відсутнє або недоступне [45]. Крім того, може збільшитись небезпека появи інвазійних видів [7]. Оскільки шкідники та хвороби дерев також можуть отримувати користь від зміни клімату, наприклад, через підвищення зимової температури або тривалі вегетаційні періоди, вплив на види дерев посиляться, що може призвести до трансформації основних типів лісів [28]. Зрештою, зміна клімату також спричинить зміни у складі та функціональних характеристиках угруповань.

У глобальному масштабі очікується, що збереження біорізноманіття лісів стане ще складнішим у світлі зміни клімату та пов'язаних із нею невизначеностей. Реакції видів флори і фауни на зростання температури та посухи залежать від регіональних особливостей змін клімату. У помірному континентальному біокліматичному регіоні вони можуть мати наслідки на рівні екосистеми та угруповання, що проявлятимуться у зменшенні біорізноманіття.

ВИСНОВКИ

Дослідження вказують на регіональну мінливість майбутніх змін клімату в Європі. Основні впливи кліматичних змін призведуть до змін в ареалах лісотвірних видів, структурі і складі лісових насаджень, впливатимуть на їх ріст та продуктивність, інтенсивність та частоту стихійних природних явищ.

Вплив змін клімату на окремі деревні види може бути як позитивним, так і негативним, залежно від регіональних особливостей та умов території. Ліси в помірному континентальному біокліматичному регіоні здатні реагувати на прогнозовані зміни клімату збільшенням поглинання вуглецю, особливо в північних частинах регіону. Однак у короткостроковій перспективі вони можуть бути джерелом, а не поглиначем атмосферного вуглецю, оскільки розподіл вуглецю між компонентами екосистеми змінюється у відповідь на зміну кліматичних умов.

В Україні на територіях з майбутніми несприятливими кліматичними умовами прогнозується істотне зменшення продуктивності лісотвірних видів, поступове зниження здатності до природного поновлення, порушення циклу сезонного розвитку, зменшення стійкості до шкідників і патогенів.

ЛІТЕРАТУРА

- Linder, M., Garcia-Gonzalo, J., Kolström, M., Green, T., & Reguera, R. (2008). Impacts of Climate Change on European Forests and Options for Adaptation. Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development. 173 p. URL: https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/impact_of_climate_change_on_european_forest_and_options_for_adaptation.pdf.
- Zdeněk, V., Stanislav, V., & Cukor, J. (2023). European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies. *Journal of Environmental Management*, 332, 117353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117353>.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2006). GISS Surface Temperature Analysis. Global Temperature Trends: 2005 Summation. NASA Goddard Institute for Space Studies and Columbia University Earth Institute, New York, NY 10025, USA.
- Moore, B., & Allard, G. (2008). Climate change impacts on forest health. Working Paper FBS/34E. FAO. URL: <https://www.fao.org/forestry-fao/15905-0dc804ee7d97e656f06507bdcecdcc721.pdf>.
- Lee, H., & Romero, J. (Eds.). (2023). IPCC In: *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, Geneva, Switzerland. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Meehl, G., & Tebaldi, C. (2004). More Intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305, 994–997. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1098704>.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., ... Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems.

- Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>.
8. Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., ... Dadi, Z. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
 9. Pachauri, R. K., & Meyer, L. (Eds.). (2014). IPCC. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
 10. Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioac, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., ... Whetton, P. (2007). Regional Climate Projections. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, ... H. L. Miller (Eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 847–940). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 11. *The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. (2022). Rome, FAO. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb9360en>.
 12. Паризька угода. Ратифіковано Законом № 1469-VIII від 14.07.2016. (2016). (Україна). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text.
 13. Loehle, C., & LeBlanc, D. (1996). Model-based assessments of climate change effects on forests. A critical review Netherlands: N. p. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(96\)83709-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(96)83709-4).
 14. Ceulemans, R., & Mousseau, M. (1994). Tansley review No. 71. Effects of elevated atmospheric CO₂ on woody plants. *New Phytologist*, 127, 425–446.
 15. Kellomäki, S., & Wang, K.-I. (1996). Photosynthetic responses to needle water potentials in Scots pine after a four-year exposure to elevated CO₂ and temperature. *Tree Physiology*, 16(9), 765–772. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/16.9.765>.
 16. Norby, R. J., Wullschlegel, S. D., Gunderson, C. A., Johnson, D. W., & Ceulemans, R. (1999). Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future forest. *Plant, Cell & Environment*, 22, 683–714. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00391.x>.
 17. Kirschbaum, M. U. F. (2004). Direct and Indirect Climate Change Effects on Photosynthesis and Transpiration. *Plant Biology*, 6, 242–253. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-2004-820883>.
 18. Saxe, H., Cannell, M. G. R., Johnsen, Ø., Ryan, M. G., & Vourlitis, G. (2001). Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149, 369–399. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x>.
 19. Palmroth, S., Kim, D., Maier, C. A., Medvigy, D., Walker, A. P., & Oren, R. (2024). Increased leaf area index and efficiency drive enhanced production under elevated atmospheric [CO₂] in a pine-dominated stand showing no progressive nitrogen limitation. *Global Change Biology*, 30, e17190. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17190>.
 20. Norby, R. J., Loader, N. J., Mayoral, C., Ullah, S., Curioni, G., Smith, A. R., ... MacKenzie, A. R. (2024). Enhanced woody biomass production in a mature temperate forest under elevated CO₂. *Nat. Clim. Chang.*, 14, 983–988. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02090-3>.
 21. Thuiller, W., Lavorel, S., Sykes, M. T., & Araújo, M. B. (2006). Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe. *Diversity and Distributions*, 12, 49–60. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2006.00216.x>.
 22. Dyderski, M. K., Paż-Dyderska, S., Jagodziński, A. M., & Puchatka, R. (2025). Shifts in native tree species distributions in Europe under climate change. *Journal of Environmental Management*, 373, 123504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123504>.
 23. Morin, X., Fahse, L., Jactel, H., Scherer-Lorenzen, M., García-Valdés, R., & Bugmann, H. (2018). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8, 5627. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>.
 24. Van Houtven, G., Phelan, J., Clark, C., Sabo, R. D., Buckley, J., Thomas, R. Q., ... LeDuc, S. D. (2019). Nitrogen deposition and climate change effects on tree species composition and ecosystem services for a forest cohort. *Ecological Monographs*, 89(2), e01345. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecm.1345>.
 25. Romeiro, J. M. N., Eid, T., Antón-Fernández, C., Kangas, A., & Trømborg, E. (2022). Natural disturbances risks in European Boreal and Temperate forests and their links to climate change — A review of modelling approaches. *Forest Ecology and Management*, 509, 120071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120071>.
 26. Bässler, C., Hothorn, T., Brandl, R., & Müller, J. (2013). Insects overshoot the expected upslope shift caused by climate warming. *Plos One*, 8(6), e65842. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065842>.
 27. Jactel, H., Koricheva, J., & Castagneyrol, B. (2019). Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 103–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010>.
 28. Hole, D. G., Willis, S. G., Pain, D. J., Lincoln, D. F., Butchart, S. H. M., Collingham, Y. C., Rahbek, C., & Huntley, B. (2009). Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology Letters*, 12(5), 420–431. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01297.x>.
 29. Букша, І. Ф., Гожик, П. Ф., & Смельянова, Ж. Л. (1998). *Україна та глобальний парниковий ефект. Кн. 2. Вразливість і адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату: моногр.* Київ: вид-во Агентства з раціонального використання енергії та екології.
 30. Букша, І., Пивовар, Т., & Букша, М. (2014). Оцінка вразливості лісів східної України до зміни клі-

- мату з використанням ГІС-технологій. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, (12), 30–37. URL: <http://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/131>.
31. Букша, І. Ф., Швиденко, А. З., Бондарук, М. А., Целішев, О. Г., Пивовар, Т. С., Букша, М. І., ... Краковська, С. В. (2017). Методологія моделювання та оцінювання впливу зміни клімату на лісові фітоценози України. *Науковий вісник НУБіП. Сер.: Лісівництво і декоративне садівництво*, 266, 26–38.
 32. Букша, І. Ф., Бондарук, М. А., Целішев, О. Г., Пивовар, Т. С., Букша, М. І., & Пастернак, В. П. (2017). Прогноз життєздатності сосни звичайної і дуба звичайного при зміні клімату в рівнинній частині України. *Лісівництво і агролісомеліорація*, 130, 146–158.
 33. Стойко, С. (2011). Вплив глобальної зміни клімату на лісові формації Карпат. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, (9), 21–29. URL: <http://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/360>.
 34. Іванюта, С. П. (Ред.), Коломієць, О. О., Малиновська, О. А., & Якушенко, Л. М. (2020). *Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь*. Київ: НІСД. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf.
 35. Koch, G. W., & Mooney, H. A. (1996). Response of terrestrial ecosystems to elevated CO₂: A synthesis and a summary. In: G. W. Koch & H. A. Mooney (Eds.), *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems* (pp. 415–429). Academic Press, San Diego.
 36. Beedlow, P. A., Tingey, D. T., Phillips, D. L., Hogsett, W. E. & Olszyk, D. M. (2004). Rising atmospheric CO₂ and carbon sequestration in forests. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2, 315–322. DOI: [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0315:RACACS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0315:RACACS]2.0.CO;2).
 37. Field, C. B., Jackson, R. B., & Mooney, H. A. (1995). Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plants to the global scale. *Plant, Cell and Environment* 18, 1214–1225.
 38. Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I. A., Falge, E., Ciais, P., ... Wang, Q. (2007). Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143 (1–2), 123–145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.004>.
 39. Forzieri, G., Pecchi, M., Girardello, M., Mauri, A., Klaus, M., Nikolov, M., ... Beck, P. S. A. (2020). A spatially explicit database of wind disturbances in European forests over the period 2000–2018. *Earth System Scientific Data*, 12, 257–276. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-12-257-2020>.
 40. Romagnoli, F., Cadei, A., Costa, M., Marangon, D., Pellegrini, G., Nardi, D., ... Rafaele, C. (2023). Windstorm impacts on European forest-related systems: An interdisciplinary perspective. *Forest Ecology and Management*, 541, 121048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121048>.
 41. Glenz, C., Schlaepfer, R., Iorgulescu, I., & Kienast, F. (2006). Flooding tolerance of Central European tree and shrub species. *Forest Ecology and Management*, 235(1–3), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.065>.
 42. Fernandez-Conradi, P., Jactel, H., Robin, C., Tack, A. J. M., & Castagneyrol, B. (2018). Fungi reduce preference and performance of insect herbivores on challenged plants. *Ecology*, 99(2), 300–311. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecy.2044>.
 43. Gange, A. C., Koricheva, J., Currie, A. F., Jaber, L. R., & Vidal, S. (2019). Meta-analysis of the role of entomopathogenic and unspecialized fungal endophytes as plant bodyguards. *New Phytologist*, 223, 2002–2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.15859>.
 44. Pötzelsberger, E., Bauhus, J., Muys, B., Wunder, S., Bozzano, M., Farsakoglou, A.-M., ... Lapin, K. (2021). *Forest biodiversity in the spotlight*. European Forest Institute. URL: <https://efi.int/forestbiodiversity/factors>.
 45. Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 37, 637–669. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>.

Стаття надійшла до редакції журналу 06.10.2025

СТАН СОСНОВИХ ДЕРЕВОСТАНІВ ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ
ЗА ВПЛИВУ КОМАХ-ШКІДНИКІВ І КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВВ.В. Мороз¹, П.М. Душко²¹ Західноукраїнський національний університет (м. Тернопіль, Україна)
e-mail: vera_moroz@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1457-4641² Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: Dushko@i.ua; ORCID: 0000-0002-1408-0342

Зростання уражень соснових лісів Житомирського Полісся через вплив комах-шкідників і кліматичних змін потребує розробки ефективних заходів захисту для забезпечення сталого розвитку лісових екосистем. Метою дослідження було вивчення впливу комах-шкідників на соснові деревостани в умовах кліматичних змін, зокрема з урахуванням сонячної активності та гідротермічних умов, для вдосконалення лісозахисних стратегій. Для досягнення мети проведено польові обстеження, аналіз кліматичних змін, оцінку поширення комах-фітофагів і стовбурових шкідників, а також статистичний аналіз із застосуванням методів обліку гусениць шовкопряда соснового (*Dendrolimus pini* L.) за допомогою липких стрічок і пасток Барбера. Здійснено кореляційний і лаговий аналіз кліматичних показників за 2019–2024 рр. Результати засвідчили зменшення площі уражених лісів на 73% — від 951 до 255 га в 2019 р. і в 2024 р. відповідно. Основні шкідники, зокрема пильщик звичайний сосновий (*Diprion pini* L.), підкоровий сосновий (*Aradus cinnamomeus* Panzer) і шовкопряд сосновий (*Dendrolimus pini* L.), характеризувалися зниженням чисельності осередків ураження. Втім осередки соснового шовкопряда залишалися відносно стабільними, що вказує на потребу постійного моніторингу та біологічного контролю. Виявлено вплив астрафізичних і кліматичних чинників на інтенсивність уражень. Зниження сонячної активності (число Вольфа <50) асоціюється зі збільшенням уражень лісів на 15–20% через рік після спаду сонячної активності. Зменшення гідротермічного коефіцієнта ($ГТК < 1,1$) сприяє посусі та зростанню чисельності шкідників. Біопрепарати Боверин і Метаризин показали високу ефективність, знижуючи чисельність гусениць *D. pini* на 54–72% і втрати продуктивності лісів на 30–40%, забезпечуючи економічну вигоду та екологічну безпеку. Розроблено рекомендації щодо регулярного моніторингу, застосування біопрепаратів, санітарних рубок і прогнозування спалахів шкідників за числом Вольфа та ГТК. Результати мають практичне значення для сталого управління лісами Житомирського Полісся та можуть бути адаптовані для інших регіонів України.

Ключові слова: температура повітря, опади, біопрепарати, сонячна активність, число Вольфа, гідротермічний коефіцієнт.

ВСТУП

Соснові насадження Житомирського Полісся є ключовим компонентом лісового фонду Центрального Полісся України, забезпечуючи екологічний баланс, регуляцію вуглецевого циклу та економічні потреби регіону. Однак вони зазнають значних пошкоджень від комах-шкідників і фітозахворювань, що призводять до зниження приросту деревини, всихання деревостанів і зменшення їхньої біологічної та господарської цінності. За даними О. Sytnyk et al. [1], інтенсивне пошкодження хвої, спричи-

нено шовкопрядом сосновим (*Dendrolimus pini* L.), може знижувати приріст деревини до шести разів, а відновлення дерев триває 10–15 років.

Кліматичні зміни, зокрема підвищення середньорічної температури на 1,5–2°C за останні десятиліття, створюють сприятливі умови для розмноження термофільних шкідників, таких як короїд верхівковий (*Ips acuminatus* Gyllenhal) і короїд шестизубчастий (*Ips sexdentatus* Börner), що посилюють деградацію соснових насаджень. Періоди низької сонячної активності (число Вольфа <50) асоціюються зі

зростанням чисельності шкідників, таких як *D. pini* L., через погіршення гідротермічних умов і підвищення ризику лісових пожеж.

Зниження гідротермічного коефіцієнта ($ГТК < 1,1$) внаслідок посушливості послаблює фізіологічну стійкість дерев, сприяючи спалахам біотичних загроз, що має глобальні наслідки для пом'якшення кліматичних змін [1–6].

У Житомирському Поліссі особливу загрозу становлять осередки комах-фітофагів і стовбурових шкідників, зокрема пильщик звичайний сосновий (*Diprion pini* L.), підкоровик сосновий (*Aradus cinnatomeus* Panzer) і шовкопряд сосновий (*Dendrolimus pini* L.), які завдають значних збитків насадженням віком понад 80 років. Наприклад, у ДП «Коростишівське ЛГ» за 2019–2021 рр. зафіксовано пошкодження 12,0 га соснових лісів II–III категорій санітарного стану, де основну загрозу становить *D. pini* L. через масове об'їдання хвої [7].

Лісозахисні заходи в Україні, що включають санітарні рубки та обробку біопрепаратами (як-от Боверин, Метаризин), проводяться щороку на площах 100–150 тис. га, з піковими значеннями до 285 тис. га в окремі роки. Біопрепарати на основі ентомопатогенних грибів (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*) продемонстрували високу ефективність у боротьбі з *D. pini* L. Для підвищення ефективності лісозахисту необхідно інтегрувати дані про кліматичні та астрофізичні чинники, зокрема прогнозувати спалахи шкідників на основі числа Вольфа та ГТК [8; 9].

Метою дослідження є аналіз впливу комах-шкідників на соснові насадження Житомирського Полісся з урахуванням кліматичних змін і сонячної активності, а також розробка рекомендацій щодо оптимізації лісозахисних заходів. Дослідження базується на даних про динаміку уражень лісів за 2019–2024 рр., кліматичних параметрах (температура, опади, ГТК) і лаговому аналізі впливу числа Вольфа, що допомагає оцінити відтерміновані ефекти астрофізичних чинників на стійкість лісових екосистем.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання впливу комах-шкідників на соснові насадження Житомирського Полісся активно вивчається в українських і міжнародних дослідженнях, з акцентом на динаміку спалахів шкідників, кліматичні чинники та методи захисту. О. Sytnyk et al. [1] зазначають, що синергетичний вплив комах-фітофагів, як-от шовкопряд сосновий (*Dendrolimus pini* L.) і пильщик звичайний сосновий (*Diprion pini* L.), разом із фітозахворюваннями посилюється кліматичними змінами, зокрема глобальним потеплінням і посухами, що призводить до каскадних порушень у соснових екосистемах України. Н. Jactel et al. [2] підкреслюють, що підвищення температури на 1,5–2°C обумовлює розширення ареалів термофільних шкідників, як-от короїд верхівковий (*Ips acuminatus* Gyllenhal) і короїд шести зубчастий (*Ips sexdentatus* Börner), ускладнюючи управління лісами. D.S. Pureswaran et al. [3] додають, що кліматичні зміни синхронізують спалахи шкідників, що вимагає інтегрованих стратегій захисту.

Вплив астрофізичних чинників, зокрема сонячної активності, також є важливим аспектом. G. Stanojević et al. [4] встановили, що періоди низької сонячної активності (число Вольфа < 50) корелюють зі збільшенням чисельності шкідників і частоти лісових пожеж, що погіршує гідротермічні умови. За даними IPCC [5] зниження гідротермічного коефіцієнта ($ГТК < 1,1$) через посухи послаблює стійкість дерев, сприяючи біотичним загрозам. В.А. Tinsley [6] уточнює, що сонячний вітер впливає на глобальний електричний контур, змінюючи вологість (зниження на 1,5–3%) і температуру, що опосередковано зумовлює спалахи *D. pini* L. і *Diprion pini* L. у Житомирському Поліссі.

Регіональними дослідженнями, що здійснені нами в 2023 р. [7], встановлено, що в Житомирському Поліссі кліматичні стреси (підвищення температури на 2°C, зміна опадів) зменшують продуктивність соснових насаджень на 5–15% через вси-

хання, а ключовими шкідниками є *Diprion pini* L. (5470 га у 2019 р.) і *D. pini* L. (956 га стабільно). Застосування біопрепаратів, як-от Боверин і Метаризин, є перспективним напрямом. Такі вчені як S. Karthi та В.Ф. Дрозда зі співавт. [8; 9] підтверджують високу ефективність ентомопатогенних грибів (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*) у боротьбі з *D. pini* L., забезпечуючи зниження чисельності шкідників на 50–72% із мінімальним впливом на довкілля.

Міжнародні дослідження доповнюють українські дані. Так, R.W. Hofstetter [10] підкреслює взаємодію кліматичних змін, порушень і короїдів (*Ips* spp.), що впливають на майбутні лісові ландшафти. В. Wermelinger et al. [11] встановили, що підвищення температури зменшує щільність агресивних короїдів у внутрішньоальпійських соснових лісах, але посухи посилюють смертність дерев. D. Liu et al. [12] вказують на зв'язок кліматичних змін із накопичувальними ефектами сонячної активності, що зумовлюють посуху та деградацію лісів. Е. Błońska et al. [13] дослідили вплив клімату на ґрунтову мікробіоту та жуличей (*Carabidae*), які сприяють відновленню екосистем після пожеж. В. Subedi et al. [14] наголошують, що кліматичні зміни ускладнюють управління лісами через синхронізацію спалахів шкідників.

I. Skrzecz і K.K. Das із співавт. [15; 16] наголошують про ефективність біопрепаратів для контролю *D. pini* L. у Центральній Європі, що узгоджується з українськими дослідженнями. Роботи N. Puzrina et al. [17; 18] акцентуються на важливості моніторингу популяцій пильщиків для прогнозування спалахів у соснових насадженнях. Р.С. Tobin et al. [19] пропонують довгостроковий аналіз сонячних циклів (11 років) для прогнозування спалахів шкідників. Щодо вчених А.В. Simler-Williamson, D.M. Johnson і К.Д. Haynes [20; 21], підкреслюють синергетичний ефект кліматичних змін і атак короїдів, що позитивно впливає на розвиток фітозахворювань, зокрема офіостомових грибів.

Незважаючи на значний прогрес, комплексний аналіз впливу біотичних, кліма-

тичних і астрофізичних чинників із урахуванням лагових ефектів сонячної активності в контексті Житомирського Полісся залишається обмеженим, що вказує на важливість цього дослідження. Нові дані з роботи Т.Д. Gibb [22] наразі дають змогу уточнити морфологічні характеристики ключових видів, як-от златка соснова синя (*Phaenops cyanea* Fabricius), для покращання методів ідентифікації.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Місцем проведення досліджень було державне підприємство «Коростишівське лісове господарство» (ДП «Коростишівське ЛГ»), засновано у 1936 р. та розташовано в південно-східній частині Житомирської обл. на територіях Андрушівського, Коростишівського та Радомишльського р-нів. Підприємство займається заготівлею деревини, охороною та захистом лісів, веденням мисливського господарства, вирощуванням сіянців у закритому ґрунті, створенням насаджень на староорних землях і підвищенням продуктивності та біологічної стійкості лісів. Основною лісовірною породою є сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.), насадження якої зазнають впливу еколого-кліматичних чинників, зокрема нерівномірних опадів, раннього початку вегетації, літньої спеки та посух на дерново-підзолистих ґрунтах.

Досліджували соснові насадження, уражені комплексом стовбурових комах-шкідників і комах-фітофагів. До стовбурових комах-шкідників належать короїд верхівковий (*Ips acuminatus* Gyllenhal), короїд шести зубчастий (*Ips sexdentatus* Börner), лубоїд сосновий малий (*Tomicus minor* Hartig) і лубоїд сосновий великий (*Tomicus piniperda* L.). Серед комах-фітофагів основну увагу приділено сосновому шовкопряду (*Dendrolimus pini* L.), відповідно до [9; 14]. Всихання деревостанів відбувалося у слабкому (5%), середньому (10%) та сильному (15%) ступенях, мало поодинокий або груповий характер і переважно було пов'язано з осередками верхівкового короїда. Всихання спостерігалось на ділян-

ках минулорічних рубок, у насадженнях із низькою повнотою, поблизу доріг і на відкритих ділянках («вікнах»), де переважав сухостій V–VI категорій санітарного стану (з частковим відшаруванням кори, відсутністю хвої та гілок). У ДП «Коростишівське ЛГ» домінував вершинний тип всихання, що характеризувався пожовтінням хвої та розрідженням крон. Додатково виявлено пошкодження златкою синьою сосною (*Phaenops cyanea* Fabricius), що супроводжувалося рудуватою хвоєю, відшаруванням кори та чорним забарвленням стовбурів через сажисті гриби. Також зафіксовано об'їдання хвої шовкопрядом сосновим. Внутрішні тканини стовбурів мали синювате забарвлення через захворювання дерев, спричинені офіостомовими грибами, що вказує на заселення ослаблених дерев патогенами та комахами-шкідниками [20].

Перед закладанням пробних площ вивчали архівні матеріали ДП «Коростишівське ЛГ» щодо встановлення осередків шовкопряду соснового (*Dendrolimus pini* L.). Тимчасові пробні площі (ТПП) закладали в насадженнях із переважанням сосни звичайної (склад насадження від 80% до 100%) відповідно до СОУ 02.02-37-476:2006 «Пробні площі лісовпорядні».

Санітарний стан насаджень оцінювали згідно з постановою Кабінету Міністрів України «Про затвердження Санітарних правил в лісах України» від 27 липня 1995 р. № 555. Біометричні показники дерев (висота, діаметр) визначали за допомогою висотоміра-дальноміра-екліметра Forestry Pro та шведської мирної вилки.

Облік чисельності гусениць соснового шовкопряду виконували за методикою «липкої стрічки», описаною Т.Д. Гібб та С. Осето [22]. Липку стрічку клеїли на деревах на висоті 1,3 м від поверхні землі. Крім того, на кожній пробній площадці закладали 5 пасток Барбера (всього 25 шт.) для відлову гусениць у весняний період, які переміщалися на поверхні ґрунту, як рекомендовано Н. Пузріна [17; 18]. Пастки виставляли на рівні землі якомога ближче до стовбурів дерев. Кожні два тижні паст-

ки збирали для оцінки наявності комах-фітофагів і виставляли нові. Облік проводили шляхом підрахунку кількості живих і мертвих гусениць, що потрапили на липку стрічку та пастки Барбера, відповідно до I. Skrzecz [15].

На тимчасових пробних площах створювали дослідні ділянки розміром 100×100 м. На кожній ділянці методом конверту (по краях і в середині) розбивали 5 площадок розміром 10×10 м. У кожній площадці відбирали по 10 дерев, загалом 50 дерев на дослідній ділянці. Вивчали особливості сезонного розповсюдження гусениць соснового шовкопряду; заселеність іншими комахами-фітофагами не оцінювали.

Для оцінки впливу сонячної активності використано щорічні значення числа Вольфа за 1961–2024 рр. із астрономічних архівів NOAA, як описано G. Stanojević [4]. Кліматичні параметри (середньорічна температура, сума опадів, гідротермічний коефіцієнт) аналізували за даними метеостанцій Житомирської обл. за 2019–2024 рр.

Гідротермічний коефіцієнт (ГТК) розраховували за формулою запропонованою Г.Т. Селяниновим:

$$\text{ГТК} = R / (0,1 \times \sum T),$$

де R — сума опадів (у мм) за період із середньодобовими температурами вище +10°C; $\sum T$ — сума активних температур (°C) за той самий період.

Проаналізовано архівні кліматичні дані Житомирської обл. (1961–2024 рр.) для оцінки змін середньорічної температури (від 8,5°C до 10,2°C), суми опадів (від 620 мм до 540 мм) і ГТК. Лаговий аналіз (1–3 роки) використано для оцінки відтермінованого впливу сонячної активності на біотичні та абіотичні загрози, як описано В.А. Тінслі [6].

Коефіцієнти кореляції Пірсона розраховували в Microsoft Excel. Моделювання залежності між числом Вольфа, ГТК і площею уражених лісів проведено за допомогою лінійного регресійного аналізу ($R^2=0,62\text{--}0,75$), як рекомендовано Johnson & Haynes (2023).

Ефективність біопрепаратів (Боверин, Метаризин на основі *Beauveria bassiana* і *Metarhizium anisopliae*) оцінювали за методиками S. Karthi, В.Ф. Дрозда та ін. [8; 9] на експериментальних ділянках (5 га) у 2021–2023 рр., порівнюючи чисельність *D. pini* L. на оброблених і контрольних ділянках. Санітарні рубки аналізували за обсягами вирубки ($\text{м}^3/\text{га}$) та їхнім впливом на відновлення насаджень, як описано I. Skrzecz [15].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За даними Державного агентства лісових ресурсів України, загальна площа загиблих соснових насаджень у Житомирському Поліссі у 2019–2024 рр. істотно коливалася за впливу комплексу біотичних та абіотичних чинників. Від пошкоджень комахами-фітофагами втрати зменшилися від 951 га в 2019 р. до 317 га у 2021 р. (зниження майже втричі), проте у 2022 р. площі знову зросли до 452 га внаслідок посухи (ГТК=1,01). У подальшому, завдяки стабілізації гідротермічних умов (ГТК=1,07–1,09), масштаби ураження зменшилися до 289 га у 2023 р. та 255 га у 2024 р., що становить скорочення на 73% порівняно з 2019 р. (рис. 1).

Фітозахворювання також виявили тенденцію до поступового зменшення: від 432 га у 2019 р. до 300 га у 2024 р. (–31%).

Водночас у 2022 р. їхній рівень тимчасово збільшився до 398 га через дефіцит вологи (ГТК=1,01). Вагомий вплив мали й абіотичні чинники: у 2020 р. пожежі знищили 570 га насаджень, тоді як погодні uszkodження (буревії, посухи) досягли максимуму в 2021 р. — 1554 га. У подальші роки масштаби цих uszkodжень знизилися до 1280 га у 2022 р., 970 га у 2023 р. та 800 га у 2024 р., що пов'язано зі зменшенням частоти екстремальних кліматичних явищ.

У період 2019–2021 рр. площі, уражені шовкопрядом сосновим (*Dendrolimus pini* L.), залишалися відносно стабільними, коливаючись у межах 800–1000 га. Відсутність масових спалахів цього виду комах-фітофагів, імовірно, зумовлено природною регуляцією популяції і застосуванням препаратів для захисту та боротьби з комахами й хворобами [8; 9].

Найбільші площі уражень пильщиком звичайним сосновим (*Diprion pini* L.) зафіксовано у 2019 р. (понад 5,5 тис. га). За 2020–2021 рр. площі вражень поступово скоротилися до 4,8–5,0 тис. га, що пов'язано з ефективністю захисних заходів, включаючи застосування ентомопатогенних грибів і санітарні рубки, як підтверджується V. Meshkova et al. [23]. Спостерігається фаза спаду популяції, характерна для циклічної динаміки цього виду комах-фітофагів.

Площі, вражені підкорівником сосновим (*Aradus cinnamomeus* Panzer), залишалися



Рис. 1. Динаміка площі загиблих соснових насаджень у Житомирській обл. за причинами ураження (2019–2024 рр.)

мінімальними (менше 100 га) впродовж 2019–2021 рр. Це свідчить про відсутність сприятливих умов для масового розмноження виду, ймовірно, завдяки стабільним гідротермічним умовам і високій біологічній стійкості соснових насаджень, як описано В. Subedi et al. [14].

Площі, уражені стовбуровими комахами-шкідниками, зокрема короїдами роду *Ips* (*Ips acuminatus* Gyllenhal, *Ips sexdentatus* Börner) і лубоїдами (*Tomicus minor* Hartig, *Tomicus piniperda* L.), значно зросли: від 6,0 тис. га в 2019 р. до 9,0 тис. га в 2020 р. та до 18,0 тис. га в 2021 р. Таке зростання, можливо, спричинено посушливими умовами, ослабленням деревостанів і вторинними пошкодженнями після вітровалів, що узгоджується з Н. Jactel, V. Moroz [2; 7]. Ця група комах-шкідників відіграла ключову роль у погіршенні фітосанітарного стану соснових лісів Житомирського Полісся в 2021 р.

У 2019–2021 рр. стовбурові комахі-шкідники, зокрема короїди роду *Ips* і лубоїди, становили основну загрозу для соснових насаджень Житомирського Полісся, з потроєнням площ уражень за три роки. Осередки *Diprion pini* L. поступово скорочувалися, *Dendrolimus pini* L. був стабільним, тоді як *Aradus cinnamomeus* Panzer мав локальний вплив [25]. Зростання активності стовбурових комах-шкідників вказує на посилення впливу кліматичних чинни-

ків, як-от посуха, що вимагає посиленого моніторингу та своєчасного застосування санітарно-лісогосподарських заходів, як рекомендовано D.S. Pureswaran й I. Skrzecz [3; 15].

Дослідження в ДП «Коростишівське лісове господарство» Житомирської обл. впродовж 2019–2024 рр. показали, що домінуючу роль у деградації соснових насаджень (*Pinus sylvestris* L.) відігравали стовбурові комахі-шкідники, зокрема ксилофаги (короїди роду *Ips* і лубоїди), які становили 71% від загальних уражень [2]. На другому місці за шкодочинністю був пильщик звичайний сосновий (*Diprion pini* L.), який спричинив 22% уражень [24]. Шовкопряд сосновий (*Dendrolimus pini* L.) і підкоровик сосновий (*Aradus cinnamomeus* Panzer) мали локальне значення, сягаючи 6% і 1% уражень відповідно [9; 14]. Загальна тенденція вказує на зростання ролі ксилофагів унаслідок кліматичних змін, зокрема зниження гідротермічного коефіцієнта (ГТК), що підкреслює необхідність посилення моніторингу популяцій комах-шкідників, як запропоновано D.S. Pureswaran та I. Skrzecz [3; 15].

Найвищі ураження спостерігалися в насадженнях із повнотою 0,4–0,6, на ділянках минулорічних рубок, поблизу доріг і на відкритих ділянках («вікнах»), де сухостій досягав V–VI категорій санітарного стану.

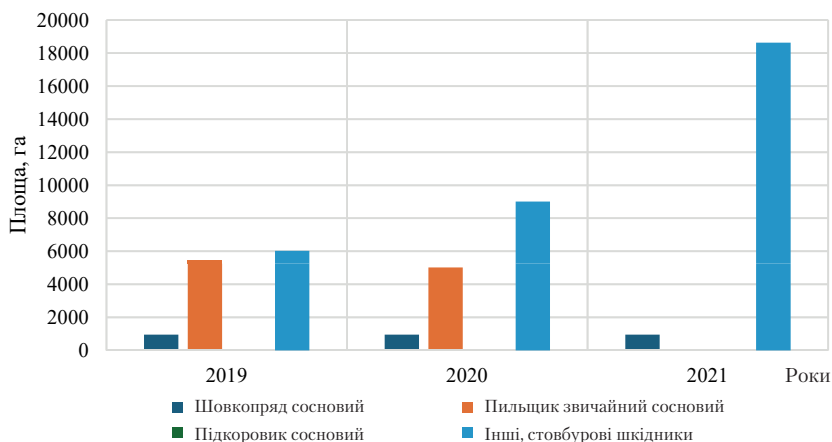


Рис. 2. Наявність осередків комах-фітошкідників за період 2019–2021 рр.



Рис. 3. Середнє статистичне значення заселення шкідників в ДП «Коростишівське лісове господарство» за період 2019–2024 рр.

Тимчасові пробні площі (ТПП) закладено в лісництвах Дубовецькому, Коростишівському, Кропивнянському та Смолівському на дерново-підзолистих ґрунтах. Насадження віком 56–101 років, заввишки 24,6–27,9 м, діаметром 26,3–40,3 см, мають санітарний стан II–III категорій (табл. 1).

Облік чисельності гусениць *Dendrolimus pini* L. і *Diprion pini* L. проводили за методикою «липкої стрічки» та пасток Барбера у весняний (березень–квітень) і літній (червень–липень) періоди 2021–2023 рр. [17; 18; 23].

Результати наведено в табл. 2. Для *Dendrolimus pini* середня чисельність на липкій стрічці становила 12–18 особ. на дерево навесні (пік у квітні — до 25 особ.) і 8–12 особ. влітку.

Для *Diprion pini* L. чисельність була нижчою: 6–10 особ. навесні і 4–7 влітку. Пастки Барбера виявили 5–8 гусениць *D. pini* L. і 3–5 *D. pini* L. на пастку, що вказує на вищу ефективність липких стрічок для моніторингу наземного переміщення [7; 15; 22].

Кліматичний аналіз показав зростання середньорічної температури від 8,5°C до 10,2°C і зменшення суми опадів від 620 мм до 540 мм за 1961–2024 рр., що підтверджується ІРСС (2021). Гідротермічний коефіцієнт (ГТК) за формулою Г.Т. Селянинова становив 1,0–1,2 у 2019–2023 рр., фіксуючи посушливі умови, що сприяли ослабленню дерев і активізації комах-шкідників (рис. 4) [3].

Проведений лаговий аналіз із часовим зсувом від 1 до 3 років виявив значну кореляцію між числом Вольфа, яке відобра-

Таблиця 1. Лісівничо-таксаційна характеристика тимчасових пробних площ

№ з/п	Місце розташування	Породний склад	Вік, років	Висота, м	Діаметр, см	Санітарний стан	Бонітет	ТЛУ
1	Дубовецьке	10Сз	101	27,9	40,3	III	1	В3
2	Дубовецьке	9Сз1Дз+ Бп+Лпд	56	24,6	31,2	II	16	С2
3	Коростишівське	10Сз	71	25,7	31,8	III	1а	С2
4	Коростишівське	8Сз1Бп 1Дз	81	26,9	36,1	III	1	В2
5	Кропивнянське	10Сз+Влч	69	27,8	30,2	II	1а	В2
6	Смолівське	10Сз+Дз	56	27,1	26,3	II	16	С2
7	Смолівське	10Сз+ Дз+Бп	65	27,8	28,1	II	16	С2

Примітка: ТЛУ — тип лісорослинних умов; С2 — свіжий сугруд; В2 — свіжий субір; В3 — вологий субір; 1–16 — бонітет.

Таблиця 2. Чисельність гусениць *Dendrolimus pini* L. і *Diprion pini* L. за методами моніторингу (2021–2023 рр.)

Рік	Вид	Сезон	Липка стрічка (особ./дерево)	Пастки Барбера (особ./пастку)
2021	<i>Dendrolimus pini</i> L.	Весна	12 ± 2	5 ± 1
2021	<i>Dendrolimus pini</i> L.	Літо	8 ± 1	4 ± 1
2021	<i>Diprion pini</i> L.	Весна	6 ± 1	3 ± 1
2021	<i>Diprion pini</i> L.	Літо	4 ± 1	2 ± 1
2022	<i>Dendrolimus pini</i> L.	Весна	15 ± 3	6 ± 1
2022	<i>Dendrolimus pini</i> L.	Літо	10 ± 2	5 ± 1
2022	<i>Diprion pini</i> L.	Весна	8 ± 2	4 ± 1
2022	<i>Diprion pini</i> L.	Літо	5 ± 1	3 ± 1
2023	<i>Dendrolimus pini</i> L.	Весна	18 ± 4	8 ± 2
2023	<i>Dendrolimus pini</i> L.	Літо	12 ± 3	6 ± 1
2023	<i>Diprion pini</i> L.	Весна	10 ± 2	5 ± 1
2023	<i>Diprion pini</i> L.	Літо	7 ± 1	4 ± 1

Примітка: Дані представлені як середнє ± стандартне відхилення.

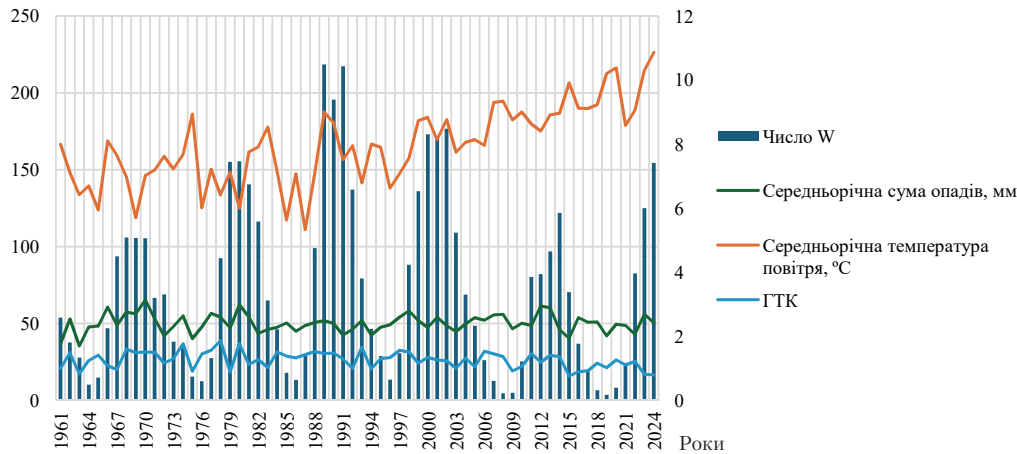


Рис. 4. Динаміка кліматичних показників за період 1961–2024 рр.

жає рівень сонячної активності, та площею уражених лісів у Житомирському Поліссі, де домінують соснові насадження (*Pinus sylvestris* L.), уражені комахами-фітофагами (*Dendrolimus pini* L., *Diprion pini* L.) та стовбуровими комахами-шкідниками (ксилофаги, короїди роду *Ips*, лубоїди) [26]. Коефіцієнт кореляції Пірсона становив $r=0,68$ ($p<0,05$), що вказує на статистично значущу залежність із 95%-м рівнем довіри. Ця залежність свідчить про те, що підви-

щення сонячної активності, зафіксовано за даними NOAA за 2019–2023 рр., могло сприяти підвищенню метаболічної активності комах-шкідників і комах-фітофагів, сприяючи їхньому розмноженню та розширенню осередків ураження. Результати узгоджуються з висновками G. Stanojević [4], які пов'язують сонячну активність із динамікою популяцій лісових комах, а також із дослідженнями В.А. Tinsley [6], що пояснюють лаговий ефект сонячних ци-

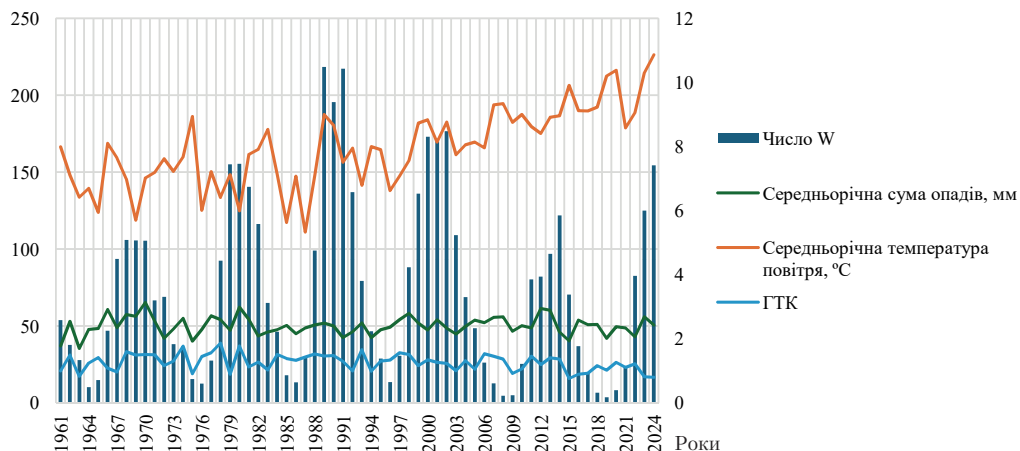


Рис. 5. Лагова кореляція між числом Вольфа та екологічними показниками

клів на екосистеми. Аналіз здійснено на основі щорічних даних числа Вольфа та площ уражень, отриманих із архівів ДП «Коростишівське лісове господарство» та доповнених метеорологічними спостереженнями.

Результати лагового аналізу проілюстровано на *рис. 5*, який відображає лагову кореляцію між числом Вольфа та ключовими екологічними показниками, включаючи площу уражених лісів комахами-фітофагами та шкідниками. Графік демонструє часову залежність із зсувами 1–3 роки, підкреслюючи періодичні піки уражень, що збігаються із максимумами сонячної активності.

Додатковий кореляційний аналіз виявив складну взаємозалежність між гідротермічним коефіцієнтом (ГТК), числом

Вольфа, середньорічною температурою, сумою опадів і площею уражених лісів у період 2019–2023 рр. Коефіцієнти кореляції Пірсона варіювалися в межах $r=0,65–0,71$, що свідчить про помірну до сильної залежності між цими змінними. Зокрема, зниження ГТК до значень нижче 1,1 у 2021–2023 рр. корелювало з розширенням осередків ураження стовбурових комах-шкідників, тоді як підвищення температури сприяло активізації комах-фітофагів. Ці висновки підтримані рекомендаціями Johnson & Haynes (2023), які наголошують на необхідності комплексного аналізу кліматичних і біотичних чинників для прогнозування шкодочинності лісових комах. Результати кореляційного аналізу деталізовано в *табл. 3*, яка надає кількісні дані для подальшого моделювання. Пояс-

Таблиця 3. Вплив кліматичних чинників на площу уражених лісів комахами-фітофагами та шкідниками (2019–2023 рр.)

Рік	Середньорічна температура (°C)	Сума опадів (мм)	Гідротермічний коефіцієнт (ГТК)	Число Вольфа (реальне значення)	Площа уражень (га, регіональна)	Коефіцієнт кореляції (r)	Коефіцієнт детермінації (R^2)
2019	9,0	580	1,2	3,6	951	0,65	0,62
2020	9,5	560	1,1	7,9	1050	0,67	0,68
2021	9,8	550	1,0	32,8	1100	0,68	0,75
2022	10,0	540	1,0	75,6	1200	0,70	0,73
2023	10,2	540	1,0	121,6	1250	0,71	0,74

нення до *таблиці*: площі уражень подано як регіональні значення (га), узгоджені з базовим 951 га в 2019 р., з урахуванням локальних ТПП; число Вольфа — реальна 13-місячна згладжена середня за даними SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations, Всесвітній центр даних із сонячних плям).

Дані отримані на основі метеорологічних спостережень із метеостанцій Житомирської обл. та астрономічних архівів NOAA [4; 5]. Площа уражень відображає сумарні осередки комах-фітофагів (*Dendrolimus pini* L., *Diprion pini* L.) та стовбурових комах-шкідників (ксилофаги), зафіксовані в ДП «Коростишівське лісове господарство». Для 2024 р. площа 255 га, число Вольфа 149,7 (попереднє значення на вересень 2025 р.).

Зростання середньорічної суми температури повітря від 9,0°C у 2019 р. до 10,2°C у 2023 р. свідчить про поступове потепління, що може впливати на метаболізм комах. Зменшення середньорічної суми опадів від 580 мм у 2019 р. до 540 мм у 2022–2023 рр. вказує на посушливі умови, які сприяють ослабленню дерев і розширенню осередків ураження. Зниження ГТК від 1,2 у 2019 р. до 1,0 у 2021–2023 рр. відображає дефіцит вологи, що корелює з активізацією ксилофагів. Збільшення числа Вольфа від 3,6 у 2019 р. до 121,6 у 2023 р. відображає циклічні зміни сонячної активності, пов'язані

з лаговими ефектами. Зростання площ уражених комахами-шкідниками від 951 га у 2019 р. до 1250 га у 2023 р. (з подальшим спадом до 255 га у 2024 р.) узгоджується з підвищенням температури та зниженням ГТК. Значення коефіцієнтів кореляції і детермінації $r=0,65$ – $0,71$ і $R^2=0,62$ – $0,75$ підтверджують статистично значущу залежність між кліматичними чинниками та площею уражень.

Застосування біопрепаратів Боверин і Метаризин (на основі *Beauveria bassiana* і *Metarhizium anisopliae*) на експериментальних ділянках (5 га) впродовж 2021–2023 рр. показало різну ефективність проти *Dendrolimus pini* L. (рис. 6). Боверин забезпечував смертність гусениць на рівні 45–55% (максимум 55% у 2022 р.), тоді як Метаризин — 35–45% (максимум 45% у 2023 р.), що доведено дослідженнями В.Ф. Дрозда, S. Karthi та ін. [8; 9]. На контрольних ділянках чисельність гусениць залишалася 15–22 особ. на дерево.

Санітарні рубки (150–250 м³/га) зменшили щільність популяцій комах-шкідників на 30–45% у насадженнях із повнотою 0,6–0,8, але лише на 15–20% у насадженнях із повнотою 0,4–0,5, що не сприяло відновленню через низьку повноту, як зазначено I. Skrzecz [15]. Результати санітарних рубок представлено в *табл. 4*.

Захворювання дерев, спричинені офіостомовими грибами, виявлено на 60–70%

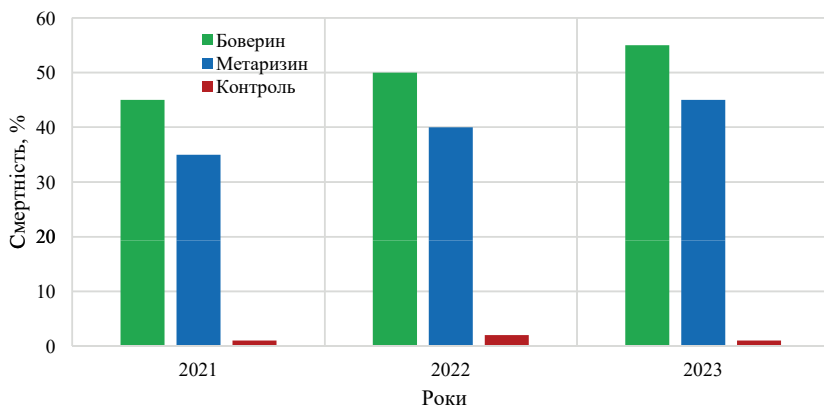


Рис. 6. Ефективність дії біопрепаратів проти *Dendrolimus pini* L. (2021–2023 рр.)

Таблиця 4. Вплив санітарних рубок на чисельність комах-шкідників і відновлення насаджень (2021–2023 рр.)

Рік	Обсяг рубок (м³/га)	Зменшення популяцій (%)	Відновлення насаджень (%)
2021	150	30	5
2022	200	40	8
2023	250	45	10

Примітка: відновлення оцінювали за приростом молодих пагонів.

уражених дерев, що збігається з даними A.B. Simler-Williamson [20].

Синювате забарвлення деревини, відшарування кори та рудувата хвоя вказували на синергію між грибами та комахами-шкідниками (*Ips acuminatus*). Частка дерев із сильним ураженням (15%) зростала в насадженнях із низькою повнотою (0,4–0,5).

Спад уражень на 73% від 951 га у 2019 р. до 255 га у 2024 р. пов'язаний зі стабілізацією гідротермічних умов (ГТК 1,07–1,09) та ефективним застосуванням препаратів, але зростання стовбурових шкідників (від 6,0–18,0 тис. га у 2019–2021 рр.) свідчить про посилення посушливих ефектів [2; 3]. Лаговий аналіз числа Вольфа ($r = 0,68$, з реальними значеннями від 3,6 до 121,6) підтверджує відтермінований вплив сонячної активності на спалахи, узгоджуючись з G. Stanojević та B.A. Tinsley [4; 6], де низька активність (<50) корелює з пожежами та посухами. Біопрепарати Боверин і Метаризин демонструють перевагу над хімічними методами, знижуючи чисельність на 54–72% з мінімальним екологічним впливом [8; 9].

Санітарні рубки ефективніші в насадженнях з повнотою $>0,6$ (зменшення 30–45%), але потребують доповнення рекультивацією для низькоповнотних ділянок, як рекомендовано I. Skrzecz [15]. Синергія офіостомозів (60–70% уражень) з комахами *Ips* spp., посилює деградацію, це доведено результатами досліджень A.B. Simler-Williamson [20] та Johnson & Haynes (2023).

Загалом, результати підкреслюють необхідність адаптації стратегій для Полісся, з урахуванням глобального потепління (IPCC, 2021), та пропонують прогнозування спалахів на основі ГТК і числа Вольфа для профілактики втрат продуктивності на 30–40% [5].

ВИСНОВКИ

Дослідження соснових насаджень Житомирського Полісся за впливу комах-шкідників і кліматичних чинників за 2019–2024 рр. підтвердило їх значний вплив на фітосанітарний стан лісів. Скорочення площі уражених лісів на 73% від 0,951 тис. га у 2019 р. до 0,255 тис. га у 2024 р., стало результатом ефективного поєднання моніторингу, біопрепаратів Боверин і Метаризин та санітарних рубок, що демонструє важливість інтегрованого підходу. Водночас стабільність осередків соснового шовкопряда 0,8–1,0 тис. га і збільшення уражень короїдів від 6,0–18,0 тис. га підкреслюють потребу в постійному контролі, особливо в умовах посухи (ГТК $<1,1$) та циклічних змін сонячної активності (число Вольфа від 3,6 до 121,6), які сприяли підвищенню шкодочинності на 15–20% із лагом 1–3 роки.

Біопрепарати довели високу ефективність, знижуючи чисельність гусениць на 54–72%, перевершуючи хімічні методи та гарантуючи екологічну безпеку, тоді як санітарні рубки виявилися результативними лише в насадженнях із повнотою понад 0,6 (зменшення популяцій на 30–45%), що вказує на необхідність рекультивації слабких деревостанів. Синергія комах-шкідників і грибів ускладнює захист, особливо в старих насадженнях (56–101 рік), де ураження сягає 60–70%, вимагаючи комплексних заходів.

Практичне значення результатів полягає в розробці рекомендацій: регулярний моніторинг із липкими стрічками та пастками Барбера для виявлення піків чисельності (до 25 особ./дерево), пріоритетне застосування біопрепаратів для економії ресурсів (до 30%) та збереження біорізноманіття, цільові санітарні рубки в міцних

насадженьях, а також прогнозування спалахів на основі гідротермічного коефіцієнта та сонячної активності для зниження втрат на 30–40%. Ці підходи придатні для адаптації в інших регіонах України з подібним кліматом (температура 8,5–10,2°C, опади 540–620 мм). Перспективи вклю-

чають вивчення впливу тривалих посух на синергію шкідників і грибів, розробку моделей прогнозування з урахуванням сонячного циклу та оцінку ефекту біопрепаратів на екосистему для забезпечення довгострокової стабільності лісів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sytnyk, O., Khryk, V., Kimeichuk, I., Levandovska, S., Masalskyi, V., Lozinska, T., & Penkova, S. (2024). Forecasting the dynamics of populations of harmful insects and pathogens of woody plants of the forest-steppe of Ukraine in the context of climate change. *Balanced Nature Using*, 2, 92–99. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2024.309927>.
2. Jactel, H., Koricheva, J., & Castagneyrol, B. (2019). Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 103–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010>.
3. Pureswaran, D. S., Roques, A., & Battisti, A. (2018). Forest insect pests and climate change: From outbreaks to integrated management. *Current Forestry Reports*, 4(2), 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6>.
4. Stanojević, G., Radovanović, M., Milićević, S., Milenković, M., Čurčić, N., Vykyuk, Y., ... Gajić, M. (2020). Connection of solar activities and forest fires in 2018: Events in the USA (California), Portugal and Greece. *Sustainability*, 12(24), 10261. DOI: <https://doi.org/10.3390/su122410261>.
5. IPCC. (2021). Sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. URL: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>.
6. Tinsley, B. A. (2024). The influence of the solar wind electric and magnetic fields on the latitude and temporal variations of the current density, JZ, of the global electric circuit, with relevance to weather and climate. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 258, 106355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106355>.
7. Moroz, V. V. (2023). State of pine stands under the influence of biotic and abiotic factors in Zhytomyr Polissya. *International Science Group*. DOI: <https://doi.org/10.46299/979-8-89292-741-3>.
8. Karthi, S., Vasantha-Srinivasan, P., Senthil-Nathan, S., Han, Y. S., Shivakumar, M. S., Murali-Baskaran, R. K., ... Malafaia, G. (2024). Entomopathogenic fungi promising biocontrol agents for managing lepidopteran pests: Review of current knowledge. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 58, 103146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103146>.
9. Дрозда, В. Ф., & Карпович, М. С. (2020). Експериментальне обґрунтування перспектив використання ентомопатогенного препарату боверин для захисту соснових насаджень. *Сільськогосподарська мікробіологія*, 31, 83–91. DOI: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.31.83-91>.
10. Hofstetter, R. W., & Gandhi, K. J. K. (2022). Interactions among climate, disturbance, and bark beetles affect forest landscapes of the future. In *Bark beetle management, ecology, and climate change* (pp. 395–404). Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822145-7.00003-9>.
11. Wermelinger, B., Rigling, A., Schneider Mathis, D., Kenis, M., & Gossner, M. M. (2021). Climate change effects on trophic interactions of bark beetles in inner alpine Scots pine forests. *Forests*, 12(2), 136. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020136>.
12. Liu, D., Yan, H., Yu, C. L., Yin, S. P., Wang, C. W., & Gong, L. J. (2022). Climate change impacts on forest ecosystems. *Forest Science*, 69(2), 143–157. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/foxac054>.
13. Błońska, E., Bednarz, B., Kacprzyk, M., Piaszczyk, W., & Lasota, J. (2020). Effect of Scots pine forest management on soil properties and carabid beetle occurrence under post-fire environmental conditions — A case study from Central Europe. *Forest Ecosystems*, 7(8). DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00240-5>.
14. Subedi, B., Poudel, A., & Aryal, S. (2023). The impact of climate change on insect pest biology and ecology: Implications for pest management strategies, crop production, and food security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100733>.
15. Skrzecz, I., Ślusarski, S., & Tkaczyk, M. (2020). Integration of science and practice for *Dendrolimus pini* (L.) management — A review with special reference to Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 455, 117697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117697>.
16. Das, K. K., Rolania, K., & Yadav, S. S. (2024). Entomopathogenic fungi in sustainable pest management. *Farm Chronicle*, 3(3), 13–16. URL: https://www.researchgate.net/publication/382561455_Entomopathogenic_Fungi_in_Sustainable_Pest_Management.
17. Puzrina, N., Karpuk, A., Vasylyshyn, R., Melnyk, O., & Tokarieva, O. (2022). Thirty-year dynamics of the pine stand sanitary conditions of Boyarka forestry research station. *Scientific Horizons*, 25(10), 43–52. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.25\(10\).2022.43-52](https://doi.org/10.48077/scihor.25(10).2022.43-52).
18. Puzrina, N., Pereviznyk, A., Tokarieva, O., & Boiko, H. (2022). Population indicators of sawflies and concomitant species of needle-eating species in the stands of the Prytiasmyrn ridge. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 13(1), 40–47. DOI: [https://doi.org/10.31548/forest.13\(1\).2022.40-47](https://doi.org/10.31548/forest.13(1).2022.40-47).

19. Tobin, P. C., Haynes, K. J., & Carroll, A. L. (2023). Spatial dynamics of forest insect. In *Forest entomology and pathology* (pp. 647–668). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11553-0>.
20. Simler-Williamson, A. B., Rizzo, D. M., & Cobb, R. C. (2019). Interacting effects of global change on forest pest and pathogen dynamics. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50, 381–403. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024934>.
21. Johnson, D. M., & Haynes, K. J. (2023). Spatiotemporal dynamics of forest insect populations under climate change. *Current Opinion in Insect Science*, 56, 101020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2023.101020>.
22. Gibb, T. J., & Oseto, C. (2019). Insect collection and identification: Techniques for the field and laboratory (2nd ed.). *Academic Press*. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816570-6.00001-0>.
23. Meshkova, V., Nazarenko, S., & Kolienkina, M. (2019). *Diprion pini* L. (Hymenoptera, Symphyta, Diprionidae) population dynamics in the Low Dnieper region. *Folia Forestalia Polonica, Series A — Forestry*, 61(1), 22–29. DOI: <https://doi.org/10.2478/ffp-2019-0002>.
24. Станкевич, С. В. та ін. (2023). Лісова ентомологія: назви основних шкідників лісових насаджень. навч. посіб. Житомир: Видавництво «Рута».
25. Kosunen, M., Kantola, T., Starr, M., Blomqvist, M., Talvitie, M., & Lyytikäinen-Saarenmaa, P. (2016). Influence of soil and topography on defoliation intensity during an extended outbreak of the common pine sawfly (*Diprion pini* L.). *Foresti*, 10, 164–171. DOI: <https://doi.org/10.3832/for2069-009>.
26. Tinsley, B. A. (2000). Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Science Reviews*, 94(1–2), 231–258. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1026797127105>.

Стаття надійшла до редакції журналу 26.08.2025

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНІ ЗАСАДИ ЗБАЛАНСОВАНОГО КОРИСТУВАННЯ ПРИРОДНИМИ ОБ'ЄКТАМИ В АГРОСФЕРІ УКРАЇНИ

О.І. Ковалів

*Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: okovaliv@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4908-7963*

Обґрунтовано особливі та актуальні організаційно-економічні засади збалансованого природокористування, що базуються на законах природи і суспільства та узгоджуються із конституційно-вмотивованими імперативами земельних відносин і природокористування в Україні. На основі розроблених раніше новітніх ідей, візії та підходів із комплексного моделювання й функціонування збалансованого користування природними об'єктами, особливо в агросфері, відкрито вперше функціонал когнітивної земельної економіки в Україні як новий напрям в економічній науці, оскільки система ґрунтується на унікальних засадничих конституційно-земельних імперативах, які є притаманними лише для Українського народу. Науково доведено, що конституційне право Українського народу на землю та її природні ресурси як на природні об'єкти, вимагає невідкладної імплементації цього права де-факто. Обґрунтовано першочергову потребу обліку і взяття на загальнонаціональний баланс відтворюваних та вичерпних ресурсів як доступних багатств, що разом становлять лише десяту частину від усіх та оцінюються в загальному грошовому еквіваленті в понад 9 трлн дол. США. Отримані нові знання мають значну наукову цінність, а також реальну практичну економіко-правову заінтересованість усіх верств української спільноти — до наведення правопорядку в усіх сегментах господарської діяльності, пов'язаних із земле-природокористуванням на «внутрішньому фронті», без чого немислима перемога також над зовнішнім ворогом в умовах екзистенційної війни проти українців. З'ясовано, що кожен громадянин (від народження до смерті), який є живим і має лише єдине громадянство (вимога ст. 4 КУ) матиме в статутному капіталі нації рівновелику власну частку громадянина України (в нашому випадку для початку понад 200 тис. дол. США), яка фіксуватиметься у грошовому еквіваленті на спеціальному особистому рахунку кожного. На такій основі буде щомісячно поповнюватися довічний особистий економічний фонд життєдіяльності кожного громадянина України — для власного розвитку і зростання...

Ключові слова: конституційне право, когнітивна земельна економіка, кадастр, ґрунти, дослідна робота, природокористування.

ВСТУП

Оцінюючи, після ухвалення Основного Закону України (28.06.1996 р.) [1], економіко-правові аспекти чинних конституційних земельних норм-принципів, декларованих у ст. 13 Конституції України (далі – КУ) (у взаємодії з іншими нормами, особливо першого розділу КУ) як норм прямої дії, а також стан дотримання (Чині!) імперативів володіння, користування і розпорядження природними об'єктами права власності Українського народу на засадах верховенства права та вимог адекватного балансу економічних, екологіч-

них і соціальних інтересів між всіма учасниками такого процесу як надзвичайно актуальної передумови суверенітету і державотворення, нами було науково доведено факт системної незаінтересованості (ігнорування) в реалізації де-факто цих конституційних імперативів із боку наукових колег (переважно правників), а також органів державної влади (законодавча, виконавча і судова).

Водночас, формування організаційних підходів до здійснення так званої земельної реформи в донеконституційний період (до 1990 р.) було розпочато на землях «державної власності», пізніше (з 1992 р.) —

«колективної власності», а фактично з 1996 р., не зважаючи на чинність Основного Закону України, така реформа була звужена — до аграрної, оскільки розуміння слова «земля», переважно, ототожнювалось як «ресурс» — із «полем», «грунтом». Окрім того, залишено поза увагою справжню сутність земельної реформи, яка повинна була охоплювати не лише родючі ґрунти як природні об'єкти, а й усі інші категорії земель, які не менш важливі природні об'єкти права власності Українського народу, які конституційно перебувають під особливою охороною держави і до яких мають стосунок усі громадяни України. Як наслідок, до цього часу, здійснювані заходи трансформування аграрного землекористування шляхом паювання «колективної землі», — не введено в конституційне поле України.

Через те, що «завершення» такої реформи на базі трансформації надуманої «колективної» власності на землю методом впровадження, запропонованого «ринку земель сільськогосподарського призначення», — не могло і не може завершитись у принципі, нами було логічно і науково обґрунтовано відповідний конституційно вмотивований алгоритм реформування земельних відносин і природокористування, який подано в монографії «Звершення земельної реформи в Україні: нова парадигма» [2].

Подальші наукові дослідження підкріпили правдивість здобутих знань і вказали на їхню практичну цінність, оскільки системно ґрунтувались на законах неживої і живої природи та суспільства й цілковито узгоджувались із чинними нормами КУ як обов'язковими до виконання.

Нами було встановлено, що головною неврегульованою в Україні передумовою погіршення якісного стану природних об'єктів, особливо — в агросфері, — є нехтування керівними особами (органами) державної влади (разом із науковими та педагогічними «авторитетами» і чисельними так званими «експертами-радикалами») службових вимог якісного виконання своїх обов'язків як конституційно вмотивованих функцій [3].

Вважається, що таке нехтування (можливо відверта антиукраїнська діяльність чи саботаж) відбулося через брак науково обґрунтованих доктрин, концепцій, засад, методології, механізмів, навчальних посібників тощо, які б розкривали сутність конституційних земельних норм-принципів і їхню (імперативів) практичну соціально-економічну цінність до впровадження в суспільне «життя». Як наслідок, спричинено відсутність необхідної візії, програмних, законодавчих і нормативно-правових та інших актів в Україні.

За таких об'єктивних обставин й виникла ідея, яка пізніше стала метою та основою фундаментальної науково-дослідної роботи впродовж 2021–2025 рр. «Організаційно-економічні засади збалансованого користування природними об'єктами в агросфері України» (ДР 0121U108866), важливим завданням якої було теоретико-методологічне наукове дослідження справжніх причин і жахливих наслідків, проведеної так званої «земельної реформи» в Україні.

Також планувалось, на основі одержаних правдивих фундаментальних знань, здійснити наукове обґрунтування організаційно-економічних засад, методів, інструментів та шляхів здійснення де-факто збалансованого користування природними об'єктами в агросфері України, що базувалися б на повноцінній інституалізації чинних норм КУ стосовно землі та її природних ресурсів як природних об'єктів права власності Українського народу — основного національного багатства.

З огляду на потребу подальшого системного дослідження доктринальних основ економіко-правового і еколого-безпечного функціоналу господарських відносин, пов'язаних із сталим земле-природокористуванням, **метою статті** — інтегрування сутності та висвітлення процесу одержаних нових наукових теоретико-методичних знань щодо організаційно-економічних засад і методів збалансованого користування природними об'єктами права власності Українського народу в агросфері України, що ґрунтуються на повноцінній інституа-

лізації чинних земельних норм КУ як норм прямої дії.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

З'ясовано, що наукових досліджень і публікацій із проблем обґрунтування організаційно-економічних засад і методів збалансованого користування природними об'єктами права власності Українського народу в агросфері України, що базуються на повноцінній інституалізації чинних земельних норм КУ як норм прямої дії, особливо на землях сільськогосподарського призначення є не багато.

Зокрема за авторством відомих ґрунтознавців [4–6] окреслено проблеми і шляхи їх врегулювання. Також професори М.Д. Гродзінський і А.М. Третяк [7; 8], справедливо й однозначно наголошують на важливості здійснення такого процесу — на ландшафтній основі.

Вирішенню проблем раціонального використання й охорони української «землі», переважно за галузевим принципом: «надра», ґрунти», «атмосферне повітря», «лісові», «водні» та інші природні ресурси, постійно приділялась відповідна увага — на всіх рівнях органів державної влади і місцевого самоврядування [9–12]. На жаль, проблем побільшало і вони залишаються дотепер предметом наукових досліджень багатьох науковців як відомчі, проте вважаються такими, що нерозв'язані та вимагають пошуку реальних науково обґрунтованих економіко-правових шляхів до їх розв'язання...

Однак, мусимо констатувати факт відсутності — в більшості наукових обґрунтувань, окрім автора даної статті, шляхів безболісного і системного врегулювання наявних проблем з охорони ґрунтів і водночас водних ресурсів на водозборах, — з позиції економіко-правової імплементації конституційної норми-принципу «земля та її природні ресурси» як природних об'єктів права власності Українського народу — основного національного багатства, а не з розуміння «землі» як «родючого ґрунту»...

На жаль, також не знаходимо до цього часу наукових досліджень і відповідних публікацій, виконаних будь-ким із відомих нам вчених-аграріїв та економістів, окрім автора, які б розробляли науково обґрунтовані засади, шляхи й механізми врегулювання земельних відносин і природокористування, особливо в агросфері, з позиції вимог чинних норм КУ як загальнонаціональних інтересів українців.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Матеріали як інформаційні і сутнісні джерела нашого наукового дослідження є: КУ, вітчизняні та міжнародні законодавчі і нормативно-правові акти у сфері права, суспільних відносин, економіки природокористування, земельних відносин; матеріали і звіти Державної служби статистики України, Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру, архіви Інституту правотворчості та науково-правової експертизи НАН України; наявні матеріали і висновки власних наукових досліджень та результати практичного досвіду.

Методологічною основою дослідження було обрано діалектичну єдність і суперечливість генетичних і телеологічних засад пізнання соціально-правових явищ і понять із точки зору їх причинно-наслідкового зв'язку і взаємозалежності, історичного розвитку та функціонування; ціннісної цільової структури та соціально-економічне призначення. Для виконання поставлених завдань, зокрема уточнених у процесі їх виконання, використовували такі методи досліджень: монографічний (опрацювання наукових публікацій і різних науково-практичних статей на шпальтах загальнонаціональної преси, які широко обговорювалися в громадянському середовищі, а також матеріали нормативних документів, статистичних даних); абстрактно-логічний (теоретичні узагальнення та формулювання висновків); аналізу та синтезу (обґрунтування методології системного дослідження) тощо. Інформаційну основу проведених досліджень становили

КУ, вітчизняні та міжнародні законодавчі й нормативно-правові акти і коментарі у сфері земельних відносин, природокористування, охорони довкілля, суспільно-економіки відносин, а також наявні наукові статті провідних вчених України, матеріали та висновки власних наукових досліджень і матеріали практичного досвіду.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Кожна цивілізована держава функціонує за своєю Конституцією — Основним Законом і відповідними законодавчими та нормативно-правовими актами, які прийняті в розвиток та згідно з чинними конституційними нормами-принципами. Для України є унікальними декларовані імперативи права «власності на землю» як на «основне національне багатство».

Тому, в основі систематизації чинників генерування «непозиченого капіталу нації» як економіко-монетарного виразника власності Українського народу на своє «основне національне багатство», що перебуває під особливою охороною держави та, в процесі реалізації пропонованого нами звершення земельної реформи в Україні як нової парадигми (2016 р.), передбачено ввести в економіку держави лише четверту частину природних багатств, які оцінюють у грошовому еквіваленті в понад 90 трлн дол. США, тобто на кожного громадянина припадає близько 2 млн дол. США. Втім, попередньо науково доведено, що починати потрібно з відтворюваних та вичерпних ресурсів як доступних багатств, зокрема тих, які знаходяться в просторі педосфери і агросфери та разом становлять лише десяту частину всіх й оцінюються в загальному грошовому еквіваленті в понад 9 трлн дол. США [13].

Отже, повноцінне пізнання й уявлення ролі та функцій цих природних об'єктів в часі й просторі, з позиції конституційно-декларованих прав і обов'язків усіх суб'єктів таких земельних відносин і природокористування в Україні — є надвагомими передумовами для сталого державотворення

та економічного зростання українців на рідній землі.

Не зважаючи на брак фінансування та «кадровий голод» науковців, які б прагнули долучитися до виконання фундаментальної науково-дослідної роботи з аналізу та синтезу теоретичних і методологічних засад збалансованого користування природними об'єктами в агросфері України і, враховуючи той факт, що 24 лютого 2022 р. розпочалася повномасштабна війна РФ проти суверенної України, нам вдалося виконати основний масив запланованої роботи.

Особливу грань досліджень як складову проєкту, посилили відкриті нами вперше нові знання «когнітивної земельної економіки» як системи, яка генеруватиме також «непозичений капітал нації». Водночас, не передбачувано, встановлено (під впливом екзистенційної війни) те, що новітні інноваційні інтереси етнічних українців на «рідну землю» і на «свою владу» як і всіх повноправних громадян України, особливо на цьому етапі, цілковито узгоджуються із засадничими конституційно-вмотивованими імперативами земельних відносин і природокористування. Доведено, що впровадження на такій основі дієвих форм, методів і засобів протидії існуючій внутрішній корумпованій агресії є надважливим і невідкладним завданням. Тому, нами вперше окреслено інваріантні риси, притаманні лише українському етносу і, які знаходяться в пробудженому стані: життєдайної людяності; космічного першопрохідництва; інноваційної винахідливості; гармонії мислення і творчої наснаги, що генетично й духовно переходять (проявляються) крізь суб'єктність поколінь славетних предків етнічних українців, їх сімей, родин і родів...

Враховуючи корективи як наслідки екзистенційної війни та проміжні висновки, з'явилася невід'ємна і невідкладна потреба продовження, не чекаючи закінчення війни, — за новим завданням і за безпосередньої нашої участі подальшого наукового фундаментального дослідження концептуальних конституційно вмотивованих

засад системи когнітивної земельної економіки (відкрита автором вперше) і відповідних прикладних робіт. Здобуті знання повинні включати актуальні механізми, інструменти і чинники, що матимуть практичну цінність під час наведення елементарного правопорядку в існуючому земле-природокористуванні України в кордонах 1991 р., із врахуванням існуючого руйнівного стану в різних зонах держави, особливо в сучасному просторі педосфери та агро-сфери, орієнтуючись на стандарти ЄС.

Аналізуючи, отримані нами результати роботи впродовж 2021–2025 рр. і зважаючи на існуючий війсьний стан, із впевненістю наголошуємо на досягнутих цілях, завданнях та індикаторах виконання. Інтегруючи суть і самий процес одержання нових наукових теоретико-методичних знань як досягнутого нами успіху, найкраще подати їх поетапно й стисло, не посиляючись на наші ключові публікації в наукових виданнях (даний застосунок є вимушеним винятком і не повинен вважатися вимогою редакційної політики до правил цитування), що є логічним і змістовним підтвердженням результатів.

Упродовж 2021 р., на базі досліджень організаційно-правових засад здійснюваної дотепер земельної реформи в Україні з позиції її наслідків, узагальнено основні віхи цього процесу і розкрито базові знання для можливого формування на їхній основі існуючих прийомів збалансованого використання природних об'єктів в агро-сфері. Досліджені й здійснені науково-методичні обґрунтування в доступній формі на базі нових знань конституційного земельного прагматизму, сприяли правдивому пізнанню різноманітних існуючих законодавчих й нормативно-правових актів та організаційно-економічних основ проведених трансформацій — на предмет відповідності їх вимогам конституційної сутності і потребам збалансованого користування природними об'єктами [14]. Такий комплексний підхід сприяв обґрунтуванню і відкриттю нового напрямку земельно-економічної науки «Когнітивна земельна економіка» (КЗЕ) як концеп-

туальний підхід щодо можливого функціонування засад збалансованого земле-природокористування, який ґрунтується на достовірній правовій конституційній основі з позиції новітніх вимог державотворення і реалізується через комплекс системно обґрунтованих механізмів «когнітивної земельної економіки» (автор О. Ковалів) — у процесі звершення земельної реформи в Україні як Нової парадигми. Наглядним результатом дослідження як системи сутності дії всіх процесів укладено, у створеній нами моделі у формі піраміди функціонування когнітивної земельної економіки — так званої Когнітивної Піраміди.

Дана Піраміда-модель слугує системо-творче, як форма моделі для опису холістичних процесів відносин елементів структурованих множин складових у «когнітивних економічних системах», зокрема, земельних, із феноменальною властивістю самокомпенсації складності [15].

Не зважаючи на непередбачуваний руйнівний війсьний стан у державі (аспірантка А. Новаленко зарахована 26 лютого 2022 р. — у рядах Національної гвардії України) нам вдалося в 2022 р. виконати основний масив запланованої фундаментальної роботи і одержати відповідні результати. Успішно проведений аналіз і синтез соціально-економічних та нормативно-правових аспектів як чинників об'єктності й суб'єктності земле-природокористування, що ґрунтуються на законах живої і неживої природи та суспільства і цілковито узгоджуються з чинними нормами КУ заклав основу обґрунтуванню теоретичних організаційно-економічних засад (орієнтирів) збалансованого користування природними об'єктами агросфери України, що є правовими і базуються на чинних нормах КУ. Доведено, що економіко-правові відносини в Україні потребують невідкладного конструювання конституційно вмотивованої системи господарського підходу до процесу земле-природокористування, насамперед — на користь своїх громадян. Визначено, що лише громадяни України, котрі мають єдине громадянство, — є (мають бути) повноправними співзасновниками і співвласниками власної української держави, в якій

функціонуватимуть найвищі конституційно вмотивовані нормативно-правові, соціально-економічні й еколого-охоронні стандарти життєдіяльності. Сформульовано необхідну та достатню множину науково-теоретичних аспектів як підґрунтя організаційно-економічних орієнтирів збалансованого користування природними об'єктами.

На третьому етапі (2023 р.) узагальнені основні емпіричні результати аналізу і синтезу нормативно-правових та еколого-економічних аспектів порівняно з конституційними імперативами, підтвердили наші науково обґрунтовані методичні засади збалансованого користування природними об'єктами в агросфері як науково-практичні конституційно-вмотивовані передумови звернення земельної реформи в Україні. Внаслідок цього встановлено, що здійснювана в Україні так звана земельно-аграрна реформа потребує першочергового введення в конституційне поле України, беручи всі природні об'єкти права власності Українського народу — основне національне багатство і головний земельний капітал нації на загальнонаціональний позавідомчий баланс в Національній земельній установі України, створеній на зразок Національного банку України. Теоретично доведено необхідність виведення з інтенсивного використання всіх розораних ділянок в агроландшафтах, що підлягають залуженню, залісненню та мають ґрунтово-охоронне значення тощо. З'ясовано, що організаційно-правові механізми, пов'язані з методикою функціонування природно-ресурсної і природоохоронної сферами, мають функціонувати на засадах КЗЕ — в усіх галузях економіки із врахуванням тенденцій розвитку та приватної ініціативи як інноваційної й рушійної сили зростання. Запропоновано органам влади негайно призупинити протиправну можливість придбавати (починаючи з 1 січня 2024 р.) в одні руки землі (ділянки) сільськогосподарського призначення загальною площею до 10 000 га угідь. Підтверджено потребу створення понад 500 тис. нових приватних сімейних фермерських та селянських господарств (родові, сімейні маєтки), ство-

рюваних молодими сім'ями (пріоритетне право надається воїнам-переможцям — учасниками бойових дій і їхнім родинам), переважно, без найманих працівників, загальною площею майже 10 млн га малих масивів орних земель та інших (4–5 млн га) прилеглих угідь.

До того ж головну роль відповідальної довгострокової фінансової підтримки в процесі формування і становлення всіх таких господарюючих суб'єктів має виконувати Бюджет пропонованої Національної земельної установи України разом і за участю працездатних громадян, які самостійно вирішуватимуть, в який спосіб здійснювати свою комфортну життєдіяльність на відповідній території, а також — місцевих громад базового рівня.

На черговому етапі (2024 р.) встановлено те, що першопричиною багаторічного земельного блукання української «еліти» в пошуку шляхів і методів формування сталого розвитку суверенної української держави, серед цивілізованих народів світу, виявилась гібридна маніпулятивна проадянська система знань «відомчої монополії», яка укорінилась у науковому та педагогічному середовищі України і плавно переросла в «корумповано-олігархічну» систему заінтересованості — в усьому просторі суспільних відносин. З'ясовано, що для подолання наявних внутрішніх проблем у сферах пов'язаних із земле-природокористуванням як основою формування і функціонування комфортної життєдіяльності українців на рідній землі, вимагалось і вимагається, поряд із невідкладним здійсненням повноцінної імплементації чинних земельних норм Основного Закону України, одночасно оцінити та змодельовати еколого-економічний ефект балансування інтересів природокористування, починаючи з агросфери України.

Крім того, надважливою першочерговою дією (субстанцією) як чинником наведення правопорядку в українській дійсності є правдиві знання економіко-правової сутності конституційного земельного прагматизму, де автоматично набувається «статутна» (засновницька) частка кожним

громадянином України (розам — Український народ), що є живим і має лише єдине громадянство (вимога ст. 4 КУ) як «співзасновником» держави «Україна» і повноправним «співвласником» землі та її природних ресурсів — основного національного багатства. Аргументовано, що наявність особистої частки в капіталі нації стане рушієм процесу проявлення громадянських прав — де-юре і де-факто [16]. За нашими розрахунками, розмір «статутної» частки кожного такого співвласника становитиме для початку в еквіваленті понад 200 тис. дол. США, що фіксується на спеціальному особистому рахунку кожного.

Передбачається, що річні сукупні надходження (рендна плата, земельний податок — у середньому на рівні 1% від вартості природних об'єктів) до нової Національної земельної установи України (Національна земельна комора України) сумарно становитимуть — 90 млрд дол. США. Ця сумарна величина збільшуватиметься щороку. Цілеспрямоване інвестування частини цих непозичених коштів (понад 50 млрд дол. США — щороку), починаючи із наступного року надходжень, у здорове репродуктивне дітонародження і виховання життєдайної української нації та в розвиток малих сімейних господарств (сталих природокористувань) із високою доданою вартістю кінцевої конкурентоспроможної натуральної продукції і продуктів. Надходження іншої частини доходів (понад 26 млрд дол. США) на особисті рахунки кожного громадянина, починаючи — з 50 дол. США щомісяця. Прогнозується, що за умов інтенсивної участі працездатних громадян у системному звершенні комплексної реформи впродовж трьох років поспіль ця сума може зрости до 70–80 млрд дол. США, або по 150 дол. щомісяця кожному громадянину, і так пожиттєво, залежно від економічного стану в державі та від рівня генерування «непозиченого капіталу нації».

Доведено й те, що реалізація основних засад моделювання еколого-економічного ефекту збалансованих інтересів господарювання, зокрема в агросфері, як платформи комфортної життєдіяльності — на Рідній

землі, відбувається всіма доступними методами і засобами, утверджуючи правовий конституційний лад в Україні.

Надважливим результатом наукового дослідження вважається те, що конституційно вмотивовані земельні імперативи в системному взаємозв'язку проявлення засадничих норм-принципів Першого розділу Основного Закону України як фундаментальних чинників існування держави та формування комфортної життєдіяльності у повоєнний період, уособлюють логічний алгоритм: *«Немає землі — немає людей — немає держави»*. Проаналізовано потребу науково обґрунтованого розроблення і прийняття на базі чинних конституційних земельних норм-принципів нових Кодексів України: про надра, атмосферне повітря, ґрунти, ліси, водні та інші природні ресурси як природні об'єкти права власності Українського народу. Обґрунтовано вимогу безперешкодного формування учасниками бойових дій та членами їхніх сімей і близьких родичів нових власних приватних сімейних фермерських, селянських та інших господарств на вигідних умовах як конституційно вмотивовану, оскільки частина четверта ст. 13 КУ однозначно зобов'язує «державу» (її законодавчі, виконавчі і судові органи) забезпечити захист права усіх суб'єктів права власності і господарювання [17]. Розкрито невідкладні науково обґрунтовані прийоми позачергового втілення вимог наведення конституційного економіко-правового порядку як першорядної ланки організаційно-економічних засад збалансованого природокористування на неокупованих і не понівечених війною територіях, зокрема агросфери. Цю роботу треба виконати збалансовано і негайно, відповідно до розроблених конкретних проєктів впорядкування, забезпечивши подальше використання й охорону землі та її природних ресурсів у конкретних умовах, — лише з позиції загальнонаціональних інтересів, — не прикриваючись війною та — не очікуючи закінчення її.

Водночас, доцільно наголосити на тому, що наше фундаментальне наукове дослідження наскрізь забезпечує врегулювання антиконституційних земельних відносин

і природокористування в Україні як найважливіших проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного і людського потенціалів має загальнонаціональне значення та спрямоване на врегулювання наявних в Україні задувлених проблем (з часу набуття незалежності — до початку повномасштабної війни). На превеликий жаль, із 24 лютого 2022 р. додалися непередбачувані проблеми, внаслідок екзистенційної війни РФ проти української нації, націленої на тотальне знищення української держави і соціально-економічного, природного і людського потенціалу.

Вносячи свій скромний науково-практичний внесок у нашу спільну перемогу на «внутрішньому фронті», систематично висвітлюючи здобуті нові знання на багатьох науково-практичних конференціях, круглих столах та на інших публічних заходах, ми відверто обґрунтовуємо реальні пропозиції як дії.

Зокрема, 17 жовтня 2025 р. у рамках Міжнародної науково-практичної конференції «Вплив біоекономіки на економічне зростання», що організувала кафедра НУБіП у тезах «Чесне і гідне дотримання чинних земельних норм Конституції України — ключ до економічного зростання» українців — на рідній землі», ми наголосили: *«Незаперечною вимогою є те, що органи (їхні працівники) державної влади (законодавча, виконавча, судова) і місцевого самоврядування України, а також вчителі (викладачі) таких службовців, у своїх діях — пов'язаних із використанням й охороною землі та її природних ресурсів (надра, ґрунти, ліси, атмосферне повітря, водні, біотичні, енергетичні та інші ресурси), — зобов'язані керуватися, не лише законами неживої і живої природи, але й нормами чинної КУ як норми прямої дії»*.

На жаль, практика показує, що переважна більшість, не те, що студентів, але й викладачів і самих керівників навчальних закладів та їхніх підрозділів (факультетів, кафедр, лабораторій), не володіють правдивими знаннями засадничих норм стосовно права власності Українського народу на

землю, застосовуючи гібридні антиукраїнські наративи про заможне (райське) життя (економічне зростання), здебільшого — десь там...».

Також 20 листопада 2025 р. на Дев'янадцятих річних зборах Конгресу вчених економістів-аграрників порушено дискусію та водночас висвітлено в тезах Міжнародної науково-практичної конференції «Стратегія розвитку аграрного сектору економіки до 2030 р.: завдання агроекономічної науки», які проходили в Національному науковому центрі «Інститут аграрної економіки», наявні (неймовірні) в Україні проблеми щодо відсутності дотепер (з часу ухвалення КУ — 28 червня 1996 р.), не лише Кодексу України про ґрунти, але й вкрай необхідного Національного (Державного) кадастру ґрунтів України...

Інтегруючи сутність та висвітлюючи процес одержаних нових наукових теоретико-методичних знань щодо організаційно-економічних засад і методів збалансованого користування природними об'єктами права власності Українського народу в агросфері України, що базуються на повноцінній інституалізації чинних земельних норм КУ як норм прямої дії, доцільно відверто зауважити відхилення наших наукових результатів від прийнятих способів дослідження багатьма науковцями. Об'єктивний і реально можливий потенційний вплив на подальше поглиблення досліджень у ракурсі одержаних результатів виконаного нами проєкту та відкриті нами нові знання, деякою мірою неупереджено наступають також на існуючий простір гібридного невігластва, корумпованості, кругової поруки та безвідповідальності в багатьох сферах суспільства. Із цих причин, на наше переконання (можливо через відкриту воєнну агресію), ми також відчули деякий фінансовий і кадровий голод — вже на другий рік виконання нашого проєкту НДР. Однак, нам як (керівнику роботи) та професійному науковцю з великим практичним досвідом вдалося майже в безперервному режимі виконати всі етапи роботи, передбачені календарним планом і технічним завданням дослідження, проте

у сконцентрованому змістовному вигляді основного масиву результатів.

За підсумками роботи на досить об'ємній базі здобутих знань, нами підготовлено і передано до друку також відповідну наукову монографію з аналогічною назвою «Організаційно-економічні засади збалансованого користування природними об'єктами в агросфері України», що рекомендовано для представників органів державної влади, учених, викладачів, студентів та всіх зацікавлених у пошуку шляхів розв'язання проблемами земельних відносин і використання природних ресурсів, особливо в агросфері України на засадах чинних норм-принципів конституційного земельного прагматизму...

ВИСНОВКИ

Виконані фундаментальні дослідження впродовж 2021–2025 рр. (ДР 0121U108866) дали змогу скомпонувати особливі та актуальні організаційно-економічні засади збалансованого природокористування, що базуються на законах природи і суспільства та цілковито узгоджуються із засадничими конституційно-вмотивованими імперативами земельних відносин і природокористування в Україні. Розроблені раніше автором проекти, новітні ідеї, візії та підходи з комплексного моделювання й функціонування збалансованого користування природними об'єктами в агросфері України, розкриваючи економіко-правовий алгоритм як систему нових механізмів конституційних норм-принципів, сприяли відкриттю вперше функціоналу когнітивної земельної економіки в Україні як нового напрямку в економічній науці, оскільки система ґрунтується, не лише на законах неживої і живої природи та суспільства, але й на унікальних засадничих конституційно-земельних імперативах, які є притаманними лише для Українського народу. Конституційне право Українського народу на землю та її природні ресурси як на природні об'єкти вимагає імплементації цього права де-факто. Попередньо науково доведено, що починати потрібно з відтворюваних та вичерпних ресурсів як доступних багатств

і разом становлять лише десяту частину всіх та оцінюються в загальному грошовому еквіваленті в понад 9 трлн дол. США.

На основі формування і функціонування новітньої системи когнітивної земельної економіки України — в процесі «Звершення земельної реформи в Україні: нова парадигма», враховуючи вимоги диференційного (в часі та просторі) подолання наслідків воєнної агресії, особливо в сільській місцевості, та з позиції рівня завданої шкоди, особливо на окупованих територіях, було систематизовано організаційно-економічні засади як передумови успіху.

Отримані нові знання мають значну наукову цінність, а також реальну практичну економіко-правову заінтересованість усіх верств української спільноти — до наведення правопорядку в усіх сегментах господарської діяльності, пов'язаних із земле-природокористуванням на «внутрішньому фронті», без чого немислима перемога також над зовнішнім ворогом в умовах екзистенційної війни проти українців. Тому така особлива науково-технічна продукція з налагодження системи організації управління і функціонування життєдіяльності в існуючих умовах України на правовій основі є логічно актуальною і такою, що відсутня (немає аналогів) в економіко-правовому функціоналі інших державах світу.

У досягненні сталого комфортного простору життєдіяльності громадян України на «власній землі» в екологічній безпеці на європейському рівні, зокрема для громадян добровільно заінтересованих повернутися в Україну та інших українців, стане запропонований алгоритм автором вперше, згідно якого передбачається здійснити офіційне (законодавчо і на практиці) визнання статус кожного громадянина України (разом — Український народ), що є живим і має лише єдине громадянство (вимога ст. 4 КУ), співзасновником держави і повноправним співвласником землі та її природних ресурсів (основного національного багатства). Доведено, що кожен такий громадянин (від народження до смерті) матиме в статутному капіталі нації рівновелику власну частку громадянина України (в нашому

випадку для початку понад 200 тис. дол. США), яка фіксуватиметься у грошовому еквіваленті на спеціальному особистому рахунку кожного. На такій основі з'явиться змога щомісячно поповнювати довічний особистий економічний фонд життєдіяльності кожного громадянина України для власного розвитку і зростання...

Бачається, що відкритий нами унікальний алгоритм взаємовпливу та очікувані кінцеві результати успіху, складуть наукову новизну і матимуть практичну цінність, а самі науково обґрунтовані концептуальні організаційно-економічні засади як система когнітивної земельної економіки в умовах повоєнного стану України, що реалізуватимуться вперше на конституційно вмотивованій основі, закономірно забезпечуватимуть базисний правопорядок у

земле-природокористуванні, також відбудуватиметься зростання життєдіяльності українців, орієнтуватимуться на стандарти Євросоюзу.

На такій основі виникла потреба невідривного подальшого виконання (за новим завданням під нашим керівництвом) логічно актуального прикладного дослідження: «Економіко-правові основи когнітивної земельної економіки земле-природокористування в агросфері України», яке стане підґрунтя для розроблення Урядом України надважливих: загальнонаціональної Концепції і Програми формування збалансованого (сталого) земле-природокористування в Україні, зорієнтованих на Євросоюз, а також відповідно задекларованих проєктів законодавчих і нормативно-правових актів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Верховна Рада України (1996). Конституція України. Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text>.
2. Ковалів, О. І. (2016) *Звершення земельної реформи в Україні: нова парадигма: моногр.* Київ: ДІА.
3. Ковалів, О. І. (2020). Головна неврегульована в Україні передумова погіршення якісного стану природних об'єктів. *Збалансоване природокористування*, 4, 5–16. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2020.226618>.
4. Балюк, С. А., & Шимель, В. В. (2024). Про стан та завдання відновлення, охорони і управління ґрунтовими ресурсами України. *Вісник аграрної науки*, 2(851), 5–10. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202402-01>.
5. Докучаев, В. В. (1979). *Наши степи колось і тепер.* Харків: Держ. вид-во с.-г. літ.
6. Медведєв, В. В., & Булигін, С. Ю. (2017). Сучасні системи землеробства і проблема обробітку ґрунту. *Агроєкологічний журнал*, 2, 127–134. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2017.220168>.
7. Грозинський, М. Д. (1993). *Основи ландшафтної екології.* Київ: Либідь.
8. Третяк, А. М. (2017). *Землевпорядне проектування: теоретичні основи і територіальний землеустрій: навч. посіб.* Київ: Вища освіта.
9. Юрченко, В. І. (2017). Сучасні стратегічні напрями розвитку інноваційних процесів в сільському господарстві регіонів України. *Державне управління: удосконалення та розвиток*, 12. URL: <http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=1150>.
10. Добряк, Д. С., & Шкуратов, О. І. (2018). Формування і розвиток ринкових земельних відносин на теренах України. *Збалансоване природокористування*, 1, 8–17. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2018.276464>.
11. Євсюков, Т. О. (2015). *Класифікація та екобезпечне використання особливо цінних земель: моногр.* Київ-Львів: Ліга-Прес.
12. Мартин, А. Г. (2011). *Регулювання ринку землі в Україні.* Київ: Аграр. Медіа груп.
13. Ковалів, О. І. (2022). У кого земля — в того влада! *Урядовий кур'єр* (2020, 2 лютого). URL: <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/u-kogo-zemlya-v-togo-vlada/>.
14. Заїка (Новаленко), А. О. (2021). Regulatory and legal support of land reform in Ukraine. *Збалансоване природокористування*, 2, 24–34. URL: <https://journals.urau.ua/bnusing/article/view/237986>.
15. Ковалів, О. І. (2021). «Когнітивна земельна економіка» — основний ключ до звершення земельної реформи в Україні як нової парадигми. *Ефективна економіка*, 6. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/6_2021/10.pdf.
16. Шакур, В., & Ковалів, О. (2024). Економіко-правове проявлення декларованої власності Українського народу на основне національне багатство. *Філософські та методологічні проблеми права*, 2(28), 7–23. URL: <https://philosophy.naiu.kiev.ua/index.php/philosophy/article/view/1650/1650>.
17. Ковалів, О. І., & Новаленко, А. О. (2025). Праксеологія імплементації в Україні конституційної норми-принципу «земля» щодо «родючих ґрунтів»... *Ефективна економіка*, 10. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2025.10.29>.

Стаття надійшла до редакції журналу 24.10.2025

СПРЯМОВАНІСТЬ ПРОЦЕСІВ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ↔СИНТЕЗУ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ У ЧОРНОЗЕМІ ВИЛУГУВАНОМУ ЗА РІЗНИХ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

В.В. Волкогон, С.Б. Дімова, К.І. Волкогон,
В.П. Сидоренко, Л.А. Шевченко, Т.С. Сасіна

Інститут сільськогосподарської мікробіології
та агропромислового виробництва НААН (м. Чернігів, Україна)
e-mail: volkogon@ukr.net; ORCID: 0000-0003-0675-1318
e-mail: dimova@ukr.net; ORCID: 0000-0003-2440-6657
e-mail: katerina_volkogon@ukr.net; ORCID: 0000-0002-7156-4124
e-mail: sydorenkochrom@gmail.com
e-mail: shevchenkolyubov@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2637-1999
e-mail: taniateri5@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4021-9202

Мета роботи — визначити зміни у спрямованості процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунті за вирощування сільськогосподарських культур за мінеральних та органо-мінеральних систем удобрення. Використано методи польового дослідження (стаціонарний польовий дослід на чорноземі вилугуваному); польових камер; газохроматографії; розрахунків — для визначення питомих втрат закису азоту (γ $N-N_2O$ /кг CO_2 /га) і встановлення спрямованості процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини за порівняння з показниками «еталонного» ґрунту. Внаслідок тісно пов'язаних циклів вуглецю та азоту дія чинників на процеси деструкції свіжої органічної речовини і синтезу де пово в наземних екосистемах безпосередньо впливає не лише на процеси трансформації С у ґрунтах, але і на обмін між ґрунтом і атмосферою газоподібними сполуками, тому вирощування сільськогосподарських культур у короткочасній сівозміні (картопля → ячмінь ярий → горох → пшениця озима) у динаміці визначено інтенсивність емісії N_2O і CO_2 з ґрунту. Розраховано емісійне співвідношення газів (γ $N-N_2O/C-CO_2$ /га) та індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини ґрунту за порівняння отриманих показників зі значеннями перелогу, розміщеному поряд із дослідом. За системного використання мінеральних добрив відмічено домінування мінералізаційних процесів, інтенсивність яких зростає зі збільшенням норм добрив. Під час застосування туків по фоні прямої дії та післядії соломи (5 т/га) з біомасою післязривного люпинового сидерату ((~2,6 т/га сухої надземної маси + 2,8 т/га коренів) напрям досліджуваних процесів змінювався. За внесення невисоких норм мінеральних добрив по фоні органічних у ґрунті переважали синтетичні процеси, за середніх норм — процеси мінералізації та синтезу органічної речовини врівноважувалися. Внесення високих норм мінеральних добрив по фоні соломи й сидерату хоча й покращувало екологічну ситуацію порівняно з показниками, отриманими за застосування туків у чистому вигляді, проте не забезпечувало оптимальних показників (у ґрунті домінували мінералізаційні процеси). Отже, для забезпечення домінування синтетичних процесів у чорноземі вилугуваному незасвоєну рослинами частку мінеральних азотних добрив потрібно метаболічно трансформувати в органічні сполуки за внесення до ґрунту екзогенних джерел вуглецю. Визначення питомих втрат азоту (γ $N-N_2O$ /кг $C-CO_2$) і розрахунок коефіцієнтів мінералізації↔синтезу органічної ґрунтової речовини у практиці моніторингових досліджень стану ґрунтів агроценозів може бути перспективним для отримання оперативної інформації і прийняття необхідних управлінських рішень.

Ключові слова: емісія N_2O і CO_2 , ґрунтова органічна речовина, мінеральний азот, солома, сидерати.

ВСТУП

Проблема органічної речовини ґрунту є однією з ключових на шляху вирішення завдань стабілізації і відтворення ґрунтової родючості. Як регулятор потоків біогеохімічних циклів вуглецю, азоту та інших біогенних елементів, органічна речовина ґрунту (ОРГ) визнається одним із основних чинників сприятливого впливу на ріст рослин, підтримання рівня рН та структури в ґрунтах [1]. Навіть незначне збільшення вмісту ОРГ може мати непропорційно великий і сприятливий вплив на фізичні та біологічні властивості ґрунту [2].

Сьогодні також стає зрозумілим, що втрати ОРГ призводять не лише до негативних змін у живленні рослин і низці ґрунтових процесів, що зумовлює погіршення фізико-хімічних та біологічних характеристик ґрунтів, але й до значних біосферних негараздів, передусім пов'язаних із надходженням в атмосферу парникових газів. Ґрунти є потужним джерелом CO_2 , N_2O та CH_4 [3], вони містять приблизно втричі більше вуглецю, ніж атмосфера [4], тому інтенсивна мінералізація ОРГ може зумовити істотні зміни у планетарному масштабі. Саме внаслідок цього сьогодні проявляється величезна зацікавленість як науковців, так і суспільства та регуляторних органів низки країн до проблеми секвестрації вуглецю в ґрунті.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Як відомо, у ґрунтах природних екосистем кількість і склад органічної речовини визначаються довгостроковим балансом між рослинними надходженнями С, зв'язаного з атмосфери, і втратами його в результаті мікробного розкладання, а також унаслідок ерозії та вимивання [5]. Як правило, у природних фітоценозах ці процеси врівноважені. У сільськогосподарських екосистемах цього досягти не вдається, оскільки в них здійснюються різноманітні операції з управління ґрунтами. Це і вибір культурних рослин, які характеризуються різною кількістю і складом ексудатів та решток, і різні типи сівозмін (або

ж повна їх відсутність); це інтенсивність експорту рослин; випас худоби, скошування луків; додавання екзогенної органічної речовини, зрошення, удобрення, обробіток ґрунту і ін. Зазначені процедури можуть контролювати як просторово-часовий розподіл вхідних органічних речовин до ґрунту, так і чутливість їх до мінералізації, що загалом впливає на запаси ОРГ [6]. До того ж особливості її трансформації залежать від типу ґрунтів, ступеня їх насиченості органічною речовиною, материнської породи тощо [7]. Відповідно, щодо цього спостерігається ситуація високого ступеня невизначеності. У наукових колах також не існує узагальненої точки зору на дію різних чинників на процеси трансформації органічної речовини у ґрунтах.

Слід зазначити, що вимірювання відмінностей у вмісті ОРГ у ґрунті з достатньою точністю для визначення статистичної значущості впливу того чи іншого чинника на секвестрацію вуглецю є доволі складним завданням як через просторову відмінність, так і через відносно високий фон органічної речовини, на тлі якого відбуваються зміни [8], тому у більшості випадків можна зробити лише наближені до реальних сценаріїв висновки. Крім того, істотним недоліком більшості з існуючих методів виявлення змін у вмісті ОРГ є те, що вони відображають поступові або довгострокові зміни за впливу досліджуваних чинників, а не швидкі реакції ґрунтової системи [9].

Найчастіше під час встановлення змін у спрямованості процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті використовують класичні методи розрахунків балансу ОРГ [10], визначення ступеня лабільності органічної речовини [11], співвідношення гумінових кислот до фульвокислот [12]. Однак для надійних висновків щодо змін у вмісті ОРГ за використання зазначених методів потребуються дослідження протягом багатьох років. Точність розрахунків балансу ОРГ також є недосконалою, оскільки доволі складно визначити обсяг і якість надходження вуглецю з кореневими рештками. Крім того, практично повністю виключається

врахування такого джерела С як кореневі виділення та кореневий опад, а ця стаття вуглецевого балансу є доволі потужною [13] і має враховуватись у розрахунках.

У той самий час, встановлення спрямованості процесів трансформації органічної речовини у ґрунті (домінування деструктивних чи синтетичних процесів) для оперативної оцінки перспектив впливу окремих чинників на трансформацію органічної речовини та прийняття відповідних управлінських рішень, є вкрай необхідним. До того ж важливим може бути виявлення активності ключових біологічних процесів, що характеризують спрямованість реакцій мінералізації↔синтезу органічної речовини. Такими процесами є емісія N_2O та CO_2 . Як відомо, завдяки тісно пов'язаним циклам вуглецю та азоту, чинники впливу на процеси деструкції свіжої органічної речовини і синтезу *de novo* в наземних екосистемах безпосередньо впливають не лише на процеси трансформації С у ґрунтах, але й на обмін між ґрунтом і атмосферою газоподібними азотними сполуками [14; 15]. Орієнтуючись на це, ми запропонували визначити інтенсивність емісії N_2O та CO_2 залежно від дії досліджуваних чинників для оцінки перспектив впливу технологічних чинників на спрямованість процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини [16; 17]. Базуючись на газохроматографічному визначенні інтенсивності емісії N_2O і CO_2 , розрахунках емісійного співвідношення ($г\ N-N_2O/кг\ C-CO_2$) та порівнянні з показниками природного фітоценозу (переліг, цілина) як своєрідного «еталону», в якому біологічні процеси є врівноваженими, ми запропонували розраховувати індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини. Втім інтенсивність відхилення показників у той чи інший бік від значень «еталонного» ґрунту рекомендовано як діагностичний екологічний маркер на пряму процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунтах агроценозів [16; 17].

Метою наших досліджень, результатів яких відображено у статті, було визначення впливу окремих систем удобрення

сільськогосподарських культур на процеси мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунті за використання нового методу.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили в 2021 р. у польовому стаціонарному досліді Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН на чорноземі вилугуваному в умовах короткоротаційної сівозміни (картопля → ячмінь ярий → горох → пшениця озима). Дослід розпочато в 2009 р. За час існування досліду відбулося три ротації сівозміни. Вихідна (перед закладанням досліду) агрохімічна характеристика ґрунту: $pH_{\text{сол.}}$ — 5,3; вміст гумусу — 3,03%; азоту, що легко гідролізується — 95 мг/кг ґрунту; рухомих сполук фосфору (P_2O_5) — 150 мг/кг ґрунту (за Кирсановим); вміст обмінного калію (K_2O) (за Кирсановим) — 108 мг/кг ґрунту.

Погодні умови. Клімат у регіоні помірно континентальний. Атмосферних опадів випало 509 мм за рік із найвищими показниками у травні та липні. Середньодобові температури впродовж вегетаційного періоду були такі: квітень — +10°C; травень — +15°C; червень — +19°C; липень — +21°C; серпень — +22°C; вересень — +15°C.

Дизайн польового досліді. Сільськогосподарські культури (картопля сорту Беллароза, ячмінь ярий сорту Носівський, горох сорту Готівський і пшениця озима сорту Сонечко) вирощували за різних систем удобрення (табл. 1).

Дослід проводиться за повністю рендомізованою схемою з чотирма повтореннями та площею кожної дослідної ділянки 43,2 м². Дослід організовано у просторі й часі.

Свіжу органічну речовину щороку, починаючи з 2009 р., вносили під картоплю. У відповідних варіантах подрібнену солому (співвідношення $C/N = 76,9$) у кількості 5 т/га заробляли у ґрунт відразу після збирання врожаю пшениці озимої (наприкінці липня) шляхом дискування, після чого (у відповідних варіантах) висівали на

Таблиця 1. Системи удобрення сільськогосподарських культур у сівозміні

Удобрення культур			
картопля	ячмінь ярий	горох	пшениця озима
Без добрив	Без добрив	Без добрив	Без добрив
Солома, 5 т/га	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Проміжний сидерат (люпин вузьколистий)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Солома + сидерат	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀ + солома + сидерат	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + <i>a</i>	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + <i>b</i>	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + <i>c</i>
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + солома + сидерат	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + <i>a</i>	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + <i>b</i>	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + <i>c</i>
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + солома + сидерат	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + <i>a</i>	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + <i>b</i>	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + <i>c</i>

Примітки: *a* — першого року післядія екзогенної органічної речовини; *b* — другого року післядія екзогенної органічної речовини; *c* — третього року післядія екзогенної органічної речовини.

проміжний сидерат люпин вузьколистий. Сидеральну масу люпину із співвідношенням C/N~16,2 (~2,6 т/га сухої надземної маси + 2,8 т/га сухих коренів) заробляли у ґрунт шляхом дискування з наступною неглибокою оранкою (15 см) пізно восени (кінець листопада).

Мінеральні добрива у відповідних варіантах щороку застосовували у вигляді аміачної селітри (д. р. 34,5%), суперфосфату простого гранульованого (д. р. 19,5%) та калію хлористого (д. р. 60%), під картоплю — калію сірчаноокислого (д. р. 56%). Фосфорні та калійні добрива вносили під основний обробіток, азотні — в передпосівну культивування та підживлення.

Тому, за вирощування картоплі у ґрунті визначали пряму дію на досліджувані процеси як органічних, так і мінеральних добрив; ячменю — першого року післядію органічних добрив і прямий вплив мінеральних; гороху — другого року післядію органічних і пряму дію мінеральних; пшениці озимої — третього року післядію органічних і пряму дію мінеральних добрив.

Оскільки вищезазначені системи удобрення у досліді застосовували впродовж 12 років (з 2009 по 2021 рр.), вважали, що біологічні процеси у ґрунті набули характерних кожному виду удобрення ознак.

Умови проведення аналізів. У динаміці за використання газохроматографічних методів у чотирикратній повторності визначали інтенсивність емісії N₂O і CO₂ з ґрунту залежно від агрофонів. Для оцінки емісії закису азоту та вуглекислого газу в системі ґрунт — рослина застосовували метод закритих камер [18]. Використовували циліндричні камери діаметром 0,3 м та заввишки 0,35 м. Камери встановлювали в ґрунті на глибині 5 см. Навколо камер робили водяну пробку для кращої ізоляції системи та запобігання втратам газів, що накопичувалися в камерах. Всередину камер поміщали чашки з водою, до яких перед експозицією додавали 20 г карбіду кальцію (реакція карбіду кальцію з водою призводить до утворення ацетилену, який інгібує фермент редуктазу оксиду азоту та зупиняє процес дисиміляції NO₃⁻ і NO₂⁻ на стадії відновлення оксиду азоту [19], що дає можливість виміряти N₂O, утворений у ході процесів нітрифікації і денітрифікації). Площа використаних для досліджень камер допомагає одночасно враховувати емісію газів із ґрунту без рослин та з ризосферного ґрунту. Перед установкою камер рослини зрізали на рівні поверхні ґрунту.

Дослідження проводили у чотириразовій повторності. Період експозиції з аце-

тиленом становив 3 год. Після експозиції проби газу відбирали з камер за допомогою шприців, поміщали у медичні вакуумовані флакони з гумовими мембранами та доставляли в лабораторію. Кількість N_2O у пробах визначали на газовому хроматографі «Цвет-500М» з детектором електронного захвату. Сорбційні колонки зі сталі завдовжки 3 м заповнювали сорбентом Poropak Q 60–80 mesh. Температура колонок $40^\circ C$, температура випарювача — $120^\circ C$, детектора — $330^\circ C$. Витрати газу-носія (аргон з метаном 95/5) — $35 \text{ см}^3/\text{хв}$.

Вміст CO_2 у газових пробах виявляли на газовому хроматографі «Цвет-500М» з детектором теплопровідності (струм мосту 130 mA). Сорбційні колонки зі сталі заповнювали сорбентом Poropak Q 60–80 mesh. Температура колонок $25^\circ C$ і детектора $40^\circ C$. Витрати газу — носія (гелію) — $20 \text{ см}^3/\text{хв}$.

Емісію N_2O оцінювали за формулою:

$$(E \times V_1) / (V_2 \times S \times t), \quad (1)$$

де E — кількість закису азоту в аналізованому зразку, нмоль N_2O ; V_1 — об'єм камери, см^3 ; V_2 — об'єм зразка, що вводиться в хроматограф, см^3 ; S — площа поперечного сечення камери, м^2 ; t — час експозиції.

Для визначення емісії CO_2 використовували ту саму формулу, але E оцінювали як кількість вуглекислого газу в аналізованому зразку, нмоль.

Втрати азоту та вуглецю, спричинені викидами досліджуваних газів, були оцінені на гектарі за добу, враховуючи молекулярну масу N_2O та CO_2 , час експозиції камер у полі й площу камер.

Отримані показники порівнювали зі значеннями «еталонного» ґрунту. Відносним еталоном слугувала ділянка перелогу (з 2009 р.), площею $0,75 \text{ га}$, розміщена поряд із стаціонарним дослідом. Відповідно до запропонованої методики розраховували індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини (I_{MC}) як відношення модуля різниці емісійного співвідношення $g \text{ N-N}_2O/\text{кг C-CO}_2$ ґрунту «еталонної» ділянки і ґрунту агроценозу до показника емісійного співвідношення $g \text{ N-N}_2O/\text{кг C-CO}_2$ «еталонної» ділянки:

$$I_{MC} = (E_{\text{ед.}} - E_{\text{агро}}) / E_{\text{ед.}} \quad (2)$$

де I_{MC} — індекс мінералізації↔синтезу; $E_{\text{ед.}}$ — емісійне співвідношення $g \text{ N-N}_2O/\text{кг C-CO}_2$ «еталонної» ділянки; $E_{\text{агро}}$ — емісійне співвідношення $g \text{ N-N}_2O/\text{кг C-CO}_2$ в агроценозі.

Згідно з методикою, за інтенсивних мінералізаційних процесів у ґрунті показники I_{MC} мають від'ємні значення. Наближення значень індексу до «0» (показник «еталонного» ґрунту) трактується як стан врівноваженості досліджуваних процесів. Коли отримані результати мають знак «+», це свідчить про домінування іммобілізаційних (синтетичних) процесів у ґрунті [16; 17].

Статистичні аналізи. Різницю в показниках емісії N_2O і CO_2 між варіантами оцінювали за використання ANOVA. Значення ймовірності $\leq 0,05$ використовували для встановлення статистично значимих відмінностей (Statistica 6.0, StatSoft Inc., США).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Спрямованість процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунті під картоплею залежно від удобрення. Як відомо, закис азоту утворюється в результаті мікробної трансформації сполук азоту в ґрунтах, і посилюється, коли доступний N перевищує потреби рослин [20]. Зважаючи на те, що цикли вуглецю і азоту тісно пов'язані між собою, співвідношення емісійних втрат $N-N_2O$ і $C-CO_2$ з ґрунту як реакція на вплив технологічних чинників за вирощування сільськогосподарських культур може значною мірою відображати особливості перебігу окремих біологічних процесів у ґрунті. Одержані нами результати підтверджують цю тезу і дозволяють оперативно визначити спрямованість процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті за різних систем удобрення культур.

Проведені у фазу сходів картоплі дослідження свідчать, що навіть у ґрунті контрольного варіанта, де з 2009 р. не застосовували добрив, розвиваються мінера-

лізаційні процеси ($I_{MC} = -0,08$), що, вірогідно, зумовлено технологічними операціями з обробітку ґрунту за вирощування сільськогосподарських культур (табл. 2).

Позитивні значення I_{MC} (+0,05) отримали за додавання до ґрунту соломи, що пояснюється розвитком іммобілізаційних процесів.

За вирощування як проміжної сидеральної культури люпину вузьколистого спостерігали переважання мінералізаційних процесів над синтетичними — I_{MC} мав значення $-0,12$.

За поєднання соломи з біомасою проміжного сидерату одержано результати, які свідчать про наближення процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини до стану врівноваження (I_{MC} дорівнює $-0,04$).

Найбільші показники питомих втрат $N-N_2O$ спостерігали за використання для удобрення картоплі мінеральних добрив. Зростали також і емісійні втрати $C-CO_2$. З підвищенням норм мінеральних добрив газоподібні втрати обох досліджуваних газів зростали, відповідно, збільшувалися і від'ємні показники I_{MC} (від $-0,55$ у варіанті з внесенням $N_{40}P_{40}K_{40}$ до $-0,69$ за використання $N_{120}P_{120}K_{120}$), що вказує на інтенсивний розвиток у ґрунті мінералізаційних процесів. У той самий час, за внесення мінеральних добрив по фону «солома + сидерат» ситуація істотно змінювалася. Так, зокрема, у варіанті « $N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат» домінували іммобілізаційні процеси, про що вказує показник I_{MC} зі знаком «+». За внесення $N_{80}P_{80}K_{80}$ по фону соломи з сидератом процеси мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті практично врівноважувалися — I_{MC} дорівнював $-0,03$. І лише за застосування найбільшої в досліді норми туків ($N_{120}P_{120}K_{120}$) по органічному фону ситуація хоча й покращувалася — I_{MC} зменшувався з позначки $-0,69$ до $-0,21$, проте не досягала оптимальних значень, що свідчить про надмірність цієї норми добрив за даних умов.

Зростання питомих втрат $N-N_2O$ у міру збільшення норм мінеральних добрив

можна було б пояснити мікробіологічною трансформацією незасвоєної рослинами частки мінерального азоту, але також зростала й емісія CO_2 (див. варіанти з системним застосуванням лише мінеральних добрив), що може свідчити про деструктивний вплив мінерального азоту на органічну речовину ґрунту (можливо, зокрема й стабільну ОРГ за дефіциту в ґрунті свіжої органічної речовини). Втім за внесення мінеральних добрив по органічному фону, який забезпечує легкодоступний для ґрунтових мікроорганізмів вуглець, надлишок мінеральних сполук азоту (незасвоєна рослинами частка добрива) метаболічно зв'язується (іммобілізується), відповідно, зменшується емісія N_2O .

У другий строк проведення досліджень в агроценозах картоплі (фаза цвітіння) отримано схожі результати. Подібні результати одержано також і наприкінці вегетаційного періоду картоплі (див. табл. 2).

Інтенсивність процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у ґрунті агроценозів ячменю ярого залежно від удобрення. Під час виконання досліджень в агроценозах наступної в сівозміні культури — ячменю ярого, де спостерігалася першого року післядія органічних добрив і прямий вплив мінеральних добрив на ґрунтові процеси та продукційний процес культури, у фазу сходів відмічено превалювання синтетичних процесів у ґрунті варіанта з соломою (показник I_{MC} зі знаком «+»). У варіанті першого року післядії люпинового сидерату показники I_{MC} вже не були настільки негативними, як це було відмічено в перший рік застосування зеленого добрива. Процеси мінералізації↔синтезу органічної речовини впродовж вегетаційного періоду наближалися до стану врівноваження (табл. 3).

Домінування синтетичних процесів у ґрунті під ячменем спостерігали за внесення невисоких та середніх у досліді норм мінеральних добрив по фону першого року післядії соломи з сидератом — I_{MC} , відповідно, $+0,14$ і $+0,03$ (див. табл. 3).

Поєднання найвищої за вирощування ячменю норми туків $N_{90}P_{90}K_{90}$ з післядією

Таблиця 2. Емісія N_2O і CO_2 , емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$ та індекси мінералізації $\leftrightarrow$ синтезу органічної речовини в агроценозах картоплі залежно від удобрення культури

Варіанти досліду	Фаза сходів				Фаза цвітіння				Фаза відмирання бадилля			
	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}
Без добрив, контроль	104,4	66,5	1,57	-0,08	97,5	49,5	1,97	-0,23	69,0	42,9	1,61	-0,29
Солома	111,2	80,6	1,38	+0,05	92,0	63,5	1,45	+0,09	73,2	57,5	1,27	-0,01
Сидерат	155,0	95,0	1,63	-0,12	130,5	66,9	1,95	-0,22	125,3	80,1	1,56	-0,25
Солома + сидерат	148,2	98,8	1,50	-0,04	127,0	73,8	1,72	-0,08	130,0	90,7	1,43	-0,14
$N_{40}P_{40}K_{40}$	180,2	80,4	2,24	-0,55	192,8	75,0	2,57	-0,61	125,0	62,0	2,02	-0,62
$N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат	165,0	116,2	1,42	+0,02	170,0	11,3	1,50	+0,06	116,5	89,6	1,30	-0,04
$N_{80}P_{80}K_{80}$	210,4	90,7	2,32	-0,60	203,5	77,4	2,63	-0,64	155,1	72,8	2,13	-0,70
$N_{80}P_{80}K_{80}$ + солома + сидерат	180,0	120,0	1,50	-0,03	182,1	111,0	1,64	-0,03	143,6	106,4	1,35	-0,08
$N_{120}P_{120}K_{120}$	235,0	95,9	2,45	-0,69	221,5	80,5	2,75	-0,72	182,0	82,4	2,20	-0,76
$N_{120}P_{120}K_{120}$ + солома + сидерат	210,0	120,0	1,75	-0,21	201,0	89,7	2,24	-0,40	180,1	100,6	1,79	-0,43
Переліг	32,6	22,5	1,45	0	35,0	21,9	1,60	0	20,6	16,5	1,25	0
HP_{05}	11,2	8,5	—	—	9,5	6,7	—	—	8,0	5,4	—	—

Таблиця 3. Емісія N_2O і CO_2 , емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$ та індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті під ячменем залежно від удобрення культури

Варіанти досліду	Фаза сходів				Фаза виходу в трубку				Фаза молочно-воскової стиглості			
	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}
Без добрив, контроль	70,0	53,2	1,32	-0,07	67,0	37,2	1,80	-0,22	71,8	30,3	2,54	-0,25
Солома ^a	73,9	65,0	1,13	+0,08	61,3	45,0	1,36	+0,08	73,5	41,6	1,77	+0,13
Сидерат ^a	79,5	63,1	1,25	-0,02	85,2	55,7	1,52	-0,03	83,3	38,1	2,18	-0,06
Солома ^a + сидерат ^a	105,0	76,5	1,37	-0,11	105,3	73,5	1,43	+0,02	102,7	46,0	2,23	-0,09
$N_{30}P_{30}K_{30}$	115,6	80,0	1,45	-0,18	112,5	60,3	1,86	-0,26	98,8	37,2	2,65	-0,30
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома ^a + сидерат ^a	112,0	106,5	1,05	+0,14	110,0	85,6	1,29	+0,12	91,9	62,8	1,46	+0,28
$N_{60}P_{60}K_{60}$	147,9	95,4	1,55	-0,26	152,8	72,7	2,10	-0,43	126,9	42,0	3,02	-0,48
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома ^a + сидерат ^a	135,6	114,1	1,19	+0,03	140,0	90,2	1,55	-0,05	113,4	54,8	2,07	-0,01
$N_{90}P_{90}K_{90}$	202,0	107,7	1,88	-0,52	196,0	86,9	2,25	-0,53	168,1	45,2	3,71	-0,81
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома ^a + сидерат ^a	175,5	117,5	1,49	-0,21	180,5	95,4	1,89	-0,29	150,5	53,1	2,83	-0,38
Переліг	18,5	15,0	1,23	0	23,5	16,0	1,47	0	23,5	11,5	2,04	0
НІР ₀₅	9,5	7,2	—	—	10,7	6,4	—	—	8,8	5,2	—	—

органічного фону хоча й покращило спрямованість досліджуваних процесів (показник I_{MC} зменшувався з $-0,52$ до $-0,21$), проте не допомогло повністю вирішити проблему.

У фазі виходу в трубку спостерігали схожу, з незначними відхиленнями показників, ситуацію (див. *табл. 3*). У фазі молочно-воскової стиглості ячменю загалом відмічали схожі до вищеописаних особливості перебігу досліджуваних процесів. Так, зокрема, переважання синтетичних процесів (I_{MC} зі знаком «+») спостерігали у ґрунті варіантів з післядією соломи, за післядії соломи з сидератом, за внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ по фону післядії органічних добрив, а також наближення значень до показників перелогу у ґрунті варіанта « $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат» ($I_{MC} = -0,01$).

Спрямованість біологічних процесів у ґрунті під горохом залежно від агрофону. Проведення досліджень в агроценозах гороху демонструє домінування синтетичних процесів у ґрунті за другого року післядії соломи, другого року післядії сидерату та їх поєднання (I_{MC} відповідно: $+0,06$, $+0,04$ і $+0,05$) (*табл. 4*).

Під час застосування лише мінеральних добрив спостерігали розвиток мінералізаційних процесів. Ситуація істотно покращувалася за внесення мінеральних добрив по фону другого року післядії соломи і сидеральної маси. Так, якщо I_{MC} за внесення до ґрунту $N_{30}P_{30}K_{30}$ становив $-0,49$, то за використання цієї норми добрив по фону другого року післядії органічної речовини процеси мінералізації ↔ синтезу в ґрунті оптимізувалися (показник I_{MC} становив $+0,01$).

За внесення середньої в досліді норми туків — $N_{60}P_{60}K_{60}$ I_{MC} зростав до $-0,57$, проте за застосування цієї самої норми мінеральних добрив по фону післядії соломи з сидератом він знижувався до $-0,11$. За використання найбільшої в досліді норми добрив показник I_{MC} сягав $-0,99$ і дещо зменшувався за внесення туків по фону післядії органічної речовини — до $-0,71$. Зважаючи, що за цієї норми туків може

знижитись і продуктивність симбіотичної азотфіксації, її екологічна недоцільність не викликає сумніву. На нашу думку, таку кількість добрив, зокрема, мінерального азоту, потенційно можна трансформувати в доцільну лише за поповнення ґрунту додатковою свіжою органічною речовиною з широким співвідношенням C/N, що може забезпечити трансформацію реактивного азоту в ґрунті в органічні сполуки.

Проведення досліджень у фазі цвітіння гороху демонструє схожі з вищеописаними залежності, хоча абсолютні показники й відрізнялися (див. *табл. 4*).

Дослідження, виконані в агроценозах гороху у фазі утворення бобів, загалом підтвердили відмічені вище спостереження. За другого року післядії соломи, люпинового сидерату і їх поєднання у ґрунті переважали синтетичні процеси — результати свідчать, що за цих умов ситуація була навіть кращою за стан процесів у ґрунті перелогу.

Спостерігали врівноваження процесів мінералізації ↔ синтезу в ґрунті за внесення найменшої норми мінеральних добрив по фону другого року післядії екзогенної органічної речовини ($I_{MC} = 0$) і деяке превалювання процесів мінералізації у варіанті « $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат» ($I_{MC} = -0,18$). За використання найвищої норми мінеральних добрив ($N_{90}P_{90}K_{90}$) відмічали інтенсивний розвиток мінералізаційних процесів — I_{MC} дорівнював $-0,75$.

Застосування цієї самої норми туків по фону другого року післядії соломи і сидерату зменшувало показник I_{MC} до $-0,50$.

Особливості перебігу процесів мінералізації ↔ синтезу органічної речовини у ґрунті агроценозів пшениці озимої. Під час визначення емісії досліджуваних газів із ґрунту під пшеницею загалом відмічено відносно невисокі показники (щодо значень, отриманих за вирощування попередніх у сівозміні культур), зокрема і за використання мінеральних добрив. На нашу думку, це можна пояснити інтенсивнішим розвитком рослин пшениці і формуванням більшої продуктивності культури порівняно з ячменем і горохом за однакових

Таблиця 4. Емісія N_2O і CO_2 , емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$ та індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті під горохом залежно від удобрення культури

Варіанти досліду	Фаза бутонізації				Фаза цвітіння				Фаза утворення бобів			
	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}	емісія $N-N_2O$, г/га за добу	емісія $C-CO_2$, кг/га за добу	емісійне співвідношення $N-N_2O/C-CO_2$	I_{MC}
Без добрив, контроль	60,5	31,5	1,92	-0,08	46,3	25,7	1,80	-0,06	35,7	20,0	1,79	-0,13
Солома ^b	61,3	36,6	1,67	+0,06	44,7	29,5	1,52	+0,11	34,0	25,8	1,32	+0,16
Сидерат ^b	60,0	35,1	1,71	+0,04	46,9	30,0	1,56	+0,08	36,3	23,7	1,53	+0,03
Солома ^b + сидерат ^b	72,4	42,5	1,70	+0,05	52,4	36,1	1,45	+0,15	48,4	32,5	1,49	+0,06
$N_{30}P_{30}K_{30}$	96,3	36,1	2,66	-0,49	88,7	33,8	2,62	-0,54	70,8	29,5	2,40	-0,52
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома ^b + сидерат ^b	86,9	48,9	1,77	+0,01	79,2	44,2	1,79	-0,05	61,9	39,0	1,59	0
$N_{60}P_{60}K_{60}$	118,1	42,4	2,79	-0,57	104,7	37,0	2,82	-0,66	86,4	34,4	2,51	-0,59
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома ^b + сидерат ^b	97,6	49,2	1,98	-0,11	89,3	45,8	1,95	-0,15	71,0	38,1	1,86	-0,18
$N_{90}P_{90}K_{90}$	184,2	52,1	3,54	-0,99	146,9	46,9	3,11	-0,83	108,1	39,0	2,77	-0,75
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома ^b + сидерат ^b	169,7	55,6	3,05	-0,71	132,7	48,6	2,73	-0,61	100,8	42,5	2,37	-0,50
Переліг	35,5	20,0	1,78	0	31,1	18,3	1,70	0	27,5	17,4	1,58	0
НІР ₀₅	15,2	7,5	—	—	13,9	8,5	—	—	9,0	7,3	—	—

умов вирощування. За більших рівнів урожайності використовується більша кількість поживних речовин, зокрема й азоту з добрив, відповідно у ґрунті залишається менша кількість реактивного азоту, що неодмінно має позначитися на інтенсивності емісії N_2O і CO_2 .

За третього року післядії соломи й сидерату затухає їх вплив на досліджувані процеси. У весняну фазу кущення пшениці озимої у жодному з варіантів нами не відмічено показників I_{MC} зі знаком «+» (табл. 5). Однак різниця між варіантами простежується. Так, за третього року післядії соломи, люпинового сидерату та їх поєднання показники I_{MC} наближались до «0», що свідчить про екологічне благополуччя у ґрунті цих варіантів. І навпаки, за використання мінеральних добрив від'ємні значення I_{MC} були одними з найбільших у досліді, до того ж зі збільшенням норм туків вони зростали (від $-0,57$ за внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ до $-0,67$ за внесення $N_{60}P_{60}K_{60}$ і до $-0,84$ за застосування $N_{90}P_{90}K_{90}$). Водночас, за внесення мінеральних добрив по фоні третього року післядії соломи і люпинового сидерату інтенсивність мінералізаційних процесів у ґрунті дещо зменшувалася. Схожі залежності, хоча і з різними абсолютними значеннями спостерігали також і у наступній фазі органогенезу пшениці озимої (див. табл. 5).

Слід відмітити, що серед чинників впливу на процеси трансформації органічної речовини у ґрунтах агроценозів чи не найбільш дискусійним є такий агроприйом, як застосування мінеральних добрив, і особливо азотних.

Мінеральний азот є одним із найпотужніших важелів впливу на формування врожайності сільськогосподарських культур. У той самий час, невисокі ступені засвоєння культурними рослинами діючої речовини з синтетичних азотних добрив — у межах 35–50% [21], призводять до того, що невикористана рослинами частина мінерального азоту може негативно впливати на стан довкілля. Це і забруднення ґрунтових вод та водоймищ нітратами, це також і емісія закису азоту. Окремі дослідження

свідчать, що внесення підвищених норм азотних добрив призводить також і до інтенсивної деструкції стабільної ОРГ [22; 23]. Однак, негативний вплив тривалого використання синтетичних азотних добрив на стабільну ОРГ, останнім часом, ставиться під сумнів. Так, на думку Poffenbarger et al. [24], мінеральний азот забезпечує збільшення запасів органічної речовини в ґрунті внаслідок впливу на зростання рослинної біомаси, особливо за застосування агрономічно оптимальних його норм. Низка дослідників також вважають, що синтетичне азотне добриво може зменшувати мінералізацію ОРГ [25; 26].

На нашу думку, спрямованість та інтенсивність процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті за впливу мінерального азоту залежить від конкретної екосистеми (передусім від рівня азотного удобрення; крім того, важливими чинниками можуть бути тип ґрунту, рівень його насичення органічним С, вид сільськогосподарської культури, історія поля і ін.). У зв'язку з цим доцільно згадати дослідження, що фіксують про необхідність оптимізації стехіометричного співвідношення реактивного азоту і доступного для мікроорганізмів вуглецю в ґрунті для досягнення бажаної секвестрації С [27; 28]. Це опосередковано підтверджується результатами нашого досліді. Попередній висновок щодо цього такий: застосування кожної норми мінерального азоту слід супроводжувати стехіометрично відповідною кількістю доступного для мікроорганізмів вуглецю. У нашому дослідженні на чорноземі вилугуваному для оптимізації ситуації за внесення середніх норм мінерального азоту (до 60–80 кг залежно від культури) достатньо вносити 5 т/га соломи по фоні проміжного люпинового сидерату.

Щоб оптимізувати біологічні процеси в ґрунті за підвищених норм азотних добрив цієї кількості свіжої органічної речовини недостатньо. Тому для врівноваження процесів мінералізації↔синтезу в ґрунті в цьому випадку можна або збільшити кількість пшеничної соломи, або додатково застосувати соломі ячменю ярого, який

Таблиця 5. Емісія N₂O і CO₂, емісійне співвідношення N–N₂O/C–CO₂ та індекси мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті під пшеницею озимою залежно від удобрення культури

Варіанти досліду	Фаза кущення				Фаза виходу в трубку				Фаза молочно-воскової стиглості			
	емісія N–N ₂ O, г/га за добу	емісія C–CO ₂ , кг/га за добу	емісійне співвідношення г N–N ₂ O / кг C–CO ₂	I _{MC}	емісія N–N ₂ O, г/га за добу	емісія C–CO ₂ , кг/га за добу	емісійне співвідношення г N–N ₂ O / кг C–CO ₂	I _{MC}	емісія N–N ₂ O, г/га за добу	емісія C–CO ₂ , кг/га за добу	емісійне співвідношення г N–N ₂ O / кг C–CO ₂	I _{MC}
Без добрив, контроль	41,5	22,4	1,86	–0,22	32,5	19,6	1,65	–0,13	28,1	16,6	1,69	–0,13
Солома ^c	43,2	26,3	1,64	–0,08	33,1	20,9	1,58	–0,08	27,4	17,9	1,53	–0,02
Сидерат ^c	42,0	26,9	1,56	–0,03	32,1	20,8	1,54	–0,05	28,6	18,6	1,53	–0,02
Солома ^c + сидерат ^c	46,3	28,6	1,62	–0,07	35,3	24,1	1,46	0	28,2	18,1	1,56	–0,04
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	66,5	28,0	2,38	–0,57	48,4	24,4	1,98	–0,36	40,8	21,5	1,90	–0,27
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + солома ^c + сидерат ^c	64,5	40,5	1,59	–0,05	43,5	27,5	1,58	–0,08	36,5	22,8	1,60	–0,07
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	89,7	35,4	2,53	–0,67	60,5	27,8	2,17	–0,49	55,7	23,2	2,40	–0,60
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + солома ^c + сидерат ^c	85,5	38,7	2,20	–0,45	55,3	32,3	1,71	–0,17	43,5	25,6	1,69	–0,13
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	105,5	39,7	2,65	–0,74	85,8	30,6	2,80	–0,91	69,4	27,6	2,51	–0,67
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + солома ^c + сидерат ^c	98,7	41,1	2,40	–0,58	73,4	33,8	2,17	–0,49	55,2	28,5	1,93	–0,29
Переліг	18,8	12,4	1,52	0	17,5	12,0	1,46	0	20,3	13,5	1,50	0
НІР ₀₅	8,7	5,5	—	—	9,8	4,2	—	—	7,0	4,5	—	—

вищується в сівозміні. Безперечно, кількість доступного вуглецю для кожного конкретного випадку потрібно або визначати емпірично, проводячи дослід, або шляхом моделювання. Крім того, запропоновані методичні підходи можуть бути корисними, оскільки їх застосування допомагає оперативно оцінювати ситуацію.

Слід відмітити, що використані у досліді органічні добрива демонструють доволі пролонгований вплив на біологічні процеси у ґрунті. Так, внесення в ґрунт 5 т/га соломи сприяло розвитку іммобілізаційних процесів упродовж трьох років — I_{MC} за вирощування картоплі, ячменю і гороху були позитивними, і лише за третього року післядії соломи, під час вирощування пшениці озимої спостерігали затухання синтетичних процесів у цьому варіанті.

За планування досліджень ми очікували, що сидеральна біомаса буде досить швидко мінералізованою і не характеризуватиметься тривалою післядією. Втім отримані результати свідчать про досить пролонговану післядію проміжного сидерату на синтетичні процеси. Можливо цьому сприяють кореневі рештки люпину вузьколистого. Так, відомо, що внесок коренів до загального вмісту стабільної ОРГ набагато вищий, ніж надземних решток рослин [29].

Урожайність сільськогосподарських культур залежно від систем удобрення. Облік урожайності сільськогосподарських культур у досліді демонструє залежність показників від чинників удобрення.

Плануючи в досліді внесення до ґрунту соломи, ми очікували на зменшення врожайності культур, зважаючи на відоме ще з початку ХХ ст. явище тимчасового дефіциту мінеральних сполук азоту для рослин за застосування соломи внаслідок конкуренції з ґрунтовими мікроорганізмами і необхідність додавання компенсаторної дози мінерального азоту. Тим не менше, у досліді ми відмітили тенденцію до зростання врожайності культур за їх вирощування по фоні дії та післядії соломи без додаткового надходження мінерального азоту до ґрунту. Оскільки дослід розпочато в 2009 р.,

ми пояснюємо такий ефект досягненням стабілізації окремих біологічних процесів у ґрунті за цей час і відсутністю за цих умов конкуренції за азот між рослинами і мікроорганізмами.

За використання проміжного сидерату спостерігали достовірне збільшення врожайності картоплі (на 25,1%) і тенденцію до зростання показників за вирощування наступних у сівозміні культур (табл. 6).

Достовірний приріст урожайності картоплі (на 16,8%), ячменю (на 16,6) і гороху (на 23,9%) забезпечило поєднання соломи з сидератом. Для пшениці післядії соломи і сидерату сприяла лише незначному зростанню врожайності.

Застосування мінеральних добрив у технологіях вирощування сільськогосподарських культур забезпечувало істотне підвищення їх урожайності, до того ж приріст посилювався зі збільшенням норм туків. За поєднання мінеральних добрив з соломою і сидератом відмічали чітку тенденцію до зростання урожайності, а в окремих варіантах і достовірні прирости врожаю порівняно з показниками варіантів, де використовували туки у чистому вигляді (див. табл. 6). Отже, таке поєднання є позитивним не лише в екологічному відношенні.

Тому, одержані результати свідчать, що запропоновані методичні рішення допомагають оперативно визначати інтенсивність емісії N_2O і CO_2 з ґрунту і за розрахунками питомих втрат азоту у вигляді закису цього елементу ($N-N_2O$ на одиницю втраченого з ґрунту $C-CO_2$) та індексів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті спостерігати зміни, зумовлені системами удобрення сільськогосподарських культур. Метод може бути корисним для експрес-визначення впливу різних технологічних чинників на спрямованість процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини в ґрунті і прийняття оперативних управлінських рішень.

Висока чутливість газохроматографічного визначення активності емісії N_2O і CO_2 , можливість використання достатньої кількості експозиційних камер для ніве-

Таблиця 6. Урожайність сільськогосподарських культур залежно від систем удобрення

Системи удобрення	Картопля		Ячмінь ярий		Горох		Пшениця озима	
	урожай- ність, т/га	приріст до конт- ролю, %	урожай- ність, т/га	приріст до конт- ролю, %	урожай- ність, т/га	приріст до конт- ролю, %	урожай- ність, т/га	приріст до конт- ролю, %
Без добрив, контроль	17,96	—	2,23	—	2,18	—	3,22	—
Солома	19,22	7,0	2,42	8,5	2,30	5,5	3,31	2,8
Сидерат	22,47	25,1	2,54	13,9	2,37	8,7	3,43	6,5
Солома + сидерат	20,97	16,8	2,60	16,6	2,70	23,9	3,41	5,9
Мінеральна невисока	23,25	29,5	3,12	39,9	3,08	41,3	4,42	37,3
Мінеральна невисока + солома + сидерат	24,48	36,3	3,41	52,9	3,38	55,0	4,65	44,4
Мінеральна середня	36,35	102,4	3,88	74,0	3,60	65,1	5,27	63,7
Мінеральна середня + солома + сидерат	38,46	114,1	4,16	86,5	3,95	81,2	5,43	68,6
Мінеральна інтенсивна	41,12	128,9	4,34	94,6	4,13	89,5	5,49	70,5
Мінеральна інтенсивна + солома + сидерат	42,42	136,2	4,45	99,6	4,55	108,7	5,66	75,8
НІР ₀₅	1,85	—	0,33	—	0,25	—	0,37	—

лювання ефекту просторових ґрунтових відмінностей, дають можливість із високою точністю спостерігати зміни у напрямі біологічних процесів у ґрунті.

ВИСНОВКИ

Пряма дія та післядія екзогенної органічної речовини у вигляді соломи та біомаси проміжного люпинового сидерату позитивно впливає на перебіг процесів мінералізації↔синтезу органічної речовини у чорноземі вилугуваному. Вплив соломи і сидерату на досліджувані процеси затухає в часі, проте простежується протягом

трирічного періоду. Системне застосування лише мінеральних добрив призводить до розвитку мінералізаційних процесів у чорноземі вилугуваному. Зі збільшенням їх доз деструктивні процеси в ґрунті зростають.

За внесення мінеральних добрив по фоні дії та післядії соломи і люпинового сидерату невикористана рослинами частка мінеральних сполук азоту метаболічно зв'язується (імобілізується) мікроорганізмами, відповідно зменшується негативний вплив туків на довкілля загалом і на ґрунт зокрема.

ЛІТЕРАТУРА

- Hoffland, E., Kuyper, T. W., Comans, R. N. J., & Creamer, R. E. (2020). Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant Soil.*, 455, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>.
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmі, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils. A review. *Geochemistry*, 76(3), 327–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>.
- Lal, R., Griffin, M., Apt, J., Lave, L., & Morgan, M. G. (2004). Managing soil carbon. *Science*, 304(5669), 393. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1093079>.

5. Torn, M. S., Swanston, C. W., Castanha, C., & Trumbore, S. E. (2009). Storage and turnover of organic matter in soil. In N. Senesi, B. Xing, P.M. Huang (Eds.), *Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems* (Vol. VI, pp. 219–272). DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470494950.ch6>.
6. Jastrow, J. D., Amonette, J. E., & Bailey, V. L. (2007). Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Clim Chang.*, 80, 5–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9178-3>.
7. Dignac, M. F., Derrien, D., Barré, P., Darot, S., Cecillon, L., Chenu, C., ... Basile-Doelch, I. (2017). Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 37(14). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>.
8. Poulton, P., Johnston, J., Macdonald, A., White, R., & Powlson, D. (2018). Major limitations to achieving «4 per 1000» increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Glob Change Biol.*, 24, 2563–2584. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14066>.
9. Ludwig, B., Geisseler, D., Michel, K., Joergensen, R. G., Schulz, E., Merbach, I., ... Liu, X. (2011). Effects of fertilization and soil management on crop yields and carbon stabilization in soils. A review. *Agron Sustain Dev.*, 31, 361–372. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro/2010030>.
10. Балюк, С. А., Греков, В. О., Лісовий, М. В., & Комариста, А. В. (2011). *Розрахунок балансу гумусу і поживних речовин у землеробстві України на різних рівнях управління*. Харків: КП «Міська друкарня».
11. Balaiev, A., Pikovska, O., Karabach, K., & Shemetun, K. (2023). Labile organic matter and fertility of chernozems. *Plant Soil Sci.*, 14(2), 9–20. DOI: <https://doi.org/10.31548/plant2.2023.09>.
12. Zalba, P., Amioti, N. M., Galantini, J. A., & Pistola, S. (2016). Soil Humic and Fulvic Acids from Different Land-Use Systems Evaluated By E4/E6 Ratios. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(13–14), 1675–1679. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1206558>.
13. Zhalnina, K., Louie, K. B., Hao, Z., Mansoori, N., da Rocha, U. N., Shi, S., ... Brodie, E. L. (2018). Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly. *Nature microbiology*, 3, 470–480. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41564-018-0129-3>.
14. Li, C., Frolking, S., & Butterbach-Bahl, K. (2005). Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. *Climatic Change*, 72, 321–338. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-005-6791-5>.
15. Garcia-Montiel, D., Melillo, J., Steudler, P. A., Neill, C., Feigl, B. J., & Cerri, C. C. (2002). Relationship between N₂O and CO₂ emissions from the Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*, 29(6), 141–143. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GL013830>.
16. Волкогон, В. В., Дімова, С. Б., Волкогон, К. І., Пиріг, О. В., & Британ, Т. Ю. (2019). Спосіб визначення спрямованості процесів мінералізації-синтезу органічної речовини в ґрунтах агроценозів: патент 119297 Україна. МПК G01N 33/24; Бюл. №10. Київ: Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН.
17. Volkohon, V., Pyrig, O., Volkohon, K., & Dimova, S. (2019). Methodological aspects of determining the trend of organic matter mineralization+synthesis processes in croplands. *Agricultural Science and Practice*, 6(1), 38. DOI: <https://doi.org/10.15407/agrisp6.01.003>.
18. Kusa, K., Sawamoto, T., Hu, R., & Hatano, R. (2008). Comparison of the closed-chamber and gas concentration gradient methods for measurement of CO₂ and N₂O fluxes in two upland field soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 777–785. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00292.x>.
19. Smith, M. S., Firestone, M. K., & Tiedje, J. M. (1978). The Acetylene Inhibition Method for Short-term Measurement of Soil Denitrification and its Evaluation Using Nitrogen-13. *Soil Science Society of America J.*, 42(4), 611–615. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200040015x>.
20. Oenema, O., Wrage, N., Velthof, G. L., van Groenigen, J. W., Dolfing, J., & Kuikman, P. J. (2005). Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 72, 51–65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-004-7354-2>.
21. Cameron, K. C., Di, H. J., & Moir, J. L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Ann Appl Biol.*, 162, 145–173. DOI: <https://doi.org/10.1111/aab.12014>.
22. Khan, S. A., Mulvaney, R. L., Ellsworth, T. R., & Boast, C. W. (2007). The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.*, 36, 1821–1832. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0099>.
23. Frossard, E., Buchmann, N., Bünemann, E. K., Kiba, D. I., Lompo, F., Oberson, A., ... & Traore, O. Y. A. (2016). Soil properties and not inputs control carbon, nitrogen, phosphorus ratios in cropped soils in the longterm. *Soil*, 2, 83–99. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2-83-2016>.
24. Poffenbarger, H. J., Barker, D. W., Helmers, M. J., Miguez, F. E., Olk, D. C., Sawyer, J. E., ... & Castellano, M. J. (2017). Maximum soil organic carbon storage in Midwest US cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. *PLoS ONE*, 12, article e0172293. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172293>.
25. Zang, H., Wang, J., & Kuzyakov, Y. (2016). N fertilization decreases soil organic matter decomposition in the rhizosphere. *Appl. Soil Ecol.*, 108, 47–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.021>.
26. Li, X. G., Jia, B., Lv, J., Ma, Q., Kuzyakov, Y., & Li, F. M. (2017). Nitrogen fertilization decreases

- the decomposition of soil organic matter and plant residues in planted soils. *Soil Biol. Biochem.*, 112, 47–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.018>.
27. Mooshammer, M., Wanek, W., Zechmeister-Boltenstern, S., & Richter, A. (2014). Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources. *Frontiers in Microbiology*, 5(22). DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00022>.
28. Kirkby, C., Richardson, A. E., Wade, L., Passioura, J. B., Batten, G., Blanchard, C., & Kirkegaard, J. (2014). Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils. *Soil Biol. Biochem.*, 68, 402–409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.032>.
29. Menichetti, L., Ekblad, A., & Kätterer, T. (2015). Contribution of roots and amendments to soil carbon accumulation within the soil profile in a long-term field experiment in Sweden. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.003>.

Стаття надійшла до редакції журналу 09.10.2025

ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ РУХОМИМИ ФОРМАМИ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ УНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ НА ТЕРИТОРІЇ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛ.

О.М. Грищенко¹, Р.П. Паламарчук¹, Д.С. Шляхтуров¹,
В.С. Запасний¹, Г.Д. Крупко²

¹ Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України» (м. Київ, Україна)

e-mail: grischenkoel@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1241-7183

e-mail: prp777@ukr.net; ORCID: 0000-0002-5965-1305

e-mail: dshlyahurov@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8896-3236

e-mail: pasportyzaciya@iogu.gov.ua; ORCID: 0000-0001-8547-8852

² Рівненський регіональний центр ДУ «Інститут охорони ґрунтів України»
(м. Рівне, Україна)

e-mail: krupko_gd@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1506-1258

У статті висвітлено особливості забруднення земель рухомими сполуками важких металів внаслідок бойових дій. Об'єктом досліджень слугували 19 збірних проб ґрунту, відібраних у п'яти локаціях на території Первомайської ТГ Миколаївського та Снігурівської ТГ Баштанського р-ну Миколаївської обл. Три локації включали землі сільськогосподарського призначення, які перебували під постійними обстрілами під час воєнних дій, дві — землі несільськогосподарського призначення — вирва на місці зруйнованого від вибуху складу мінеральних добрив та лінія оборонних споруд. У результаті проведеного обстеження земель сільськогосподарського призначення встановлено надвисоке (перевищення у 6,5–11,2 рази) збільшення вмісту рухомих сполук марганцю, істотне перевищення кадмію, міді, кобальту, свинцю, цинку. Рівень забруднення усіх локацій обстежених земель сільськогосподарського призначення рухомим сполуками марганцю — слабкий, кадмію — помірний. Зафіксовано значну варіабельність за рівнем забруднення свинцем і кобальтом (від відсутності до дуже високого рівня забруднення). Відсутнє забруднення рухомими сполуками цинку, нікелю, хрому, міді (в одній пробі зафіксовано слабке забруднення). Перевага ГДК за вмістом рухомих сполук мікроелементів не виявлено. Відмічено, що за цільовим призначенням досліджені території можна застосовувати лише після рекультивацийних заходів. Обов'язковим заходом є запровадження постійного моніторингу еколого-токсикологічного стану ґрунту та вирощеної продукції. Обстежені території несільськогосподарського призначення за вмістом рухомих сполук важких металів відзначаються середнім рівнем забруднення кадмієм, слабким і помірним — міддю, слабким, помірним і середнім — нікелем, високим і дуже високим — кобальтом. Відсутнє забруднення рухомими сполуками хрому, марганцю і цинку. Вміст рухомих сполук свинцю перевищує ГДК у 1,2–2,9 рази. На цих землях варто провести рекультивацийні заходи, які допоможуть запобігти міграції важких металів.

Ключові слова: агрохімічне обстеження, військові дії, гранично допустима концентрація, залізо, кадмій, кобальт, марганець, мідь, нікель, хром, рівень забруднення, свинець, цинк.

ВСТУП

Ґрунтовий покрив України нині належить до екосистем, які найбільше постраждали від війни. В екологічному вимірі ключовим чинником загрози національній безпеці постає саме руйнівний вплив воєн-

них дій на ґрунти. Вже ідентифіковано кілька різновидів їх деградації: механічна (формування вирв, проникнення боєприпасів і уламків, руйнування гумусового горизонту внаслідок спорудження укріплень, копання траншей та бліндажів), фізична (ущільнення орного шару під час руху важкої військової техніки), погіршення агрохі-

мічних характеристик та водного режиму, а також забруднення паливно-мастильними матеріалами й токсичними елементами. Особливо загрозливим є накопичення важких металів у сільськогосподарських ґрунтах, адже навіть незначні їх концентрації чинять вкрай небезпечний токсичний вплив [1–3].

Мета і завдання дослідження — визначити вплив бойових дій на агрохімічний та еколого-токсикологічний стан земель сільськогосподарського і несільськогосподарського призначення на території Миколаївської обл.; встановити можливість подальшого використання земель сільськогосподарського призначення для вирощування польових культур.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Світова практика свідчить, що воєнні дії істотно змінюють властивості ґрунтів, переважно через фізико-хімічні порушення та накопичення токсичних елементів. Як показують дослідження D. Vidosavljevic et al. [4] та A. Berhe [5], війна в Хорватії спричинила істотне зростання концентрацій важких металів у ґрунтовому покриві: в районах інтенсивних боїв вміст міді, ртуті та свинцю перевищував національні нормативи, а рівень ртуті був вищим за допустимий для ведення сільського господарства.

У зразках із зон активних бойових дій концентрації окремих елементів переважали показники з територій низької інтенсивності бойових дій у десятки разів (нікель — у 1,03–52,2 раза). Забруднення фіксувалося навіть на відстанях понад 6 км від місця боїв.

Подібні тенденції відзначалися й після війни в Перській затоці, де підвищені рівні кадмію, кобальту, хрому, свинцю, нікелю, титану, ванадію та вольфраму вказували на серйозну трансформацію ґрунтового середовища [6]. Аналогічні перевищення ГДК важких металів реєструвалися у ґрунтах Ірану, Боснії і Герцеговини, Кувейту та інших регіонів, охоплених свого часу воєнними конфліктами [7–9].

Важкі метали, за потрапляння у ґрунтове середовище, зберігаються протягом тривалого часу, не зазнаючи руйнування чи розкладання. Показовим є дослідження французьких учених, проведено в 2011 р., яке засвідчило: навіть через 90 років після завершення Першої світової війни на територіях колишніх бойових дій концентрації важких металів у ґрунті залишалися вищими за допустимі норми [10].

В Україні вже в 2014 р. було встановлено відчутний негативний вплив воєнних дій на екологічну безпеку та родючість ґрунтів. У межах досліджень, виконаних за підтримки Організації з безпеки і співробітництва в Європі (ОБСЄ) в зоні конфлікту на сході країни, визначено, що концентрації важких металів у ґрунтових пробах із територій бойових дій у більшості випадків перевищували фонові показники у 1,2–12,0 разів. Для ртуті, кадмію та ванадію зафіксовано систематичне збільшення фонових значень у 1,1–1,3 раза [11; 12]. Особливо небезпечними за рівнем забруднення важкими металами виявлено місця розриву снарядів. Зростання вмісту забруднювачів у ґрунтовому покриві у місцях бойових дій також зафіксовано фахівцями ДУ «Інститут охорони ґрунтів України» [13; 14].

Варто підкреслити, що найбільшу загрозу становить забруднення ґрунтів токсичними й канцерогенними сполуками, оскільки вони можуть проникати у підземні та поверхневі води або акумулюватися в сільськогосподарській продукції. Важкі метали мають здатність сорбуватися й поступово накопичуватися у ґрунтовому середовищі, що зумовлює посилення його токсичного потенціалу та сприяє нагромадженню небезпечних речовин у врожаї сільськогосподарських культур.

До найнебезпечніших забруднювачів ґрунтового покриву належать високотоксичні важкі метали — свинець, ртуть, арсен, кадмій, мідь, нікель та цинк [15; 16]. Їх надходження у довкілля під час воєнних дій зумовлено передусім залишками вогнепальної зброї, що містить значні кількості металовмісних часток, а також застосу-

ванням артилерії, гранат і ракет. Металеві фрагменти боєприпасів (уламки) є стійким джерелом антропогенного забруднення довкілля, оскільки вони мають значний потенціал довготривалого збереження у ґрунтах територій, що постраждали від бойових дій.

Важкі метали можуть акумулюватися в сільськогосподарських культурах і, надходячи з їжею до організму, поступово концентруватися в тканинах живих істот, провокуючи розвиток різноманітних патологічних станів [13; 17].

Висока мобільність важких металів зумовлює їхнє активне просування трофічними ланцюгами, що створює серйозну загрозу для здоров'я населення через токсичні, канцерогенні та мутагенні властивості цих елементів. У зв'язку з цим, надзвичайної актуальності набуває регулярний моніторинг екологічного стану ґрунтів у районах, охоплених бойовими діями, з метою контролю рівня їх забруднення [11].

Для запобігання негативним екологічним наслідкам, пов'язаним із підвищеним вмістом важких металів у ґрунтовому покриві, особливо в районах інтенсивних бойових дій, необхідне систематичне й ретельне спостереження за станом ґрунтів. Таке обстеження дає змогу своєчасно виявляти вплив воєнних дій на сільськогосподарські угіддя, оперативно ухвалювати заходи щодо усунення забруднення, оцінювати масштаби завданої шкоди та запобігати потраплянню забрудненої продукції до торгової мережі (або споживчого обігу), що, своєю чергою, сприяє збереженню конкурентоспроможності України на міжнародній аграрній арені.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом досліджень слугували 19 збірних проб ґрунту, відібраних у п'яти локаціях на території Первомайської ТГ Миколаївського та Снігурівської ТГ Баштанського р-ну Миколаївської обл. Ґрунт території дослідження представлений чорноземами південними легкоглинистими (шифр агровиробничої групи 71 л).

Проби № 1–3 взято на розмінованій території, яка розташована за межами с. Киселівка Первомайської ТГ Миколаївського р-ну Миколаївської обл. Територія обстеження попередньо перебувала під постійним обстрілом.

Проби ґрунту № 4–7 та № 12 відібрано на розмінованій території, яка розташована за межами с. Киселівка Первомайської ТГ Миколаївського р-ну Миколаївської обл. Територія обстеження також попередньо перебувала під постійним обстрілом та містить уламки конструкцій, які віднесені вибухом складу селітри.

Проби ґрунту № 8–11 — на місці вирви, яка утворилася внаслідок вибуху складу мінеральних добрив за межами с. Киселівка Первомайської ТГ Миколаївського р-ну Миколаївської обл. (землі несільськогосподарського призначення). Порівнювали з показниками проби № 12, відібраної за 300 м від вирви у місці влучання у склад.

Проби ґрунту № 13–16 — на умовно розмінованій території, яка розташована за межами м. Снігурівка Снігурівської ТГ Баштанського р-ну Миколаївської обл. Територія обстеження попередньо перебувала під постійним обстрілом з мінометів, артилерії, РСЗВ та авіації.

Проби ґрунту № 17–19 — на умовно розмінованій території, яка розташована в межах м. Снігурівка Снігурівської ТГ Баштанського р-ну Миколаївської обл. (землі несільськогосподарського призначення). Територія обстеження включає лінію оборонних споруд та вигорілу ділянку навколо знищеного танка.

Глибина відбору проб ґрунту становить 0–15 см, саме на цю глибину проводиться умовне розмінування територій обстеження.

Визначення вмісту рухомих сполук важких металів у ґрунтах здійснювали відповідно до чинних нормативно-методичних документів, зокрема, ДСТУ 4770.1:2007, вміст рухомих сполук цинку — ДСТУ 4770.2:2007, вміст рухомих сполук кадмію — ДСТУ 4770.3:2007, вміст рухомих сполук кобальту — ДСТУ 4770.5:2007, вміст рухомих сполук міді — ДСТУ 4770.6:2007,

вміст рухомих сполук нікелю — ДСТУ 4770.7:2007, вміст рухомих сполук хрому — ДСТУ 4770.8:2007, вміст рухомих сполук свинцю — ДСТУ 4770.9:2007, вміст рухомих сполук заліза — ДСТУ 4770.4:2007 [18–26].

Методики базуються на принципах атомно-абсорбційної спектrophотометрії, що забезпечує високу чутливість та точність визначення концентрацій елементів. Рухомі форми важких металів вилучали зі зразків ґрунту за допомогою буферної амонійно-ацетатної витяжки з рН 4,8, що імітує умови, за яких метали перебувають у доступній для рослин формі.

Групування ґрунтів за агрохімічними та токсикологічними показниками виконували відповідно до Методики проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення [27]. Отримані показники порівнювали з контрольними даними останнього агрохімічного обстеження земель, проведеного у довоєнний час — землекористування с. Киселівка в 2014 р., м. Снігурівка — у 2009 р. Для встановлення придатності досліджуваних земельних ділянок для вирощування сільськогосподарської продукції та для проведення оцінки їх екологічного стану, вміст рухомих сполук важких металів порівнювали з ГДК забруднювачів у ґрунті [28].

Статистичну обробку отриманих результатів здійснювали в пакеті програм Excel та Statistika 6.0.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За результатами досліджень виявлено, що ґрунт локації, яка перебувала під постійними обстрілами (проби №№ 1–3) має слабкий рівень забруднення рухомими сполуками марганцю (60,3–64,6 мг/кг), помірний ступінь забруднення рухомими сполуками кадмію (0,29–0,47 мг/кг), середній і дуже високий ступінь забруднення рухомими сполуками кобальту (1,51–3,26 мг/кг), слабкий, середній та дуже високий ступінь забруднення рухомими сполуками свинцю (1,32–5,08 мг/кг), незабруднений за вмістом рухомих сполук міді

(0,25–0,87 мг/кг), цинку (0,38–0,71 мг/кг), нікелю (0,76–1,93 мг/кг), хрому (0,46–1,10 мг/кг) [27]. Вміст рухомих сполук заліза становить 1,02–3,00 мг/кг. Перевищень ГДК [28] за вмістом рухомих сполук мікроелементів не встановлено (*рис.*).

Найвищий вміст рухомих сполук елементів серед проб, відібраних на цій локації, зафіксовано в ґрунті вздовж дороги. Слід зауважити, що концентрація мікроелементів та важких металів у ґрунтах вздовж доріг зазвичай може бути вищою внаслідок впливу викидів автотранспорту, а також вздовж доріг найчастіше проходять активні бойові дії, які мають негативний вплив на ґрунтовий покрив.

Порівняно з контролем (значення показника за результатами агрохімічного обстеження 2014 р.) вміст рухомих сполук свинцю збільшився в двох пробах ґрунту від 0,19 до 2,98 мг/кг ґрунту (*табл. 1*).

Встановлено збільшення вмісту рухомих сполук міді (на 0,46 мг/кг ґрунту) в одній пробі ґрунту, відібраній вздовж дороги, у інших пробах вміст показника зменшився від 0,09 до 0,16 мг/кг ґрунту (*табл. 2*).

Зростання вмісту рухомих сполук марганцю від 53,7 до 56,8 мг/кг ґрунту (*табл. 3*), кобальту (від 0,34 до 2,09 мг/кг ґрунту), кадмію (від 0,03 до 0,21 мг/кг ґрунту) відмічено в усіх пробах ґрунту.

Ґрунт розмішованої території, яка перебувала під постійним обстрілом та містить уламки конструкцій, які віднесені вибухом складу селітри (проби №№ 4–7 та № 12), характеризується у 4 пробах слабким рівнем забруднення рухомими сполуками марганцю (52,35–73,29 мг/кг) та свинцю (0,8–1,27 мг/кг), слабким (0,69–0,81 мг/кг) та підвищеним (2,07–2,4 мг/кг) забрудненням рухомими сполуками кобальту, в усіх пробах — помірним ступенем забруднення рухомими сполуками кадмію (0,22–0,27 мг/кг). Відсутнє забруднення за вмістом рухомих сполук міді (0,13–0,47 мг/кг), цинку (0,28–0,50 мг/кг), нікелю (0,77–1,12 мг/кг) та хрому (0,19–0,42 мг/кг). Вміст рухомих сполук заліза становить 0,33–2,13 мг/кг. Перевищень ГДК за вмістом рухомих сполук мікроелементів не виявлено.



Уміст рухомих сполук важких металів на територіях проведення бойових дій, мг/кг ґрунту

Порівняно з контролем (результати агрохімічного обстеження 2014 р.) збільшення вмісту рухомої міді зафіксовано у пробі ґрунту, локаційно відібраної найближче до дороги (0,47 мг/кг), в усіх ін-

ших пробах відмічено зменшення вмісту рухомих сполук міді на 0,01–0,28 мг/кг ґрунту. Уміст рухомих сполук кобальту підвищився в 2 пробах ґрунту (від 0,19 до 2,98 мг/кг ґрунту), а рухомих сполук мар-

Таблиця 1. Уміст рухомих сполук важких металів I класу небезпеки у ґрунтах територій, пошкоджених внаслідок бойових дій

№ проби	Вміст рухомих сполук цинку, мг/кг	% до контролю	% до ГДК	Вміст рухомих сполук кадмію, мг/кг	% до контролю	% до ГДК	Вміст рухомих сполук свинцю, мг/кг	% до контролю	% до ГДК
<i>Землі сільськогосподарського призначення</i>									
1	0,42		1,8	0,30	116,3	42,9	2,29	109,0	38,2
2	0,38		1,7	0,29	112,4	41,4	1,32	62,9	22,0
3	0,71		3,1	0,47	182,2	67,1	5,08	241,9	84,7
4	0,35		1,5	0,22	85,3	31,4	1,06	50,5	17,7
5	0,28		1,2	0,23	89,1	32,9	0,65	31,0	10,8
6	0,50		2,2	0,26	100,8	37,1	0,93	44,3	15,5
7	0,46		2,0	0,22	85,3	31,4	0,78	37,1	13,0
12	0,39		1,7	0,27	104,7	38,6	1,27	60,5	21,2
Контрольне значення показника (2014 р.)	н/в			0,258		36,9	2,1		35,0
13	0,93	211,4	4,0	0,32	533,3	45,7	2,02	99,0	33,7
14	0,49	111,4	2,1	0,24	400,0	34,3	0,64	31,4	10,7
15	0,52	118,2	2,3	0,21	350,0	30,0	0,32	15,7	5,3
16	0,52	118,2	2,3	0,23	383,3	32,9	1,18	57,8	19,7
Контрольне значення показника (2009 р.)	0,44			0,06			2,04		
<i>Землі несільськогосподарського призначення</i>									
8	0,91	233,3	4,0	0,61	225,9	87,1	11,90	937,0	198,3
9	0,99	253,8	4,3	0,57	211,1	81,4	7,22	568,5	120,3
10	0,91	233,3	4,0	0,56	207,4	80,0	7,41	583,5	123,5
11	0,93	238,5	4,0	0,57	211,1	81,4	7,67	603,9	127,8
17	3,89	—	16,9	0,57	—	81,4	11,01	—	183,5
18	2,56	—	11,1	0,66	—	94,3	17,45	—	290,8
19	1,91	—	8,3	0,51	—	72,9	11,43	—	190,5
ГДК	23			0,7			6,0		
Середнє значення	0,50			0,27			1,46		
Стандартна помилка	0,04			0,02			0,32		
Середньоквадратичне відхилення	0,17			0,07			1,27		
Коефіцієнт варіації	35,2			26,4			87,0		
Min	0,28			0,21			0,32		
Max	0,93			0,47			5,08		
НІР _{0,5}	0,11			0,05			0,81		

Таблиця 2. Уміст рухомих сполук важких металів II класу небезпеки у ґрунтах територій, пошкоджених внаслідок бойових дій

№ проби	Вміст рухомих сполук міді, мг/кг	% до контролю	% до ГДК	Вміст рухомих сполук кобальту, мг/кг	% до контролю	% до ГДК	Вміст рухомих сполук хрому, мг/кг	% до ГДК	Вміст рухомих сполук нікелю, мг/кг	% до ГДК
<i>Землі сільськогосподарського призначення</i>										
1	0,32	78,0	10,7	1,51	129,1	30,2	0,51	8,5	1,48	37,0
2	0,25	61,0	8,3	1,90	162,4	38	0,46	7,7	0,76	19,0
3	0,87	212,2	29,0	3,26	278,6	65,2	1,1	18,3	1,93	48,3
4	0,13	31,7	4,3	2,07	176,9	41,4	0,19	3,2	1,12	28,0
5	0,32	78,0	10,7	2,40	205,1	48	0,19	3,2	0,93	23,3
6	0,40	97,6	13,3	0,69	59,0	13,8	0,42	7,0	0,99	24,8
7	0,32	78,0	10,7	0,38	32,5	7,6	0,27	4,5	0,93	23,3
12	0,47	114,6	15,7	0,81	69,2	16,2	0,36	6,0	0,77	19,3
Контрольне значення (2014 р.)	0,41		13,7	1,17		23,4	н/в		н/в	
13	0,80	258,1	26,7	1,20	631,6	24	0,40	6,7	1,12	28,0
14	0,84	271,0	28,0	1,13	594,7	22,6	0,20	3,3	1,03	25,8
15	1,13	364,5	37,7	1,01	531,6	20,2	0,14	2,3	0,96	24,0
16	0,41	132,3	13,7	0,85	447,4	17	0,12	2,0	1,21	30,3
Контрольне значення (2009 р.)	0,31		10,3	0,19		3,8	н/в		н/в	
<i>Землі несільськогосподарського призначення</i>										
8	1,28	272,3	42,7	2,6	321,0	52,0	1,56	26,0	3,58	89,5
9	1,45	308,5	48,3	2,71	334,6	54,2	1,27	21,2	3,99	99,75
10	1,18	251,1	39,3	2,72	335,8	54,4	1,22	20,3	3,18	79,5
11	1,20	255,3	40,0	2,59	319,8	51,8	1,34	22,3	3,04	76,0
17	0,88		29,3	3,00		60,0	1,23	20,5	3,04	76,0
18	2,42		80,7	2,67		53,4	1,23	20,5	3,62	90,5
19	0,85		28,3	2,63		52,6	1,28	21,3	2,75	68,75
ГДК	3,0			5,0			6,0		4,0	
Середнє значення	0,52			1,43			0,36		1,10	
Стандартна помилка	0,08			0,21			0,07		0,08	
Середньоквадратичне відхилення	0,31			0,83			0,27		0,33	
Коефіцієнт варіації	59,21			58,02			73,42		29,52	
Min	0,13			0,38			0,12		0,76	
Max	1,13			3,26			1,10		1,93	
НІР _{0,5}	0,20			0,53			0,17		0,21	

Таблиця 3. Уміст рухомих сполук важких металів III класу небезпеки у ґрунтах територій, пошкоджених внаслідок бойових дій

№ проби	Вміст рухомих сполук марганцю, мг/кг	% до контролю	% до ГДК	Вміст рухомих сполук заліза, мг/кг
<i>Землі сільськогосподарського призначення</i>				
1	63,4	960,6	45,3	2,43
2	60,3	913,6	43,1	1,02
3	64,6	978,8	46,1	3,00
4	55,93	847,4	40,0	0,33
5	72,34	1096,1	51,7	1,02
6	73,29	1110,5	52,4	0,81
7	52,35	793,2	37,4	1,25
12	42,69	646,8	30,5	2,13
Контрольне значення показника (2014 р.)	6,6		4,7	
13	67,55	1107,4	48,3	2,52
14	71,70	1175,4	51,2	1,69
15	53,58	878,4	38,3	1,56
16	72,02	1180,7	51,4	2,34
Контрольне значення показника (2009 р.)	6,1		4,4	н/в
<i>Землі несільськогосподарського призначення</i>				
8	30,61	71,7	21,9	5,10
9	36,85	86,3	26,3	7,12
10	31,07	72,8	22,2	6,94
11	37,77	88,5	27,0	6,98
17	44,83	—	32,0	5,20
18	21,96	—	15,7	5,46
19	44,83	—	32,0	5,25
ГДК	140,0		—	—
Середнє значення	62,48		44,64	
Стандартна помилка	2,43		1,74	
Середньоквадратичне відхилення	9,73		6,95	
Коефіцієнт варіації	15,58		15,57	
Min	42,69		30,50	
Max	73,29		52,40	
НІР _{0,5}	6,18		4,41	

ганцю (від 36,09 до 66,69 мг/кг) — у всіх пробах ґрунту. Уміст кадмію лишився на рівні контролю. Також з'ясовано зменшення концентрації свинцю в усіх відібраних пробах ґрунту.

Слід зауважити, що істотне збільшення забруднення ґрунтів, порівняно з контролем, зафіксовано за вмістом рухомих сполук марганцю (всі досліджувані проби ґрунту). Уміст більшості досліджуваних рухомих сполук мікроелементів залишився на рівні вмісту показника встановленого за результатами довоєнного обстеження (рухомі сполуки міді, цинку, кадмію). Натомість вміст рухомих сполук свинцю на досліджуваній ділянці, порівняно з контролем, знизився.

За результатами досліджень умовно розмінованої території, яка перебувала під постійним обстрілом із мінометів, артилерії, РСЗВ та авіації (проби № 13–16) в одній пробі ґрунту визначено слабкий рівень забруднення рухомими сполуками міді (1,13 мг/кг), у всіх пробах ґрунту — слабкий рівень забруднення за вмістом рухомих сполук марганцю (53,58–72,02 мг/кг), слабкий (0,85 мг/кг) та помірний (1,01–1,20 мг/кг) рівень забруднення — за вмістом рухомих сполук кобальту, помірний рівень забруднення — за вмістом рухомих сполук кадмію (0,21–0,32 мг/кг), а також у двох пробах ґрунту — слабкий (1,18 мг/кг) і помірний (2,02 мг/кг) ступінь забруднення за вмістом рухомих сполук свинцю. Вміст рухомих сполук заліза становить 1,56–2,52 мг/кг.

Відсутнє забруднення за вмістом рухомих сполук цинку та хрому. Перевищень ГДК за вмістом рухомих сполук мікроелементів не встановлено.

Порівняно з контрольними показниками результатів агрохімічного обстеження 2009 р. виявлено значне збільшення вмісту рухомих сполук цинку на 11,4–111,4%, кадмію — на 250,0–433,3%, міді — на 32,2–264,5%, кобальту — на 347,4–531,6% та надвисоке посилення рухомих сполук марганцю — на 778,4–1080,7%. Водночас зафіксовано зменшення концентрації свинцю у всіх відібраних пробах ґрунту.

Зважаючи на еколого-токсикологічні характеристики, досліджувані ділянки за цільовим призначенням — сільськогосподарським використанням — можна застосовувати лише після рекультиваційних заходів. Також обов'язковим заходом для досліджуваних ділянок є запровадження постійного моніторингу еколого-токсикологічного стану ґрунту та вирощеної продукції.

За результатами досліджень на місці вирви, яка утворилася внаслідок вибуху складу мінеральних добрив, перевищень ГДК за вмістом рухомих сполук міді у пробах ґрунту не зафіксовано, проте вони характеризувались слабким рівнем забруднення за вмістом елемента (1,18–1,45 мг/кг). Усі проби ґрунту були дуже з низьким вмістом рухомих сполук цинку, як і контрольна проба, відібрана на відстані 300 м від вирви.

Уміст рухомих сполук марганцю у відібраних пробах ґрунту варіює від 30,61 до 37,77 мг/кг ґрунту (дуже високий вміст). Перевищення ГДК та забруднення проб ґрунту не встановлено. Значне збільшення вмісту марганцю, порівняно з довоєнним періодом, може свідчити про вплив на ґрунтовий покрив бойових дій та мінеральних добрив, які зберігались на складі під час його експлуатації та після руйнування.

Усі проби ґрунту, відібрані з різних горизонтів вирви, мають високий ступінь забруднення рухомими сполуками кобальту, але збільшення ГДК не виявлено. Значення показника мають незначне варіювання — від 2,59 до 2,72 мг/кг ґрунту. Уміст рухомих сполук нікелю в пробах ґрунту відібраних з різних горизонтів вирви перебуває у межах від 3,04–3,99 мг/кг ґрунту. Перевищень ГДК за вмістом елемента не відмічено, проте встановлено, що проби ґрунту № 8 та 9 мають помірний рівень забруднення елементом, № 10 та 11 — слабкий. Усі відібрані проби ґрунту мають середній рівень забруднення рухомими сполуками кадмію. Загалом середньозважений показник вмісту елемента варіює від 0,56 до 0,61 мг/кг ґрунту та знаходиться на рівні ГДК. Уміст рухомих сполук хрому в пробах, відібраних

з різних горизонтів вирви, варіює від 1,22 до 1,56 мг/кг ґрунту. За вмістом елемента перевищення ГДК та забруднення ґрунту не відмічено. Вміст рухомих сполук заліза становить 5,10–7,12 мг/кг.

Уміст рухомих сполук свинцю у всіх відібраних пробах перевищує ГДК та варіює від 7,22 до 11,90 мг/кг ґрунту. Проба ґрунту, відібрана для порівняння на відстані 300 м від вирви, характеризується слабким рівнем забруднення рухомими сполуками свинцю. Концентрація забруднювача у зазначеній пробі від 5,7 до 9,4 разів менша порівняно з пробами ґрунту, відібраними на території зруйнованого складу. Це може свідчити про тривалий вплив на ґрунтовий покрив мінеральних добрив та інших хімікатів, які зберігались на складі під час його експлуатації та після руйнування.

На умовно розмінованій території, що охоплює, включає вигорілу ділянку навколо знищеного танка, за вмістом рухомих сполук кобальту виявлено високий та дуже високий рівень забруднення (2,63–3,0 мг/кг), за вмістом нікелю — середній та помірний рівень забруднення (2,75–3,62 мг/кг), за вмістом кадмію — середній рівень забруднення (0,51–0,66 мг/кг). Одна проба ґрунту відзначається помірним рівнем забруднення за вмістом рухомих сполук міді (2,42 мг/кг). У всіх пробах ґрунту встановлено перевищення ГДК за вмістом рухомих сполук свинцю (11,01–17,45 мг/кг). За вмістом рухомих сполук цинку (1,91–3,89 мг/кг), марганцю (21,96–44,83 мг/кг), хрому (1,23–1,28 мг/кг) забруднення відсутнє. Вміст рухомих сполук заліза становить 5,20–5,46 мг/кг.

На ділянках несільськогосподарського призначення, забруднених важкими металами, доцільно провести рекультиваційні заходи, спрямовані на стабілізацію забруднювачів у ґрунті та запобігання їх

подальшій міграції в суміжні екосистеми. Такі заходи допоможуть зменшити ризик вторинного забруднення поверхневих і підземних вод, а також мінімізувати негативний вплив на навколишнє природне середовище.

ВИСНОВКИ

У результаті агрохімічного та екологіко-токсикологічного обстеження земель сільськогосподарського призначення Первомайської та Снігурівської ТГ Миколаївської обл. встановлено істотні зміни у вмісті рухомих сполук важких металів порівняно з довоєнним періодом.

У ґрунтах досліджених ділянок зафіксовано надвисоке (у 6,5–11,2 раза) підвищення концентрації рухомих сполук марганцю, а також збільшення вмісту кадмію, кобальту, міді, свинцю та цинку. Рівень забруднення ґрунтів оцінюється як слабкий за вмістом марганцю, помірний — кадмію, зі значною варіабельністю для свинцю та кобальту. Перевищень ГДК для мікроелементів не виявлено.

Ґрунти несільськогосподарського призначення характеризуються середнім рівнем забруднення кадмієм, слабким — міддю, середнім — нікелем та високим—дуже високим — кобальтом. У всіх пробах цієї категорії земель зафіксовано зростання ГДК за вмістом рухомих сполук свинцю у 1,2–2,9 разів.

Отримані результати свідчать про локальний характер техногенного забруднення, зумовлений воєнними діями. Для мінімізації ризиків вторинного забруднення та забезпечення екологічної безпеки агроландшафтів необхідне здійснення рекультиваційних заходів і запровадження постійного моніторингу еколого-токсикологічного стану ґрунтів та рослинницької продукції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>.
2. Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., & Сорокіна, Л. (2023). *Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу*. Київ: ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія».

3. Балюк, С. А., Кучер, А. В., Солоха, М. О., Соловей, В. Б., Смірнова, К. Б., Момот, Г. Ф., & Левін, А. Я. (2022). Вплив збройної агресії та воєнних дій на сучасний стан ґрунтового покриву, оцінка шкоди та збитків, заходи з відновлення: наук. доп. Харків: ФОП Бровін О.В.
4. Vidosavljević, D., Puntarić, D., Gvozdić, V., Jergović, M., Miškulin, M., Puntarić, I., ... Šijanović, S. (2013). Soil contamination as a possible long-term consequence of war in Croatia. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 63(4), 322–329. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2013.7>.
5. Berhe, A. (2007). The contribution of landmines to land degradation. *Land Degradation & Development*, 18(1), 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.754>.
6. Sadiq, M., AlThagafi, K. M., & Mian, A. A. (1992). Preliminary Evaluation of Metal Contamination of Soils from the Gulf War Activities. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 49, 633–639. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00200774>.
7. Tomic, N. T., Smiljanić, S., Jović, M., Gligorić, M., Povrenović, D. & Došić, A. (2018). Examining the Effects of the Destroying Ammunition, Mines, and Explosive Devices on the Presence of Heavy Metals in Soil of Open Detonation Pit. Part 1. Pseudo-total Concentration. *Water Air Soil Pollut.*, 229, 301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3957-0>.
8. Broomandi, P., Dabir, B., Bonakdarpour, B., & Rashidi, Y. (2017). Identification of dust storm origin in South — West of Iran. *J. Environ. Health Sci. Engineer.*, 15, 16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0280-4>.
9. Denton, G. R. W., Emborski, C. A., Hachero, A. A. B., Masga, R. S., & Starmer, J. A. (2016). Impact of WWII dumpsites on Saipan (CNMI): heavy metal status of soils and sediments. *Environmental Science and Pollution Research.*, 23, 11339–11348. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6603-7>.
10. Bausinger T., Bonnaire E., & Preuss, J. (2007). Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. *Sci Total Environ.*, 382, 259–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.029>.
11. Денісов, Н., Аверін Д., Юшук, А., Єрмаков, В., Улицький, О., Бистров, П., ... Набиванець, Ю. (2017). Оцінка екологічної шкоди та пріоритети відновлення довкілля на сході України. Київ: ВАІТЕ. URL: https://www.osce.org/files/t/documents/6/3/362581_0.pdf.
12. Кравченко, О., Василюк, О., Войціховська, А., & Норенко, К. (2015). Дослідження впливу військових дій на довкілля на сході України. *Схід*, 2, 118–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Skhid_2015_2_23.
13. Лісова, Н. (2017). Вплив військових дій в Україні на екологічний стан території. *Наукові записки*, 2, 165–173. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/NZTNPUg_2017_2_27.
14. Зайцев, Ю. О., Грищенко, О. М., Романова, С. А., & Зайцева, І. О. (2022). Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського р-нів Сумської обл. *Агроекологічний журнал*, 3, 136–149. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>.
15. Kumar, D., Malik, S., Rani, R., Kumar, R., & Dhan, J. S. (2023) Behavior, risk, and bioremediation potential of heavy metals/metalloids in the soil system. *Rend. Lincei Sci. Fis. Nat.*, 34, 809–831. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01166-0>.
16. Shukla, S., Mbingwa, G., Khanna, S., Dalal, J., Sankhyani, D., Malik, A., & Badhwar, N. (2023). Environment and health hazards due to military metal pollution: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100857>.
17. Harada, K. H., Solomon, S. R., Ang, J. S. M., & Trzcinski, A. P. (2022). Conflict-related environmental damages on health: lessons learned from the past wars and ongoing Russian invasion of Ukraine. *Environmental health and preventive medicine*, 27, 35. DOI: <https://doi.org/10.1265/ehpm.22-00122>.
18. ДСТУ 4770.1:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук марганцю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспоживстандарт».
19. ДСТУ 4770.2:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук цинку в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспоживстандарт».
20. ДСТУ 4770.3:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кадмію в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспоживстандарт».
21. ДСТУ 4770.5:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кобальту в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспоживстандарт».
22. ДСТУ 4770.6:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук міді в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії. (2008). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспоживстандарт».
23. ДСТУ 4770.7:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук нікелю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспоживстандарт».
24. ДСТУ 4770.8:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук хрому в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспоживстандарт».

25. ДСТУ 4770.9:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук свинцю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспожив-стандарт».
26. ДСТУ 4770.4:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук заліза в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: «Держспожив-стандарт».
27. Яцук, І. П., & Балюк, С. А. (Ред.). (2013). *Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення (керівний нормативний документ)*. Київ.
28. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин. Постанова Кабінету Міністрів України № 1325 (2021). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text>.

Стаття надійшла до редакції журналу 18.09.2025

ПОПЕРЕДЖЕННЯ ДЕФЛЯЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ХМЕЛЕНАСАДЖЕННЯХ ПОЛІССЯ

О.П. Стецюк, Л.П. Кириченко,
В.В. Любченко, І.П. Штанько

Інститут сільського господарства Полісся НААН (м. Житомир, Україна)

e-mail: alex.stecyuk@ukr.net; ORCID: 0000-0001-8872-537X

e-mail: lkyrych@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8604-2524

e-mail: vladovich70@ukr.net; ORCID: 0000-000-7558-8054

e-mail: shtanko_hop@meta.ua; ORCID: 0000-0001-7847-0772

У статті акцентовано увагу на результатах досліджень окремих елементів технологічного процесу вирощування хмелю, які запобігають вітровій ерозії в агроєкосистемі хмеленасаджень, а також їх вплив на продуктивність та якість хмелесировини. Методи — польові досліді, лабораторні, метеорологічні дослідження, статистичні методи аналізу. Встановлено, що в агроєкосистемі хмелеплантації визначальними параметрами протиідефляційної стійкості ґрунту є ступінь покриття міжрядь хмеленасаджень сидеральними культурами в еолово небезпечний період та зволоження ґрунту, яке знижує показники руйнування вітростійких агрегатів до ерозійно небезпечних розмірів — менше 1 мм. У середньому за три роки досліджень імовірно-розрахункові втрати ґрунту на варіантах загальноприйнятої технології за рахунок дефляції досягали 4,76–4,84 т/га, ґрунтозахисні агротехнології майже на 100% запобігали цим негативним для агроєкосистеми хмеленасаджень процесам. Продуктивність шишок хмелю свідчить про те, що традиційна технологія вирощування порівняно з варіантами ґрунтозахисної практично не мала переваги. Якщо врожай шишок за традиційної технології вирощування становив 1,63–1,72 т/га, то ґрунтозахисна технологія вирощування реалізувала себе в межах 1,53–1,67 т/га шишок хмелю. Сидерація міжрядь хмеленасаджень пелюшко-вівсяною сумішкою дала змогу одержати таку саму продуктивність шишок, що і внесення перегною в межах 40 т/га раз на два роки. Якщо порівнювати з абсолютним контролем (варіант без добрив), то ми спостерігаємо значну перевагу з урожайності як традиційної агротехнології, так і ґрунтозахисної. В середньому за три роки перевагу з накопичення альфа-кислот виявлено на варіантах ґрунтозахисних агротехнологій, порівняно з традиційною приріст був 0,3 абсолютних відсотки. Тому, ефективне функціонування агробіоценозу хмеленасаджень можна забезпечити застосуванням нових еколого-безпечних ґрунтозахисних агроприйомів, які базуються на утриманні міжрядь під сидеральними культурами та внесенням у ґрунт суперабсорбенту вологи Теравет. Агробіологічні способи утримання ґрунту дають можливість зменшити антропогенне навантаження на екосистему хмільника, підтримуючи стабільну продуктивність, а також природний процес ґрунтовідновлення, попереджають дефляційно небезпечні процеси на легких дерново-підзолистих ґрунтах, а за продуктивністю одержаної хмелесировини наближаються до традиційної технології.

Ключові слова: хміль, ґрунтозахисна технологія, сидерат, ґрунт, абсорбент Теравет.

ВСТУП

Традиційні регіони вирощування хмелю перебувають під впливом змін агрокліматичних умов такою самою мірою, як інші агробіоценози, що вимагає нових методичних підходів до вже існуючих технологічних процесів та їх адаптації з врахуванням

погодно-кліматичних чинників вегетаційного періоду хмелю.

Агроєкологічні системи багаторічних насаджень хмелю у зв'язку зі зниженням вологозабезпеченням, а також нерівномірним розподілом опадів під час росту та розвитку рослин значно втрачають у продуктивності та якості хмелесировини. Крім того, дефіцит вологи сприяє пересиханню

верхнього шару ґрунту, особливо у перехідний весняно-літній період, коли агро-екосистема хмелеплантації ще незахищена рослинністю. Більшість хмелеплантацій та хмеленасаджень розміщено на легких дерново-підзолистих ґрунтах Полісся, які є дефляційно небезпечними за таких умов. Посилення швидкості вітру призводить до видування верхнього родючого шару ґрунту з агроекосистеми хмеленасаджень, в окремі роки в цей період спостерігаються пилові бурі, що раніше було рідкістю для Полісся. Втрати родючого шару ґрунту до того ж наближались до 5 т/га. Легкий гранулометричний склад дерново-підзолистого ґрунту сприяє дефляційним процесам уже за швидкості вітру до 5–7 м/с на ґрунтовій поверхні.

Наведені чинники вказують на те, що агроекосистеми багаторічних насаджень хмелю потребують технологічної адаптації до змін клімату.

Утримання міжрядь хмеленасаджень під сидеральними культурами у найнебезпечніший весняно-літній період активно сприяє захисту ґрунтів від дефляційно небезпечних процесів.

Наявність рослинного покриву забезпечує також можливість проведення технологічних операцій під час перезволоження ґрунту. Під час посухи сидерати та багаторічні трави запобігають дефляції.

Одним із напрямів реалізації нашого проєкту є включення в систему досліджень застосування вологоутримувальних супер-абсорбентів, що особливо актуально в умовах змін клімату. Під час закладання нових багаторічних хмеленасаджень це сприяє розвитку кореневої системи рослин і підвищенню врожайності. Полімери мають рідкісну властивість кристалів поглинати і утримувати в собі таку кількість рідини, яка в сотні разів перевищує їх власну вагу, а за необхідності (під час засухи) віддавати цю воду рослині.

Мета роботи полягає у виявленні технологічно адаптованих агроприймів у системі багаторічних насаджень хмелю в умовах змін клімату, що б надійно захищали легкі дерново-підзолисті ґрунти Полісся

від вітрової ерозії та забезпечували стабільно продуктивне функціонування агробіоценозу хмеленасаджень.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основними причинами мінливості клімату та його змін є поєднання впливу зовнішніх та внутрішніх чинників на кліматичну систему. За даними останнього звіту ВМО (Всесвітньої метеорологічної організації), в найближчі десятиріччя очікується продовження глобального потепління клімату, до 2100 р. середня температура підвищиться на 1–3°C. Ці зміни завдають значного впливу на сільське господарство. Тому важливо розробити стратегію боротьби з подібними варіаціями, застосовувати технологічні зміни та інновації для збереження продуктивності сільськогосподарських культур [1].

Значну актуальність в умовах змін клімату набуває застосування вологоутримувальних суперабсорбентів, котрі особливо успішно застосовуються в посушливих регіонах Близького Сходу та Китаю [2–4]. За результатами досліджень вчених цих регіонів використані суперабсорбувальні полімери (SAP) позитивно впливали на вологоутримувальні властивості ґрунтів, їх санацію та відновлення, ріст і розвиток різних сільськогосподарських культур та дерев, що дало можливість рослинам витримати умови посухового стресу та підвищити їх урожайність.

Поглинання та десорбція води за застосування суперабсорбентів допомагає впливати на пересихання ґрунтів та їх якість. Суперабсорбувальні гідрогелі є повністю біорозкладними та забезпечують чистоту ґрунт–повітря [5].

За даними S. Malik, K. Chaudhary, A. Malik [6] із індійського сільськогосподарського університету SAP покращують пористість ґрунту (0,26–6,91%) та зменшують втрати азоту з ґрунту до 45%.

Водночас китайські науковці Y. Yang, S. Zhang, J. Wu, C. Gao, D. Lu [7] у своїх дослідженнях за використання SAP на пшениці озимій мали збільшення кількості

агрегатів розміром $>0,25$ мм та зменшення кількості агрегатів $<0,25$ мм після одного року (2009 р.) та 9 років (2019 р.) використання. Крім того, SAP підвищує застосування води та азоту. Обробка SAP у дозі 45 кг/га є найефективніша на пшениці озимій.

Чилійські вчені D. Palma, O. Lagos, C. Souto [8] досліджували гідрогель на трьох ґрунтах грубої текстури та одному ґрунті середньої текстури. Отримали дані, що на піщаних ґрунтах ефект гідрогелів краший, ніж на глинистих.

Китайські дослідники H. Zheng, P. Mei, W. Wang [9], провели глобальний мета-аналіз 1504 парних точок даних із 310 статей, опублікованих до липня 2022 р. Додавання SAP до ґрунту привела до підвищення середньої врожайності на 12,8–17,2%. Найвищий приріст у бобових культур, а економічно вигідніше в овочевих.

Однак є вже і певні застереження відносно застосування SAP у ґрунт, як забруднювача мікропластиком. Зокрема, німецькі вчені C. Buchmann, J. Neff, M. Meyer, M. Bundschuh [10] пропонують ретельно вивчити відповідні процеси трансформації SAP у польових умовах, критично переоцінити внесення SAP у ґрунт та встановити надійні методи моніторингу. Негативний вплив на здоров'я та функціонування ґрунту можуть негативно позначитись на врожайності.

Як наслідок підвищення середньої температури повітря та нестачі опадів у весняно-літній період, верхні шари ґрунту зазнають значного пересушення. Пориви вітру призводять до руйнування поверхні ґрунтового покриву та розвіювання продуктів вивітрювання, тобто до вітрової ерозії (дефляції, видування). За даними ДУ «Інститут охорони ґрунтів України», інтенсивність видування ґрунту значною мірою залежить від його гранулометричного складу і вмісту в ньому гумусу: на ґрунтах супіщаного гранулометричного складу вітрова ерозія починає проявлятися за швидкості вітру 3–4 м/с, легкосуглинкових — 4–6 м/с. У північних та північно-східних районах України пилові бурі трапляються один раз за 10 років. Причиною вітрової ерозії, крім несприятливих клі-

матичних умов, є руйнування зернистої структури ґрунту внаслідок неправильного обробітку та відсутності надійного його захисту, знищенні в минулому ґрунтозакріплювальної рослинності, руйнуванні структури ґрунтів, зменшенні загальної лісистості, недотримання технології обробітку ґрунту та перехід на монокультури.

Вітрова ерозія в окремі роки переважно в зоні Степу, а наразі і в зоні Полісся, може відбуватися на площі до 20 млн га [11].

Шкода, що завдає вітрова ерозія сільському господарству, виявляється у вилученні з поверхневого шару частини ґрунтового матеріалу, що зумовлює значні втрати гумусу і поживних речовин, а в кінцевому підсумку — зниження родючості ґрунтів. Щорічні втрати ґрунтів від вітрової ерозії на Поліссі і в Лісостепу становлять 2–5 т/га за низької швидкості вітру.

Академік О.Г. Тараріко, який тривалий період займається дослідженнями формування ерозійно стійких ландшафтів зони Полісся та Лісостепу України наводить дані що навесні 2020 р. незвичайна пилова буря охопила Українське і Білоруське Полісся. За даними супутникових знімків Sentinel-5P Aerosol Index, що містить інформацію про концентрацію аерозолів (дрібнодисперсного пилу) встановлено, що територія масштабного прояву дефляції поверхні ґрунту охопила площу до 3,5 млн га. Епіцентр цієї бурі знаходився на межі Житомирської та Київської обл. на площі близько 88 тис. га.

О.Г. Тараріко наголошує, що цей прояв дефляції в зоні Полісся був спричинений дефіцитом вологи навесні 2020 р., низькою протиерозійною стійкістю дерново-підзолистих ґрунтів, а також поривчастими вітрами зі швидкістю до 20–22 м/с. Він вказує, що останнім часом навесні в зоні Полісся збільшилась кількість років із посушливою весною, що підвищує ризик вітрової ерозії, навіть на територіях, де раніше вона проявлялася локально тільки на пересушених торфових та глинисто-піщаних ґрунтах [12].

Площі ґрунтів, які піддаються вітро-ерозійним процесам постійно зростають

і країнах Європи. Р. Borrelli зі співавторами [13; 14] відзначають, що проблема оцінки сприйнятливості земель до вітрової ерозії та втрат ґрунту внаслідок цього процесу стає загальноєвропейською. З поглибленням досліджень цієї тематики у Р. Borrelli з'являються нові погляди на географію та моделювання дефляції [15; 16].

Аналогічні проблеми стосуються також посушливих регіонів США, про що свідчать наукові публікації Michael C. Daniway із співавторами [17], в яких також акцентується увага на методах запобігання цим негативним явищам.

Хміль як біологічний об'єкт для реалізації генетичного потенціалу в процесі життєдіяльності потребує певних агрокліматичних і ґрунтових умов. Зокрема, для його росту і розвитку найбільш сприятлива температура від 20 до 30°C (за достатньої вологозабезпеченості). Крім того, оптимальна середньорічна температура повітря сягає від 7,5 до 8,5°C, а сума активних температур наближається до 3000°C (від 2500 до 2900°C) [18].

В останні десятиріччя спостерігається загальне потепління клімату з одночасним посиленням його контрастності — почастила тривалість періодів як надмірного зволоження, так і нетипових для Полісся посушливих днів [19].

Циклічні зміни клімату — чергування прохолодно-вологих і тепло-сухих періодів, є закономірними. Сучасна тепло-суха фаза розпочалася в період 2005–2007 рр., а її максимум мав би припадати, за розрахунками вчених, на час 2011–2015 рр.

На часі 2025 р., та коливання температури в бік збільшення, а опадів — у бік зменшення, залишається стабільним, що негативно впливає на стійкість агроєкосистеми хмеленасаджень на легких дерново-підзолистих ґрунтах до вітрової ерозії, що і спонукало нас досліджувати способи запобігання цим процесам.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили на хмелеплантації Інституту сільського господарства

Полісся НААН. *Об'єкт досліджень* — технологічно адаптовані агроприйоми в системі багаторічних насаджень хмелю в умовах змін клімату. *Предмет досліджень* — хміль, ґрунт, суперабсорбент Теравет, погоднокліматичні умови. *Методи* — польові дослідження, лабораторні, метеорологічні дослідження, статистичні методи аналізу.

Органічні добрива — перегній, сидеральні культури.

Традиційні хімічні мінеральні добрива: аміачна селітра, 34%; суперфосфат, 20; калій хлористий, 60%.

Норму застосування органічних та мінеральних добрив під рослини хмелю встановлюємо з урахуванням вмісту у ґрунті органічної речовини, мінерального азоту і елементів живлення на програмований урожай. Перегній вносимо періодично, через рік.

Як сидеральні культури залежно від варіантів у міжряддях хмелю висіваємо: редьку олійну, гірчицю, пелюшко-вівсяну сумішку.

Агротехніка загальноприйнята відповідно з технологічною картою, крім чинників, що поставлені на вивчення.

Закладання дослідів виконано у весняний період 2021 р. на плантації № 212 ІСП НААН. Сорт хмелю Заграва. Рік садіння — 2016 р. Розмір дослідної ділянки (варіанта) — 30 м², облікової — 24 м². Площа живлення рослин 3×1 м. Повторність дослідів — чотириразова. Ґрунт дерново-підзолистий супіщаний.

Шість (6) варіантів дослідів розміщено систематично, двома блоками в чотирьох повтореннях. Блок 1 включає 2 повних набори варіантів; блок 2 включає 2 повних набори варіантів.

Для агрохімічної оцінки ґрунту перед закладанням відбирали зразки з двох горизонтів: 0–20; 21–40 см.

У зразках шишок хмелю визначали вміст альфа-кислот кондуктометричним методом згідно з ДСТУ 4099. Хміль. Правила відбирання проб та методи випробування.

Проводили моніторинг запасів продуктивної вологи в ґрунті впродовж вегетаційного періоду рослин хмелю.

У зразках ґрунту виявляли такі агрохімічні показники:

- гумус — за Тюрніним ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини (перед закладанням і закінченням дослідів);
- $\text{pH}_{\text{сол.}}$ та гідролітична кислотність — потенціометрично (ДСТУ ISO 10390:2001 Якість ґрунту. Визначання pH);
- азот легкогідролізний — ДСТУ 7863:2015. Якість ґрунту. Визначення легкогідролізного азоту методом Корнфілда;
- фосфор та калій — ДСТУ 4405:2005. Якість ґрунту. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за методом Кірса-нова в модифікації ННЦ «ІГА».

Протидефляційна стійкість ґрунту оцінювали за методикою експрес методу А.Б. Лавровського [15].

Виконано моніторинг метеорологічних даних погодно-кліматичних умов агроландшафту хмеленасаджень за допомогою метеостанції Vantage Pro 2.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Інтенсивний технологічний процес вирощування хмелю традиційно передбачає утримання міжрядь хмеленасаджень у стані, вільному від рослинності за рахунок міжрядних культиваций. Це призводить до порушення природного процесу відтворення родючості ґрунту, зниження стабільності функціонування та продуктивності агробіоценозу, а зі зміною кліма-

тичних чинників створює високі ризики дефляційних процесів, особливо на легких дерново-підзолистих ґрунтах.

Використання агротехнологій з елементами біологізації за рахунок сидерації на вітчизняних хмеленасадженнях, їх впливу на *протидефляційну стійкість ґрунту* є питанням недослідженим і потребує розширеного та поглибленого вивчення.

На ґрунтозахисних фонах для дослідження як сидеральні культури у міжрядях хмелю залежно від варіантів висіяні: *редька олійна, гірчиця, пелюшко-вівсяна сумішка*.

Зелене добриво є доступним, постійно відновлювальним джерелом органічної речовини. За даними наукових досліджень, загортання в ґрунт 20–30 т/га зеленої маси сидератів забезпечує ефект, рівноцінний внесенню аналогічної кількості гною [21].

За нашими даними, найвищі показники врожайності зеленої маси зафіксовано в редьки олійної — 277 ц/га, найнижча врожайність у пелюшко-вівсяної сумішки — 206 ц/га, проте позитивним є той факт, що пелюшка дає можливість збагатити ґрунт азотом, необхідним для формування врожаю хмелю; маса гірчиці була на рівні 244 ц/га (*табл. 1*).

Урожайність зеленої маси сидеральних культур у міжрядях хмеленасаджень вказує, що вони реалізують свій потенціал по накопиченню зеленої маси лише за умови достатньої забезпеченості опадами за їх період вегетації.

Таблиця 1. Урожайність зеленої маси сидеральних культур, висіяних у міжрядях хмеленасаджень (2021–2023 рр.)

Варіанти	Урожайність, ц/га			Середнє
	2021	2022	2023	
1. ЗТ (без добрив, чорний пар) — абсолютний контроль	Без сидератів			—
2. ЗТ (гній 40 т/га + $\text{N}_{120}\text{P}_{100}\text{K}_{140}$, чорний пар) — контроль	Без сидератів			—
3. ЗТ (гній 40 т/га + $\text{N}_{120}\text{P}_{100}\text{K}_{140}$ + Terawet 8г, чорний пар)	Без сидератів			—
4. ГТ (гірчиця + $\text{N}_{120}\text{P}_{100}\text{K}_{140}$ + Terawet, 8г)	244	259	228	244
5. ГТ (редька олійна + $\text{N}_{120}\text{P}_{100}\text{K}_{140}$ + Terawet, 8г)	291	279	260	277
6. ГТ (пелюшко-вівсяна суміш + $\text{N}_{120}\text{P}_{100}\text{K}_{140}$ + Terawet, 8г)	214	204	200	206

Відповідно до агроєкологічних умов проведення досліджень проводився моніторинг загальних запасів вологи в ґрунтових шарах під хмеленасадженнями по фазах розвитку рослин. Під час відбору вологи ґрунту ранньою весною, до розорювання рядів хмелю, вже було зафіксовано відмінності у вологонакопиченні між різними варіантами агротехнологій, залежно від шару ґрунту, особливо у 0–20 і 0–50 см шарах. Перевага у вологонакопиченні варіантів зі внесенням суперабсорбенту становила відповідно 35–43% та 26–32% порівняно з варіантами без внесення Теравет.

Під час сходів хмелю на ґрунтозахисних та традиційних фонах агротехнологій із застосуванням суперабсорбенту спостерігали тенденцію до накопичення вологи в ґрунті як в 0–20 см, так і в 0–50 см шарах, окрім варіанта загальноприйнятої технології без внесення Теравет, а також на неудобреному фоні (абсолютний контроль).

У період фази інтенсивного росту та розвитку рослин внесення Теравет більш якісно сприяло нагромадженню вологи як у 0–20, так і в 0–50 см шарі ґрунту. Перевага порівняно з варіантами без внесення суперабсорбенту становила на окремих варіантах до 46% у 0–50 см шарі ґрунту. Аналогічні маємо результати і в період формування шишки та технічної стиглості.

Тому на третій рік після застосування суперабсорбенту він проявив себе досить ефективно в агроєкосистемі хмеленасаджень у плані накопичення вологи у верхньому 0–20 та 0–50 см шарі дерново-підзолистого ґрунту. Як відомо, зволоження ґрунту знижує показники руйнування вітростійких агрегатів до ерозійно небезпечних розмірів — менше 1 мм, що підвищує протидефляційну стійкість ґрунту.

Питання вітрової ерозії легких дерново-підзолистих ґрунтів Полісся не було актуальним до середини 60–70-х років ХХ ст., доки ця зона була достатньо забезпечена вологою впродовж усього вегетаційного періоду рослин, не було проведено масштабної меліорації, зокрема осушення болотистої місцевості внаслідок чого порушено водний баланс усієї території та

негативні зміни клімату загалом не так відчутно проявлялися в екосистемі загалом і агробіоценозі зокрема.

Однак, уже з 80-х років ХХ ст. відчуються наслідки неадекватного антропогенного втручання в екологію, які посилися природним несприятливим водно-температурним режимом ґрунтово-земельних ресурсів.

Відтоді на ці процеси звернув увагу провідний вчений, завідувач відділу землеробства Інституту сільського господарства Нечорноземної зони України доктор наук В.П. Стрельченко, який і закрив перші польові дослідження з вивчення проблем водної та вітрової ерозії на дерново-підзолистих ґрунтах Полісся. Було розпочато землеробську тематику з дослідження впливу традиційних агротехнологій вирощування сівозмінних культур, що базуються на оранці, на стійкість ґрунту до ерозійних процесів порівняно зі ґрунтозахисними (безполіцевий обробітком за допомогою дискових борін, чизелів, плоскорізів і ін. знарядь подібного типу). Внаслідок цього було доведено високу ефективність ґрунтозахисних агротехнологій вирощування сільськогосподарських культур на дерново-підзолистих ґрунтах Полісся у попередженні водно-ерозійних та дефляційних процесів у цьому регіоні [22; 23].

Однак висновки стосувалися лише сівозмінних культур. Питання дефляційних процесів на хмеленасадженнях не вивчалися донині. Незважаючи на те, що традиційна технологія вирощування цієї культури передбачає утримання ґрунтової поверхні міжрядь хмеленасаджень із ранньої весни до пізньої осені у постійно відкритому дефляційно небезпечному стані внаслідок дискування та культивачей. Тому нами заплановано дослідити вплив ґрунтозахисних агротехнологій вирощування хмелю на дерново-підзолистих ґрунтах на стійкість до еолових процесів.

Аналізуючи імовірно-розрахункові втрати ґрунту в еолово небезпечний період за різних агротехнологій вирощування хмелю, ми спостерігаємо, що ґрунтозахисні технології вирощування хмелю, які базу-

ються на безполицевому обробітку та сидерації міжрядь майже на 100% захищають поверхню ґрунту від дефляції (табл. 2). На аналогічні результати щодо ефективності ґрунтозахисних технологій, тільки на сівозмінних культурах Полісся України, вказує у своїх наукових роботах проф. В.П. Стрельченко [17; 18].

Традиційні агротехнології у наших дослідженнях в агроєкосистемі хмеленасаджень тільки за 1 год пилової бурі призводять до втрати 4,76–4,84 т/га верхнього родючого шару, стійкість ґрунтозахисного утримання міжрядь хмеленасаджень більша ніж у 36 разів вища. Про необхідність формування ерозійно стійкої структури сільськогосподарських ландшафтів та їх адаптації до змін клімату в умовах сучасної сільськогосподарської практики наголошує акад. О.Г. Тараріко [12].

Крім того, ґрунтозахисний обробіток та сидерація міжрядь сприяє накопиченню органічної речовини у верхньому шарі ґрунту, що дає змогу замінити дороговартісні традиційні органічні добрива та на перспективу поліпшує родючість дерново-підзолистого ґрунту.

Урожайність шишок хмелю в середньому за три роки також свідчить про те, що традиційна технологія вирощування порівняно з варіантами ґрунтозахисної практично не мала переваги з продуктивності культури хміль. Якщо урожай шишок за традиційної технології вирощування сягав 1,63–1,72 т/га, то ґрунтозахисна технологія вирощування реалізувала себе в межах 1,53–1,67 т/га шишок хмелю (табл. 3). Сидерація міжрядь хмеленасаджень пелюшко-вівсяною сумішкою дала змогу одержати таку саму продуктивність шишок, що і внесення перегною в межах 40 т/га раз на два роки.

Якщо порівнювати з абсолютним контролем (варіант без добрив), то ми спостерігаємо значну перевагу з урожайності як традиційної агротехнології, так і ґрунтозахисної. Тому, ефективне функціонування агробіоценозу хмеленасаджень можна забезпечити застосуванням нових еколого-безпечних ґрунтозахисних агроприймів, які базуються на утриманні міжрядь під сидеральними культурами та внесенням у ґрунт суперабсорбенту вологи Теравет. Агробіологічні способи утримання ґрунту

Таблиця 2. Імовірно-розрахункові втрати дерново-підзолистого ґрунту за дефляції за експрес-методом А.Б. Лавровського (2021–2023 рр.)

№ з/п	Варіанти дослідів	Втрати ґрунту за 1 год пилової бурі, т/га				Відхилення від абс. контролю ±		Відхилення від контролю ±	
		2021	2022	2023	середнє	т/га	%	т/га	%
1	ЗТ (без добрив, чорний пар) – абсолютний контроль	4,70	4,82	5,01	4,84	—	—	—	—
2	ЗТ (гній 40 т/га + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ , чорний пар) – контроль	4,73	4,74	4,80	4,76	–0,08	–1,6	—	—
3	ЗТ (гній 40 т/га + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet 8г, чорний пар)	4,73	4,82	4,97	4,84	0	0	0,08	1,7
4	ГТ (гірчиця + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	0,13	0,18	0,20	0,17	–4,67	–96,5	–4,59	–96,5
5	ГТ (редька олійна + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	0,13	0,19	0,20	0,17	–4,67	–96,5	–4,59	–96,5
6	ГТ (пелюшко-вівсяна суміш + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	0,12	0,16	0,18	0,15	–4,69	–96,9	–4,51	–96,8
НІР ₀₅		0,22	0,21	0,13	—	—	—	—	—

Таблиця 3. Урожайність сухих шишок хмелю (2021–2023 рр.)

№ п/п	Варіанти дослідів	Урожайність, т/га				Відхилення від абс. контролю ±		Відхилення від контролю ±	
		2021	2022	2023	середнє	т/га	%	т/га	%
1	ЗТ (без добрив, чорний пар) — абсолютний контроль	0,51	0,62	0,47	0,53	—	—	—	—
2	ЗТ (гній 40 т/га + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ , чорний пар) — контроль	1,50	1,65	1,73	1,63	1,10	207	—	—
3	ЗТ (гній 40 т/га + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet 8г, чорний пар)	1,61	1,76	1,80	1,72	1,19	224	0,09	5
4	ГТ (гірчиця + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	1,44	1,67	1,71	1,61	1,08	204	-0,02	-1
5	ГТ (редька олійна + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	1,35	1,59	1,64	1,53	1,00	189	-0,10	-6
6	ГТ (пелюшко-вівсяна суміш + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	1,47	1,73	1,79	1,67	1,14	215	0,04	2
НІР ₀₅		0,16	0,11	0,09	—	—	—	—	—

дають можливість зменшити антропогенне навантаження на екосистему хмільника, підтримуючи стабільну продуктивність, природний процес ґрунтовідродження, попереджають дефляційно небезпечні проце-

си на легких дерново-підзолистих ґрунтах, а з продуктивності одержаної хмелесировини наближаються до традиційної технології.

Дані щодо вмісту альфа-кислот у шишках хмелю (табл. 4) вказують на те, що в

Таблиця 4. Вміст альфа-кислот у шишках хмелю (2021–2023 рр.)

№ п/п	Варіанти дослідів	Вміст α-кислот, % (на абсолютно суху речовину)				Відхилення від абс. контролю ±		Відхилення від контролю ±	
		2021	2022	2023	середнє	%*	%	%*	%
1	ЗТ (без добрив, чорний пар) — абсолютний контроль	9,1	9,1	9,1	9,1	—	—	—	—
2	ЗТ (гній 40 т/га + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ , чорний пар) — контроль	8,6	8,6	8,9	8,7	-0,4	4,4	—	—
3	ЗТ (гній 40 т/га + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet 8г, чорний пар)	8,7	8,7	8,9	8,8	-0,3	3,3	0,1	1,1
4	ГТ (гірчиця + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	8,9	8,9	9,1	9,0	-0,1	1,1	0,3	3,4
5	ГТ (редька олійна + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	9,0	9,0	9,1	9,0	-0,1	1,1	0,3	3,4
6	ГТ (пелюшко-вівсяна суміш + N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₄₀ + Terawet, 8г)	9,0	9,0	9,1	9,0	-0,1	1,1	0,3	3,4
НІР ₀₅		0,18	0,18	0,19	—	—	—	—	—

Примітка: * — абсолютний показник.

абсолютних відсотках найвищий показник отримано на ґрунтозахисних варіантах із використанням гірчиці, редьки олійної та пелюшко-вівсяної сумішки як сидеральні культури — 8,8–9,0% та на неудобреному фоні — 9,1%.

За традиційної технології вирощування хмелю якісний вміст альфа-кислот у шишках мав найнижчий рівень — 8,7%.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що в агроєкосистемі хмелеплантації визначальними параметрами протидефляційної стійкості ґрунту є ступінь покриття міжрядь хмеленасаджень сидеральними культурами в еолово небезпечний період та зволоження ґрунту, яке знижує показники руйнування вітростійких агрегатів до ерозійно небезпечних розмірів — менше 1 мм. У середньому за три роки досліджень імовірно-розрахункові втрати ґрунту на варіантах загальноприйнятої технології за рахунок дефляції досягали 4,76–4,84 т/га, ґрунтозахисні агро-технології майже на 100% запобігали цим процесам.

2. Досліджено, що внесення суперабсорбенту Теравет більш продуктивно сприяло накопиченню вологи у фазі інтенсивного росту як у 0–20, так і в 0–50 см шарі ґрунту. Перевага порівняно з варіантами без застосування суперабсорбенту становила на окремих варіантах до 46% у 0–50 см шарі ґрунту. Аналогічні результати маємо

і в період формування шишки та технічної стиглості.

3. Отримано результати врожайності зеленої маси сидеральних культур у міжряддях хмеленасаджень у середньому за три роки досліджень, які засвідчують, що найвищі показники зафіксовано в редьки олійної — 277 ц/га, найнижча врожайність у пелюшко-вівсяної сумішки — 206 ц/га. Однак позитивним є той факт, що пелюшка дає можливість збагатити ґрунт азотом, необхідним для формування врожаю хмелю. Маса гірчиці була на рівні 244 ц/га.

4. Встановлено, що традиційна технологія вирощування хмелю порівняно з варіантами ґрунтозахисної практично не переважала з продуктивності культури. Якщо врожай шишок за традиційної технології вирощування становив 1,63–1,72 т/га, то ґрунтозахисна технологія вирощування реалізувала себе в межах 1,53–1,67 т/га шишок хмелю. Сидерація міжрядь хмеленасаджень пелюшко-вівсяною сумішкою дала змогу одержати таку саму продуктивність шишок, що і внесення перегною в межах 40 т/га раз на два роки. Якщо порівнювати з абсолютним контролем (варіант без добрив), то ми спостерігаємо значну перевагу з урожайності як традиційної агротехнології, так і ґрунтозахисної.

5. У середньому за три роки пріоритет із накопичення альфа-кислот виявлено на варіантах ґрунтозахисних агротехнологій, порівняно з традиційною приріст сягав 0,3 абсолютних відсотки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jerry, L. Hatfield, Mannava, V. K., & Sivakumar, John H. (2018). *Agroclimatology: Linking Agriculture to Climate* (Vol. 60). DOI: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr60>.
2. Elham, Sadat Abrisham (2018). Effects of a super absorbent polymer on soil properties and plant growth for use in land reclamation. *Arid Land Research and Management*, 32, 4, 407–420. DOI: <https://doi.org/10.1080/15324982.2018.1506526>.
3. Fang, Yang (2020). Effects of Super-Absorbent Polymer on Soil Remediation and Crop Growth in Arid and Semi-Arid Areas. *Sustainability*, 12(18), 1–1.
4. Li, X. (2014). Effects of super-absorbent polymers on a soil–wheat (*Triticum aestivum* L.) system in the field. *Applied Soil Ecology*, 73, 58–63.
5. Montesano, F. F. (2015). Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 451–458.
6. Malik, S., Chaudhary, K., Malik, A., Punia, H., Sewhag, M., Berkesia, N., ... Boora, K. (2023). Superabsorbent Polymers as a Soil Amendment for Increasing Agriculture Production with Reducing Water Losses under Water Stress Condition. *Polymers*, 15(1), 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15010161>.
7. Yang, Y., Zhang, S., Wu, J., Gao, C., Lu, D. & Tang, D. W. S. (2022). Effect of long term application of super absorbent polymer on soil structure, soil enzyme activity, photosynthetic characteristics, water and nitrogen use of winter wheat. *Front. Plant*

- Sci.*, 13, 998494. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.998494>.
8. Palma, D., Lagos, O., Souto, C., Pérez, A., Quezada, L., Hirzel, J., ... Urbano, B. (2024). Evaluation of a Natural Superabsorbent Polymer on Water Retention Capacity in Coarse-Textured Soils. *Water*, 16(22), 3186. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16223186>.
 9. Huifang, Zheng; Peipei, Mei; Wending, Wang; Yulong, Yin; Haojie, Li; Mengyao, Zheng ... Zhenling, Cui (2023). Effects of super absorbent polymer on crop yield, water productivity and soil properties: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 282, 108290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108290>.
 10. Buchmann, C., Neff, J., Meyer, M., Bundschuh, M., & Steinmetz, Z. (2024). Superabsorbent polymers in soil: The new microplastics? *Cambridge Prisms: Plastics*, 2, e3. DOI: <https://doi.org/10.1017/plc.2024.2>.
 11. Новаковський, Л. Я. (Ред). (2015). *Довідник із землеустрою*. Київ: Аграрна наука.
 12. Тараріко, О. Г., Ільєнко, Т. В., Кучма, Т. Л., & Білоконь, О. А. (2021). Ерозія ґрунтів як чинник опустелювання агроландшафтів України. *Агро-екологічний журнал*, 3, 6–16. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2021.240316>.
 13. Borrelli, P. (2017). A New Assessment of Soil Loss Due to Wind Erosion in European Agricultural Soils Using a Quantitative Spatially Distributed Modeling Approach. *Land Degradation & Development*, 28, 335–344. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2588>.
 14. Borrelli, P. (2016). Towards a pan-European assessment of land susceptibility to wind erosion. *Land Degradation & Development*, 27(4), 1093–1105. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2318>.
 15. Borrelli, P. (2015). New Insights into the Geography and Modelling of Wind Erosion in the European Agricultural Land. Application of a Spatially Explicit Indicator of Land Susceptibility to Wind Erosion. *Sustainability*, 7(7), 8823–8836. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7078823>.
 16. Borrelli, P. (2014). Wind erosion susceptibility of European soils. *Geoderma*, 232, 471–478.
 17. Michael C., Daniway (2019). *Wind erosion and dust from US drylands: a review of causes, consequences, and solutions in a changing world. Ecosphere*. URL: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecs2.2650>.
 18. Vinje, E. Hops. URL: <https://www.planetnatural.com/growing-hops/>.
 19. Горобець, О. В., & Євпак, І. І. (2017). Тенденції зміни клімату у Житомирській області. *Кліматичні зміни та їх наслідки на території Житомирської області: зб. матеріалів XIII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених* (с. 153–157). Житомир.
 20. Лавровський, А. Б. (1989). *Експрес-метод визначення втрати ґрунту та води при ерозійних процесах*. Луганськ. Інститут захисту ґрунтів від ерозії.
 21. Бойко, П. И., & Коваленко, Н. П. (2017). Как правильно выбрать и использовать сидераты. *Пропозиція*, 1, 104–106.
 22. Стрельченко, В. П. (1999). Особливості програмування агроecosистем Полісся. *Вісник аграрної науки*, 10, 21–24.
 23. Стрельченко, В. П. (2000). Відтворення гумусу в агроecosистемах Полісся. *Вісник аграрної науки*, 7, 9–13.

Стаття надійшла до редакції журналу 19.08.2025

ПРОСТОРОВА МІНЛИВІСТЬ ВМІСТУ РУХОМИХ ФОРМ КАДМІЮ У ҐРУНТАХ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛ. ЗА ВОЄННОГО ВПЛИВУ

Р.П. Паламарчук¹, О.М. Грищенко¹, Ю.М. Яценко¹,
В.М. Нечитайло², О.В. Міненко²

¹ Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України» (м. Київ, Україна)

e-mail: prp777@ukr.net; ORCID: 0000-0002-5965-1305

e-mail: grischenkoel@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1241-7183

e-mail: derjgrunt@ukr.net; ORCID: 0009-0006-3402-3093

² 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: 0009-0001-6366-6155;

ORCID: 0009-0009-0825-6426

У роботі проаналізовано результати агрохімічного обстеження земель сільськогосподарського призначення, що зазнали впливу бойових дій на території Ізюмського, Харківського та Чугуївського р-нів Харківської обл. Ґрунти досліджених ділянок характеризуються високою та середньою природною родючістю, частина з них віднесена до категорії особливо цінних ґрунтів Степової Лівобережної провінції. За результатами проведених досліджень встановлено істотне підвищення вмісту рухомих сполук кадмію в ґрунтах обстежених ділянок у 3,2 раза порівняно з довоєнним рівнем (0,05 мг/кг). Просторова нерівномірність розподілу елемента відображає як інтенсивність бойових дій, так і вплив локальних ґрунтових властивостей на міграцію важких металів. Встановлено, що серед 16 обстежених ділянок лише одна за середньозваженим вмістом рухомих сполук кадмію (0,07 мг/кг) може бути віднесена до незабруднених. Три ділянки мають помірний рівень забруднення (0,20 мг/кг), а дванадцять — слабкий (0,14–0,17 мг/кг) рівень забруднення. Розподіл площ за рівнями забруднення показав, що 69,1% обстежених земель характеризуються слабким рівнем, 24,0% — помірним, а 6,9% площ залишаються умовно чистими, без виявленого забруднення рухомих сполуками кадмію. Перевищення гранично допустимої концентрації (0,7 мг/кг) не зафіксовано, що свідчить про відносно безпечний рівень забруднення та відсутність екологічного ризику для подальшого сільськогосподарського використання. Просторова неоднорідність вмісту кадмію вказує на локальний характер його накопичення, зумовлений впливом техногенних джерел. Основними чинниками цього впливу є ведення активних бойових дій — детонація боєприпасів, згоряння військової техніки, руйнування інженерних споруд та промислових об'єктів, у конструкційних матеріалах яких використовуються кадмієві сплави та захисні покриття. Хоча поточний рівень забруднення не становить безпосередньої екологічної загрози, результати досліджень підкреслюють необхідність проведення системного моніторингу для відстеження динаміки міграції кадмію у часі та просторових масштабах, особливо в районах з локальними осередками забруднення.

Ключові слова: агрохімічне обстеження, гранично допустима концентрація, ґрунт, мілітарні дії, моніторинг, рівень забруднення.

ВСТУП

Кадмій — це важкий метал із високою токсичністю та тривалим періодом напіввиведення з організму людини, який може становити від кількох років до десятиліть. Основними антропогенними джерелами

забруднення кадмієм є видобуток і збагачення руд, металургійне виробництво, застосування мінеральних добрив у сільському господарстві (особливо фосфорних) і промислові викиди. З огляду на здатність до біогеохімічного перенесення у ланцюгу ґрунт — рослина — людина, кадмій становить значну загрозу для продовольчої

© Р.П. Паламарчук, О.М. Грищенко, Ю.М. Яценко,
В.М. Нечитайло, О.В. Міненко, 2025

безпеки та здоров'я населення [1]. Зокрема, Cd накопичується в кортикальному шарі нирок і спричиняє нефротоксичність, демінералізацію кісткової тканини та підвищує ризик серцево-судинних захворювань, а за довготривалого впливу проявляє потенційну канцерогенність [2].

Біодоступність Cd у ґрунтах визначається рівнем рН, вмістом органічної речовини, окисно-відновними умовами та концентрацією конкурентних іонів (Zn, Ca). У кислих ґрунтах кадмій перебуває у більш рухомій формі та легше засвоюється кореневою системою рослин, що підвищує ризик його накопичення у зернових і овочевих культурах [3].

Основними шляхами надходження кадмію (Cd) до організму людини є харчовий — через споживання продуктів, отриманих із забруднених зернових культур, коренеплодів, листових овочів, а також м'ясо-молочних продуктів у разі засмічення сіножатей і пасовищ та інгаляційний — внаслідок вдихання пилу, промислових викидів і тютюнового диму [4; 5]. Сукупна дія цих чинників зумовлює високий токсикологічний ризик кадмію, що визначає його як один із пріоритетних елементів екоотоксикологічного моніторингу довкілля та ключовий об'єкт для формування науково обґрунтованої політики у сфері громадського здоров'я.

З початком російського вторгнення на територію України зросла небезпека механічної, хімічної та фізичної деградації ґрунтів унаслідок бойових дій. Рівні забруднення ґрунтів важкими металами у таких зонах часто перевищують санітарно-гігієнічні норми, до того ж найвищі концентрації спостерігаються для Pb, Zn та Cd [6].

Мета і завдання дослідження — визначити вплив бойових дій на рівень забруднення земель сільськогосподарського призначення кадмієм та оцінити можливість їх подальшого використання для вирощування польових культур.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Кадмій входить до складу багатьох технічних матеріалів і компонентів боєприпа-

сів, тому бойові дії можуть сприяти його локалізації в ґрунті, підвищуючи екологічні ризики для агроєкосистем і продовольчої безпеки [7].

Основні механізми посилення забруднення включають: механічне руйнування (кратери, воронки) з вивільненням металів; аерогенне перенесення пилу та часток із уламків техніки [8]; руйнування гідротехнічних споруд і повторне залучання у кругообіг донних відкладів, збагачених важкими металами [9]. Ґрунти у зонах бойових дій можуть забруднюватися кадмієм із продуктів корозії, металів, згорілих матеріалів і уламків боєприпасів. Це підтверджують дослідження ґрунтів післявоєнних конфліктів в Іраку, Кувейті та Україні.

Так, R. Hamad, H. Balzter та K. Kolo [10], дослідивши забруднення ґрунтів Національного парку Халгурд-Сакран (Курдистан, Ірак) важкими металами (Cu, Pb, Zn, Ni, Co та Mn) після розмінування території контрольованими вибухами, встановили, що рівні забруднення варіюють від дуже високих до помірних. Автори дійшли висновку, що детонація мін спричинила накопичення залишків важких металів у ґрунті, небезпечних для рослинності, тварин і людини.

T. Hussain та M.A. Gondal [11] довели, що після війни у Перській затоці 1990-х років на Близькому Сході спостерігається значне розповсюдження важких металів (до 60 км) через випадання атмосферних опадів із хмар, утворених під час нафтових пожеж у Кувейті.

За даними Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України», у зонах бойових дій Сумського та Охтирського р-нів Сумської обл. виявлено перевищення вмісту кадмію у 1,4 раза порівняно з фоновими значеннями [12].

O. Bonchkovskiy та співавт. [13] встановили, що всі проби ґрунтів, відібрані з вирв після вибухів, містили підвищені концентрації важких металів, зокрема Cu, Pb та Zn. Однак їхній вміст переважно перевищував фонові значення лише у 1,1–1,5 раза, що не виходить за межі гранично допустимих концентрацій (ГДК) в

Україні. Водночас місця падіння гелікоптерів і ракет демонстрували критичні рівні забруднення.

М. Solokha та співавт. [14] виявили підвищення вмісту важких металів у ґрунтах Харківської обл. у місцях розташування залишків військової техніки протягом 2023–2024 рр. Зокрема, в 2023 р. вміст сполук кадмію в окремих зразках ґрунту перевищував ГДК у 8,5 раза, а вже в 2024 р. — у 9,77 раза. Така негативна динаміка зумовлена міграцією кадмію у ґрунтового профілі внаслідок вимивання його сполук талими та дощовими водами, що сприяє їх поширенню за межі первинних осередків забруднення.

Отже, для оцінки потенційних екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням ґрунтів кадмієм у зонах бойових дій, необхідне системне проведення моніторингових досліджень агрохімічного стану ґрунтового покриву.

**МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ
ДОСЛІДЖЕНЬ**

Дослідження виконано відповідно до договору з Міністерством освіти і науки України ДЗ / 168-2025 від 12.02.2025 «Вивчення агрохімічного стану та впливу бойових дій на землях сільськогосподарського призначення для забезпечення сталого агропродукування».

Об'єктом досліджень були 318 проб ґрунту, відібраних із 16 земельних ділянок загальною площею 1389,3181 га, що зазнали впливу бойових дій на території Ізюмського, Харківського та Чугуївського р-нів Харківської обл. (табл. 1).

У табл. 2 наведено результати фіксації наслідків бойових дій на досліджуваних територіях, виявлених землевласниками після відходу російських окупаційних військ.

Ґрунти досліджуваних ділянок характеризуються високою та середньою природною родючістю. Окремі з них (53е, 54д, 54е, 58е) належать до особливо цінних ґрунтів Степової Лівобережної провінції (табл. 3).

Для підвищення точності оцінювання агрохімічного стану ґрунтового покриву застосовано деталізовану схему відбору проб. Земельні масиви поділяли на елементарні ділянки площею до 5 га, що істотно менше порівняно зі стандартною щільністю сітки під час агрохімічної паспортизації. Такий підхід забезпечує вищу просторову роздільну здатність, дає змогу точніше локалізувати осередки забруднення або деградації ґрунтів і формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо їх подальшого використання.

Відбір проб ґрунту здійснювали відповідно до вимог ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб», із застосуван-

Таблиця 1. Місця відбору проб ґрунту на території Харківської обл.

№ ділянки	Місце відбору
1	с. Миколаївка Оскільської ТГ Ізюмського р-ну
2, 3	с. Рідне Барвінківської ТГ Ізюмського р-ну
4, 5, 6	с-ще Рогань Роганської селищної громади Харківського р-ну
6, 7	с-ще Докучаєвське Роганської ТГ Харківського р-ну
8	с. Бригадирівка Ізюмської ТГ Ізюмського району
9	с-ще Малинівка Малинівської ТГ Чугуївського р-ну
10	с-ще Гракове Чкаловської ТГ Ізюмського р-ну
11, 12	с. Капитолівка Оскільської ТГ Ізюмського р-ну
13	с. Олександрівка Куньєвської ТГ Ізюмського р-ну
14	с. Левківка Ізюмської ТГ Ізюмського р-ну
15	с. Поляна Куньєвської ТГ Ізюмського р-ну
16	с. Комарівка Оскільської ТГ Ізюмського р-ну

Таблиця 2. Дані про ушкодження території внаслідок ведення бойових дій

№ ділянки	Інформація про мілітарний вплив
1	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, у тому числі касетними боеприпасами, пересування військової техніки. Виявлено значну кількість вивр завглибшки 40–50 см та діаметром до 1,5 м
2	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено 16 вивр завглибшки 1,0–1,5 м та діаметром 3–4 м, фортифікаційні споруди, сліди пожеж, розливи нафтопродуктів, знищену техніку та близько 760 протитанкових мін і касетних боеприпасів
3	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, детонація протитанкових мін, пересування військової техніки. Виявлено 10 вивр завглибшки 1,0–1,5 м та діаметром 3 м, фортифікаційні споруди, сліди пожеж, розливи нафтопродуктів, знищену техніку та близько 300 протитанкових мін і касетних боеприпасів
4	Артилерійські та мінометні обстріли. Виявлено незначну кількість вивр завглибшки до 1 м, залишки боеприпасів, зокрема касетні та їх носії
5	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, вибухи під час детонації мін і розтяжок, пересування військової техніки. Виявлено сліди пожеж, розливи нафтопродуктів
6	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено численні поверхневі пошкодження, 1 вивру завглибшки 0,5 м та діаметром 5 м, залишки фортифікаційних споруд, сліди пожеж, значну кількість осколків
7	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено численні поверхневі пошкодження, 3 виври завглибшки 0,7 м та діаметром близько 10 м, залишки фортифікаційних споруд, сліди пожеж, знищену техніку та значну кількість осколків
8	Артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено бліндажі та окопи, сліди пожеж
9	Мінування, авіаційні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено численні поверхневі пошкодження, 5 вивр завглибшки від 0,5 до 1 м та діаметром близько 1,5 м, значну кількість боеприпасів та їх залишків
10	Мінування, ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено 7 вивр завглибшки 0,5–1,0 м та завширшки 1–1,5 м, значну кількість боеприпасів
11, 12	Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено виври завглибшки до 1 м і завширшки 1,5 м, залишки зброї та боеприпасів
13	Обстріли, пересування військової техніки. Виявлено значну кількість вивр від касетних боеприпасів завглибшки близько 0,5 м і завширшки 1,5 м, залишки зброї та боеприпасів, зокрема фрагменти ракет
14	Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено капоніри, сліди пожеж, велику кількість виври завглибшки до 1,5 м і завширшки до 2 м, залишки зброї та боеприпасів, фрагменти ракет
15	Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено 5 вивр завглибшки до 0,8 м і завширшки до 1,5 м, залишки зброї та боеприпасів, фрагменти ракет
16	Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено 10 вивр завглибшки до 0,5 м і завширшки до 1,5 м, залишки зброї та боеприпасів, фрагменти ракет

Таблиця 3. Агровиробничі групи ґрунтів на обстежених ділянках

№ ділянки	Шифр та назва агровиробничої групи
1	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкаві і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 67е — чорноземи звичайні сильнозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті
2	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкаві і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 66е — чорноземи звичайні середньозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті
3	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкаві і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 66е — чорноземи звичайні середньозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті
4	54е — чорноземи типові середньогумусні важкосуглинкаві (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 55е — чорноземи типові і чорноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 56е — чорноземи типові і легкоглинисті і чорноземи сильнореградовані середньозмиті важкосуглинкаві
5	49е — темно-сірі опідзолені і реградовані ґрунти та чорноземи опідзолені і реградовані слабозмиті важкосуглинкаві, 54д — чорноземи типові середньогумусні середньосуглинкаві (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 54е — чорноземи типові середньогумусні важкосуглинкаві (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 55е — чорноземи типові і чорноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті
6, 7	54е — чорноземи типові середньогумусні важкосуглинкаві (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 55е — чорноземи типові і чорноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 56е — чорноземи типові і легкоглинисті і чорноземи сильнореградовані середньозмиті важкосуглинкаві
8	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкаві і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 66е — чорноземи звичайні середньозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 89е — чорноземи середньо- і сильносолонцюваті на щільних глинах слабозмиті важкосуглинкаві, 215е — розмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті ґрунти і відходи рихлих лесовидних порід
9	55е — чорноземи типові і чорноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 53е — чорноземи типові малогу́мусні та чорноземи сильнореградовані важкосуглинкаві (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 54е — чорноземи типові середньогумусні важкосуглинкаві (<i>особливо цінні ґрунти</i>)
10	53е — чорноземи типові малогу́мусні та чорноземи сильнореградовані важкосуглинкаві (<i>особливо цінні ґрунти</i>)
11	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкаві і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті
12	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкаві і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 67е — чорноземи звичайні сильнозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті
13	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкаві і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті
14	65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті
15, 16	65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкаві і легкоглинисті, 58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкаві і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>)

ням сучасного GPS-обладнання для фіксації координат точок відбору. Проби відбирали з орного шару (0–30 см), який є репрезентативним для оцінки техногенного забруднення, оскільки саме в цьому горизонті зосереджуються основні процеси акумуляції рухомих форм важких металів і відбувається їхній контакт із кореневими системами рослин.

Лабораторний аналіз проводили в атестованій лабораторії Північно-східного міжрегіонального центру ДУ «Держґрунтоохорона», сертифікованій відповідно до вимог ДСТУ ISO 10012:2025. Визначення вмісту рухомих сполук кадмію у ґрунтах виконували згідно з чинним нормативно-методичним документом ДСТУ 4770.3:2007 [15].

Оцінку еколого-токсикологічного стану ґрунтів за вмістом рухомих сполук кадмію та визначення придатності земельних ділянок для вирощування сільськогосподарських культур виконували шляхом порівняння фактичних концентрацій із показниками довоєнного періоду, ГДК відповідно до чинних нормативів [16] та групування ґрунтів за вмістом рухомих форм елементів-забруднювачів [17].

Для оцінки однорідності вибірки та достовірності отриманих середніх значень визначали коефіцієнт варіації (V , %), який відображає ступінь розсіювання окремих показників відносно середнього арифметичного та слугує критерієм статистичної однорідності даних. Згідно з класифікацією, варіація вважається: слабкою за $V \leq 5\%$, помірною — 6–10%, значною — 10–20%, великою — 21–50%, дуже великою — $V > 50\%$.

Статистичну обробку експериментальних даних проводили із застосуванням програмних пакетів Microsoft Excel та Statistica 6.0, що забезпечувало коректність розрахунків, перевірку достовірності результатів і побудову аналітичних залежностей між досліджуваними показниками.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Кадмій (Cd) належить до високотоксичних важких металів із вираженою здат-

ністю до біоаккумуляції в екосистемах. Він легко поглинається рослинами, особливо зерновими культурами та овочами, переходить у харчовий ланцюг і становить потенційну небезпеку для здоров'я людини. Надходження кадмію в ґрунт може відбуватися як внаслідок природних процесів (вивітрювання мінералів, атмосферні опади), так і через антропогенний вплив, зокрема, бойові дії.

В умовах збройних конфліктів одним із основних джерел надходження кадмію (Cd) у довкілля є детонація боеприпасів, згоряння військової техніки, а також руйнування інженерних споруд і промислових об'єктів, у конструкціях яких застосовуються кадмієві сплави та захисні покриття. Внаслідок цих процесів формується локальне забруднення ґрунтів рухомими формами кадмію — водорозчинними та слабкозв'язаними сполуками, які характеризуються високою мобільністю, біодоступністю та значним рівнем екоотоксичності.

За результатами досліджень встановлено, що середньозважений уміст кадмію в ґрунтах обстежених територій становить 0,16 мг/кг, що відповідає слабкому рівню забруднення. Помірний рівень забруднення зафіксовано на трьох ділянках (№№ 2, 3, 15), де середньозважений уміст кадмію досягав 0,20 мг/кг. Слабкий рівень забруднення спостерігається на більшості ділянок (12 із 16), зі значеннями у межах 0,10–0,17 мг/кг, тоді як на ділянці № 7 концентрація елемента була найменшою — 0,07 мг/кг, що свідчить про відсутність перевищення фонових значень (табл. 4).

У межах елементарних ділянок вміст рухомих сполук кадмію коливався від 0,05 до 0,33 мг/кг, а коефіцієнт варіації становив — від 9,9 до 70,3%. Такий широкий діапазон свідчить про виражену просторову неоднорідність розподілу рухомих сполук кадмію у ґрунтовому покриві.

Найбільшу варіабельність (70,3%) зафіксовано в межах землеводін с-ща Рогань Роганської селищної громади Харківського р-ну (ділянка № 5), що, ймовірно, зумовлено наявністю локальних осередків накопичення кадмію у місцях руйнувань,

Таблиця 4. Вміст рухомих сполук кадмію у ґрунтах земельних ділянок, які зазнали впливу бойових дій на території Харківської обл.

№ ділянки	Площа ділянки, га	Середньозважений вміст, мг/кг ґрунту	Рівень забруднення	Стандартна помилка	Середньоквадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації	Min	Max
1	95,5780	0,15	Слабке	0,01	0,04	23,9	0,09	0,24
2	38,2468	0,20	Помірне	0,01	0,02	9,9	0,16	0,22
3	16,7096	0,20	Помірне	0,01	0,03	14,9	0,17	0,23
4	50,0000	0,17	Слабке	0,01	0,04	22,3	0,13	0,23
5	40,0000	0,11	Слабке	0,02	0,08	70,3	0,04	0,33
6	54,4026	0,10	Слабке	0,01	0,04	37,6	0,06	0,18
7	27,7619	0,07	—	0,01	0,02	29,5	0,05	0,11
8	279,4175	0,16	Слабке	0,01	0,04	25,3	0,09	0,20
9	101,3783	0,17	Слабке	0,01	0,04	25,6	0,10	0,22
10	96,2857	0,16	Слабке	0,01	0,04	22,4	0,11	0,23
11	31,9314	0,16	Слабке	0,01	0,03	19,8	0,10	0,19
12	89,5741	0,15	Слабке	0,01	0,04	26,1	0,09	0,25
13	136,3257	0,17	Слабке	0,01	0,03	16,4	0,13	0,22
14	140,0085	0,15	Слабке	0,01	0,03	21,1	0,10	0,21
15	136,703	0,20	Помірне	0,01	0,03	14,8	0,10	0,23
16	54,9950	0,14	Слабке	0,01	0,04	28,5	0,09	0,23
Середньозважений вміст	1389,3181	0,16	Слабке					
Стандартна помилка		0,01						
Середньоквадратичне відхилення		0,04						
Коефіцієнт варіації		22,5						
Min		0,07						
Max		0,20						

вибухів або згорання військової техніки, а також морфогенетичними особливостями ґрунтів. На відміну від інших ділянок, представлених чорноземами, ця територія мала чергування чорноземів і темно-сірих опідзолених ґрунтів, які відзначаються нижчою буферною здатністю та меншою ємністю поглинання, що зменшує їхню здатність фіксувати важкі метали у верхньому горизонті. У більшості випадків коефіцієнт варіації перебував у межах 15–30%, що свідчить про помірну неоднорідність просторового розподілу кадмію.

Підвищена варіабельність може розглядатися як індикатор техногенного навантаження та просторової складності процесів розсіювання кадмію на територіях, що зазнали воєнного впливу.

За результатами досліджень встановлено, що переважають території зі слабким рівнем забруднення, які охоплюють близько 60–70% загальної площі досліджених ґрунтів. Помірний рівень забруднення зафіксовано приблизно на 25–30% площі, що вказує на локальний характер накопичення кадмію, переважно у зонах інтенсивного

воєнного впливу. Частка ділянок із мінімальним або відсутнім забрудненням є незначною (до 10%), що підтверджує масштабність впливу бойових дій на верхній (0–30 см) шар ґрунту (*рис.*).

Отже, виявлено істотне підвищення вмісту рухомих сполук кадмію у ґрунтах обстежених земельних ділянок у післявоєнний період порівняно з довоєнним станом (*табл. 5*). Після припинення бойових дій на даних територіях, середньозважений

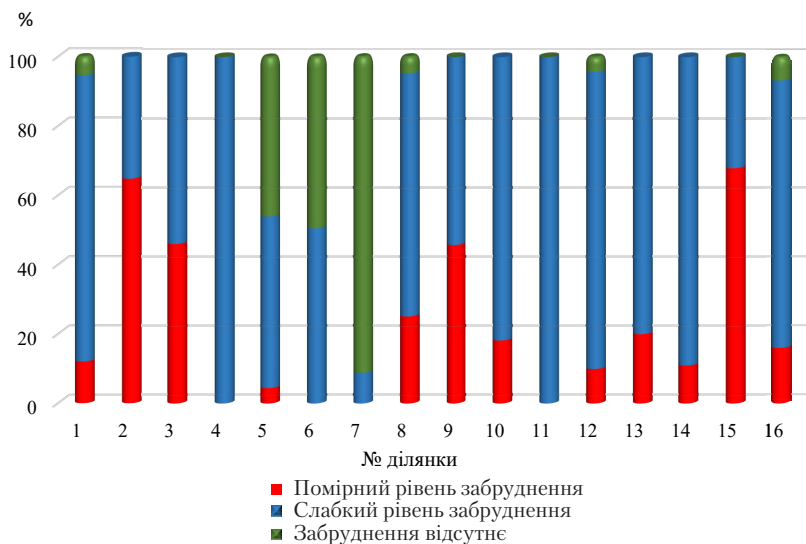
уміст кадмію становив 0,16 мг/кг ґрунту, що відповідає слабкому рівню забруднення. Коливання значень спостерігалось в межах 0,07–0,20 мг/кг, що свідчить про просторову неоднорідність розподілу забруднення, зумовлену різною інтенсивністю бойових дій та характером техногенного навантаження на окремих ділянках.

Для порівняння, у довоєнний період середньозважений вміст кадмію сягав лише 0,05 мг/кг, що засвідчило про відсутність

Таблиця 5. Порівняльна оцінка вмісту рухомих сполук кадмію у ґрунтах у довоєнний та післявоєнний періоди

№ ділянки	Уміст кадмію у післявоєнний період		Уміст кадмію у довоєнний період		± до контролю
	мг/кг	рівень забруднення	мг/кг	рівень забруднення	
1	0,15	Слабке*	0,03	Відсутнє	+ 0,12
2	0,20	Помірне	0,08	Відсутнє	+ 0,12
3	0,20	Помірне	0,10	Слабке	+ 0,10
4	0,17	Слабке	0,06	Відсутнє	+ 0,11
5	0,11	Слабке	0,06	Відсутнє	+ 0,05
6	0,10	Слабке	0,04	Відсутнє	+ 0,06
7	0,07	Відсутнє	0,02	Відсутнє	+ 0,05
8	0,16	Слабке	0,07	Відсутнє	+ 0,09
9	0,17	Слабке	0,06	Відсутнє	+ 0,11
10	0,16	Слабке	0,04	Відсутнє	+ 0,12
11	0,16	Слабке	0,01	Відсутнє	+ 0,15
12	0,15	Слабке	0,01	Відсутнє	+ 0,14
13	0,17	Слабке	0,08	Відсутнє	+ 0,09
14	0,15	Слабке	0,03	Відсутнє	+ 0,12
15	0,20	Помірне	0,07	Відсутнє	+ 0,13
16	0,14	Слабке	0,05	Відсутнє	+ 0,09
Середньозважений уміст	0,16	Слабке	0,05	Відсутнє	+ 0,11
Стандартна помилка	0,01		0,01		
Середньоквадратичне відхилення	0,04		0,03		
Коефіцієнт варіації	22,5		52,9		
Min	0,07		0,01		
Max	0,20		0,10		

Примітка: * – рівень забруднення ґрунту виділено кольором для швидкої оцінки ступеня забруднення на різних ділянках.



Розподіл площ досліджених ділянок за рівнем забруднення ґрунтів рухливими сполуками кадмію, %

забруднення та відповідало природному фоновому рівню для даного регіону.

У ґрунтах більшості досліджених ділянок (12 із 16) встановлено зростання концентрацій кадмію у межах 0,09–0,17 мг/кг, що вказує на антропогенне підсилення забруднення унаслідок воєнних дій. Лише на окремих ділянках (№№ 3, 5, 6, 7) збільшення показників було незначним (+0,05... +0,06 мг/кг), що може бути пов'язано з меншою інтенсивністю бойових дій або особливостями ґрунтового покриву, який обмежує міграцію важких металів.

Максимальні концентрації сполук кадмію зафіксовано на ділянках № 2, 3 та 15–0,20 мг/кг, що відповідає помірному рівню забруднення. Мінімальні значення вмісту кадмію спостерігалися на ділянці № 7 – 0,07 мг/кг, що свідчить про практично природний стан ґрунтового покриву та відсутність істотного техногенного впливу. Найвищі концентрації кадмію характерні для територій із вираженими ознаками воєнного навантаження – у місцях утворення вирв від вибухів, руйнування будівель, локального накопичення уламків військової техніки, згорілих матеріалів і залишків боєприпасів. Це підтверджує

чіткий просторовий зв'язок між інтенсивністю бойових дій та рівнем забруднення ґрунтового покриву важкими металами.

Коефіцієнт варіації післявоєнних показників становив 22,5%, що фіксує помірну неоднорідність просторового розподілу кадмію. Такий рівень варіабельності, ймовірно, зумовлений локальним характером надходження металів – у місцях детонації боєприпасів, руху важкої техніки чи розміщення польових укріплень. Для порівняння, у довоєнний період коефіцієнт варіації був значно вищим (52,9%), що пояснюється низьким фоновим умістом елемента та природною нерівномірністю його розподілу в ґрунтовому середовищі.

Проведені дослідження свідчать, що на більшості обстежених територій забруднення кадмієм має слабкий рівень, проте його наявність є практично на всіх ділянках, що вказує на ознаку широкомасштабного техногенного впливу внаслідок бойових дій.

Водночас збільшення вмісту кадмію є незначним, що можливо пов'язано з особливостями землекористування після припинення військових дій на цих територіях. Упродовж останніх двох років після завершення активних бойових дій території

знову використовуються для вирощування сільськогосподарських культур, здійснюється механічний обробіток ґрунту, внесення органічних і мінеральних добрив, а також зволоження та промивання під час атмосферних опадів. Унаслідок цих процесів частина рухомих сполук кадмію могла: мігрувати у нижні горизонти ґрунтового профілю, особливо на ділянках із легким гранулометричним складом, бути поглинутою рослинами, оскільки кадмій є високорухомих елементом, здатним легко переходити з ґрунтового розчину в кореневу систему, перерозподілитися у ґрунтовому середовищі внаслідок біохімічних та абіотичних процесів, що призводить до зниження його концентрації у верхньому шарі (0–30). Тому, сучасний рівень забруднення ґрунтів кадмієм можна розглядати як залишковий наслідок воєнного впливу, який зберігається попри поступове зниження концентрацій під дією природних процесів самоочищення ґрунтового середовища — міграції, сорбції та розбавлення у товщі ґрунту. Крім того, відновлення господарського використання територій сприяє частковому розсіюванню та зниженню локальних пікових концентрацій важких металів, що поступово вирівнює просторову неоднорідність забруднення.

Наявність помірно забруднених ділянок підкреслює неоднорідність просторового розподілу кадмію та потребу у подальшому детальному картуванні зон підвищених концентрацій.

ВИСНОВКИ

Встановлено чітку тенденцію до підвищення забруднення ґрунтів рухомими сполуками кадмію у післявоєнний період, що є наслідком воєнного впливу і потребує подальшого моніторингу та розроблення заходів із ремедіації і рекультивації порушених земель.

У межах обстежених ділянок вміст рухомих сполук кадмію не перевищує норма-

тивні значення ($\text{ГДК} = 0,7 \text{ мг/кг}$), однак на 93% площі виявлено ознаки слабого або помірного забруднення.

З огляду на високу рухомість сполук кадмію у ґрунтовому середовищі, незначні рівні забруднення можуть бути результатом промивання та перерозподілу металу у глибші горизонти, а також часткового поглинання його рослинністю упродовж двох років після припинення активних бойових дій. Це підтверджує тенденцію до поступового природного зниження концентрацій кадмію, хоча загальний рівень техногенного навантаження на ґрунтовий покрив залишається підвищеним.

Просторова неоднорідність розподілу кадмію вказує на комбінований характер забруднення: локальне підвищення концентрацій кадмію пов'язано із місцевими осередками техногенного впливу, тоді як загальна варіація показників визначається гетерогенністю ґрунтового покриття. Такий тип просторового розподілу є характерним для територій, що зазнали впливу бойових дій, де рівень забруднення формується під поєднаним впливом антропогенних і природних чинників. До антропогенних належать вибухи боєприпасів, згоряння військової техніки, руйнування інфраструктури, тоді як до природних — рельєф місцевості, гідрологічний режим, гранулометричний склад і буферна здатність ґрунтів, які визначають перерозподіл і міграцію сполук кадмію в межах ґрунтового профілю.

Підвищена варіабельність показників може розглядатися як індикатор техногенного навантаження та просторової складності процесів розсіювання кадмію на територіях, що зазнали воєнного впливу.

Хоча поточний рівень забруднення не створює безпосередньої екологічної загрози, потрібний системний моніторинг для оцінки динаміки міграції кадмію в часі, особливо у районах локальних осередків забруднення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Qu, F., & Zheng, W. (2024). Cadmium Exposure: Mechanisms and Pathways of Toxicity and Implica-

tions for Human Health. *Toxics*, 12(6), 388. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12060388>.

2. Davidova, S., Milushev, V., & Satchanska, G. (2024). The Mechanisms of Cadmium Toxicity in Living Organisms. *Toxics*, 12(12), 875. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12120875>.
3. Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>.
4. Charkiewicz, A. E., Omeljaniuk, W. J., Nowak, K., Garley, M., & Nikliński, J. (2023). Cadmium Toxicity and Health Effects-A Brief Summary. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 28(18), 6620. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28186620>.
5. Malik, I. S., Khan, Z. I., Ahmad, K., Nadeem, M., Akhtar, S., Ashfaq, A., & Ullah, S. (2025). Food chain risk assessment of cadmium accumulation and the relationships among diversely irrigated pasture-reared ruminants. *Sci. Rep.* 15, 34868. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13628-6>.
6. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>.
7. Shukla, S., Mbingwa, G., Khanna, S., Dalal, J., Sankhyam, D., Malik, A., & Badhwar, N. (2023). Environment and health hazards due to military metal pollution: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100857. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100857>.
8. Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., Melnyk, O., Kovalenko, I., Onychko, V., ... Solokha, M. (2024). Ecological Assessment of Heavy Metal Content in Ukrainian Soils. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 100–108. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/192669>.
9. Грищенко, О. М., Паламарчук, Р. П., Циганов, І. В., Сироватко, В. О., & Яценко, Ю. М. (2024). Уміст важких металів у донних відкладах осушеного Каховського водосховища. *Агро-екологічний журнал*, 1, 53–65. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299939>.
10. Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2019). Assessment of heavy metal release into the soil after mine clearing in Halgurd-Sakran National Park, Kurdistan, Iraq. *Environ Sci Pollut Res.*, 26, 1517–1536. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3597-3>.
11. Hussain, T., & Gondal, M. A. (2008). Monitoring and assessment of toxic metals in Gulf War oil spill contaminated soil using laser-induced breakdown spectroscopy. *Environ. Monit. Assess*, 136, 391–399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9694-2>.
12. Зайцев, Ю. О., Грищенко, О. М., Романова, С. А., & Зайцева, І. О. (2022). Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського р-нів Сумської обл. *Агро-екологічний журнал*, 3, 136–149. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>.
13. Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>.
14. Solokha, M., Melnyk, O., Cannon, N., Horton, M., Datsko O., & O'Connor, D. (2025). Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of The Total Environment*, 995, 180105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180105>.
15. ДСТУ 4770.3:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кадмію в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії (2007). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
16. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин. Постанова Кабінету Міністрів України № 1325 (2021). (Україна).
17. Яцук, І. П., & Балюк, С. А. (Ред.). (2019). *Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення. керівний нормативний документ*. 2-ге вид., допов. Київ.

Стаття надійшла до редакції журналу 05.10.2025

OPTIMIZATION OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF PHYTOLAMPS IN CLOSED SOIL TO IMPROVE FOOD STABILITY IN UKRAINE IN THE CONTEXT OF POSTWAR RECOVERY

O. Sadovyi, V. Mardzyavko, A. Rudenko

Миколаївський національний аграрний університет (м. Миколаїв, Україна)

email: sadovyuyos@mnaui.edu.ua; ORCID: 0000-0003-0424-6086

e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7327-9215

e-mail: andrey0911r@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5103-6412

У статті представлено результати експериментального дослідження впливу спектрального складу світлодіодного освітлення на ріст, розвиток та продуктивність овочевих культур у закритому ґрунті. Актуальність теми зумовлена значними втратами врожайності у відкритому ґрунті, через кліматичні ризики, деградацію ґрунтів та нестабільність погодних умов, а також скороченням посівних площ унаслідок воєнних дій. Ці чинники знижують ефективність традиційного землеробства, обмежуючи можливість стабільного забезпечення населення якісними овочами. В умовах контрольованого середовища теплиці ризики втрат можна мінімізувати, особливо за застосування LED-фітоламп з адаптивним спектром, що допомагає оптимізувати фотосинтетичну активність рослин та підвищити ефективність використання енергії. Метою дослідження було визначення оптимальних спектральних параметрів освітлення для підвищення продуктивності помідорів (*Solanum lycopersicum*, сорт «Чумак») та салату (*Lactuca sativa*, сорт «Одеса 75»). Експеримент проводили у навчальній теплиці з використанням LED-фітоламп потужністю 100 Вт у чотирьох режимах: повний спектр (контроль), переважно синій, переважно червоний та комбінований зі включенням інфрачервоного (ІЧ) та ультрафіолетового (УФ) випромінювання. Протягом восьми тижнів вегетації виконували щотижневі вимірювання висоти рослин, площі листкової поверхні, маси біомаси, вмісту хлорофілу, кількості квіток, маси плодів і врожайності. Статистичну обробку здійснювали методом однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з рівнем значущості $p \leq 0,05$. Найбільш ефективним виявився комбінований спектр, який забезпечив максимальні показники врожайності помідорів ($4,9 \text{ кг/м}^2$) та біомаси салату (186 г/росл.), а також сприяв гармонійному розвитку вегетативних і генеративних органів. Синій спектр стимулював накопичення хлорофілу, але мав обмежений вплив на генеративні процеси, тоді як червоний посилював плодоношення, проте знижував вегетативний ріст. Отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивних LED-фітосистем із керованим спектром як інноваційного та енергоефективного інструменту для підвищення продуктивності овочевих культур у закритому ґрунті. Це має особливе значення для післявоєнного відновлення аграрного сектору України та зміцнення продовольчої безпеки країни.

Ключові слова: опитальне освітлення, LED-фітолампа, обмежені ресурси, овочеві культури, адаптивне агровирибництво, фотосинтез, тепличне вирибування.

INTRODUCTION

In the context of post-war reconstruction of Ukraine, a comprehensive approach to ensuring the country's food security is of particular relevance. An important component of this process is the modernization and activation of the agro-industrial sector, in particular in regions where, due to war destruction, mine danger or climate change, open soil has become unsuitable for traditional agriculture.

In this context, greenhouse vegetable growing acts as a strategically important direction, allowing for stable cultivation of vegetable products throughout the year. Greenhouse farms ensure uninterrupted supply of fresh vegetables, herbs and berries even in winter, thereby reducing dependence on imported products. This is especially critical in conditions of unstable logistics and currency fluctuations. In addition, the development of the greenhouse sector contributes to the

economic revitalization of the affected territories, enabling small and medium-sized businesses to restore agricultural production at lower costs than in the case of field farming. Therefore, investments in greenhouse farming are not only tactical, but also strategic in importance for restoring Ukraine's agricultural potential.

The effectiveness of growing vegetable crops in the closed ground largely depends on the characteristics of artificial lighting. Recent scientific works [1–5] confirm the significant influence of the spectral composition of light on the physiological processes of plants: photosynthesis, biomass formation, flowering and fruiting. Unlike natural lighting, phytolamps allow you to adjust the light parameters precisely, providing optimal growth conditions by controlling the radiation spectrum. This is especially important in Ukrainian conditions with short daylight hours, limited energy supply and the need for efficient use of resources. In this regard, the study of the reaction of plants to changes in the spectral composition of light becomes particularly relevant and contributes to the development of innovative technologies for sustainable greenhouse and vertical farming.

Modern LED phytolamps make it possible to create specialized spectral lighting modes with an emphasis on red (660 nm), blue (450 nm) and other ranges that affect plant photomorphogenesis [1]. At the same time, the effectiveness of various spectral combinations depends on the type of crop, its development phase, microclimate conditions and technological approach to cultivation. Despite the wide popularity of phytolamps in greenhouse production, it has not been sufficiently studied which spectral combinations are optimal for different phases of vegetable crop development. The issue of balancing high yields and energy efficiency of lighting systems remains unresolved. This necessitates the need for adaptive, energy-efficient solutions to ensure maximum productivity in closed ground conditions.

Therefore, the aim of the work is determination of optimal spectral modes of LED phytolamps for stimulating growth and gen-

erative indicators of tomatoes and lettuce in closed soil under conditions of limited resources, to improve food stability in Ukraine in conditions of post-war recovery.

ANALYSIS OF LATEST RESEARCH AND PUBLICATIONS

LED phytolamps for irradiating plants are no different in design from conventional LED lighting devices – emitting crystals, under the influence of electric current, generate a light flux of a certain wavelength.

The difference between phytolamps and LED devices is observed in the composition of the spectrum – not a narrow interval of warm white glow like incandescent lamps, but a wide range from ultraviolet to red rays [2]. This emitted spectrum is the main advantage of LED phytolamps for plants – LEDs emit light of the spectrums most needed by indoor plants.

Phytolamps are special light sources that mimic natural sunlight and provide plants with the necessary spectrum for their growth and development. They are especially useful in conditions where natural light is insufficient, such as in winter or when growing plants indoors.

Different light spectra have a significant impact on the photosynthetic activity of plants, and this issue has been studied actively in many scientific works. In [3], the authors R. Roberta, G. Cocetta and S. Proietti examine the mechanisms by which different spectral components of light – particularly the red, blue and green spectra – can enhance or reduce the efficiency of photosynthesis in plants. Their study emphasizes the importance of light interactions with plant photosystems at the chloroplast level, where the spectral composition of light directly affects the energy balance of the photosynthetic apparatus.

In the study [4] (S. Arena, T. Tsonev) examine in detail the influence of light spectra, in particular red and blue, on the photosynthetic activity of plants. The authors emphasize that, to optimize photosynthesis, plants use different spectral components of light depending on intensity and environmental conditions.

They also emphasize the importance of the combined use of these spectra to maximize the efficiency of photosynthesis, since each spectrum stimulates different photosystems of plants.

In work [5] (L. Gennaro, B. Mele and V. Luca) focus on how the spectral composition of light, particularly the red and blue ranges, affects the rate of photosynthetic processes and overall plant growth. They focus on analyzing how changes in light intensity and spectrum can alter the productivity of photosynthesis under different conditions, particularly in laboratory experiments.

In the works [6; 7] the authors D. Shuangshuang, S. Pengfei, I. Dyachenko and L. Romanenko investigated and analyzed the effect of light on photosynthetic activity with a special emphasis on the role of photosynthetic pigments such as chlorophyll and carotenoids. The studies showed how different light spectra affect energy production in chloroplasts, which is critical for efficient photosynthesis. At the same time, it was shown that certain spectral components could both cause stress in plants and stimulate their activity under favorable conditions.

Research [8] by M. Haidekker, K. Dong and E. Mattos presented us with methods for assessing photosynthesis by measuring chlorophyll fluorescence, an accurate indicator of photosynthetic activity. They describe how different light spectra change fluorescence parameters, allowing precise measurements of the efficiency of photosynthetic processes. In particular, chlorophyll fluorescence is a very sensitive indicator for studying how light of different wavelengths affects photosynthesis.

Overall, these studies confirm that the spectral composition of light is an important factor for optimizing photosynthetic processes. The red and blue spectra are particularly important for stimulating the photosystem. Therefore, the correct use of the spectral characteristics of light is an important prerequisite for increasing yields, especially under artificial lighting conditions, such as in greenhouses or vertical farming systems.

Therefore, after analyzing the results of these works, it is possible to present new

methods of plant irradiation in greenhouse conditions, which involve the optimal combination of spectral components, taking into account energy efficiency, to increase yield.

MATERIALS AND RESEARCH METHODS

The study used four spectral modes of LED phytolamps (full, blue, red and combined spectrum with IR and UV components), which were applied to tomatoes of the Chumak variety and lettuce of the Odesa 75 variety in a training greenhouse. The lamp power was 100 W, the distance to the plants was 25–30 cm, the photoperiod was 16 h/day, the light flux intensity was 400–700 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ depending on the growth phase. All plants were grown in a peat-cocconut mixture (pH 5.8–6.2, EC 1.8–2.2 mS/cm) under standard agrotechnical conditions (t° during the day $23 \pm 1^\circ\text{C}$, at night $18 \pm 1^\circ\text{C}$; humidity 60–70%; drip irrigation). In each variant, 3 replicates were planted: 10 tomato plants and 15 lettuce plants.

During 8 weeks, height, number of leaves, leaf surface area, biomass mass, number of flowers, fruit mass, yield, chlorophyll content (according to Arnon) [9] and dry matter were determined. The selection of indicators took into account the biological characteristics of crops: for tomato, mainly generative parameters (number of flowers, fruit mass, yield) were evaluated, while for lettuce – vegetative (leaf surface, biomass, dry matter content). This made it possible to objectively assess the impact of spectral modes of LED phytolamps on the economic value of crops.

Statistical analysis of the results was performed using one-way ANOVA with a significance level of $p \leq 0.05$ for each culture separately. The least significant difference (LSD) test was used to determine the significance of differences between mean values [10; 11].

RESULTS AND DISCUSSION

Based on studies [11; 12], diagrams (Fig. 1, a) were constructed, which illustrate the influence of light waves of different lengths on the photosynthetic activity of plants. The diagrams show that blue light

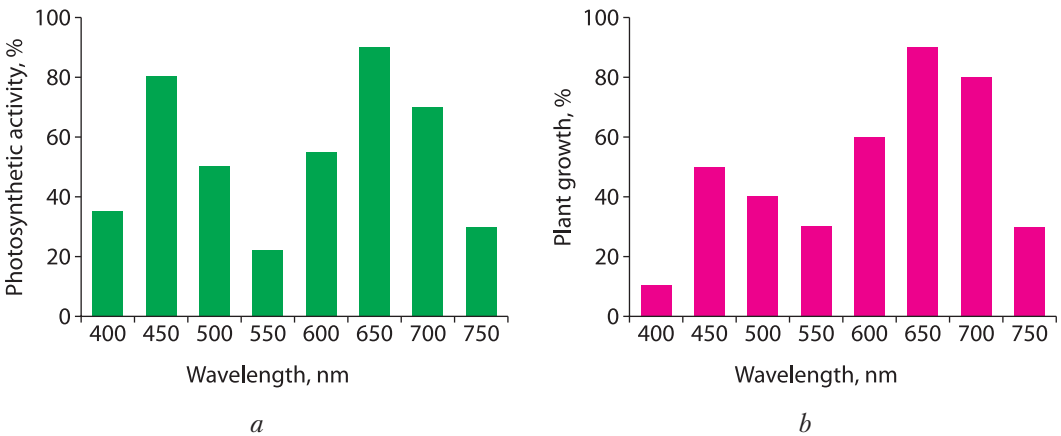


Fig. 1. Characteristics of light influence:

a – influence of light spectrum on photosynthesis; *b* – influence of light wavelength on plant growth

(approximately 450 nm) and red light (approximately 650 nm) are most effective in stimulating photosynthesis. According to the results of the study [13], we also constructed a graph (Fig. 1, *b*), which reflects the general relationship between the wavelength of light and plant growth.

The greatest growth is observed in the red (650–700 nm) and blue (450 nm) spectra, which correspond to the main photosynthetically active ranges. Thus, it makes sense to apply the combined use of these spectra in phytolamps, providing a comprehensive stimulation of growth and productive processes, which can be the basis for effective greenhouse production in the conditions of modern agricultural technologies.

Table 1. Experimental lighting options

Version	Spectrum type	Spectral ratio (%)
Option I	Full spectrum	100% (380–780 nm)
Option II	Mostly blue	70% blue, 30% red
Option III	Mostly red	70% red, 30% blue
Option IV	Combined with IR and UV	50% red, 30% blue, 10% IR, 10% UV

In accordance with the purpose of this work, we conducted experimental studies on the influence of the spectral composition of LED phytolamps on the growth, development and yield of vegetable crops on the basis of a training greenhouse. Tomatoes (*Solanum lycopersicum* variety «Chumak») and leaf lettuce (*Lactuca sativa* variety «Odesa 75») were selected as seedlings.

To conduct the experiment, 4 experimental lighting options were created using 100 W LED phytolamps installed at a height of 25 cm above the plants (Table 1).

All other growing conditions were standard and identical:

- Temperature: +23°C during the day, +18°C at night;
- Air humidity: 60–70%;
- Photoperiod: 16 hours/day;
- Substrate: peat-coconut mixture;
- Watering: drip, automated;
- Feeding: NPK12-12-18 solution with trace elements.

Parameters studied: saverage plant height (cm); number of true leaves (pcs); leaf surface area (cm²); weight of raw biomass (g); chlorophyll a+b content (according to Arnon) (mg/g); yield (kg/m²).

Data were collected weekly for 8 weeks of vegetation. The obtained data were subjected to statistical processing by one-way ANOVA

with a significance level of $p \leq 0.05$ for each crop separately.

The study found that the spectral composition of lighting significantly affects the growth, development and productivity of vegetable crops in closed ground. The summarized data on the experimental variants are presented in *Tables 2–3*.

Based on the summarized data in *Tables 2 and 3*, it is possible to construct diagrams showing influence of different spectral modes of LED phytolamps on plant height, chlorophyll content, and yield, *Fig. 2*.

The presented data show that the best results for all studied indicators were achieved when using a combined spectrum of lighting.

Table 2. Influence of the spectral composition of phytolamps on tomato performance

Indicator	Option I (full spectrum)	Option II (blue)	Option III (red)	Option IV (combined)
Plant height, cm	45.2 ± 2.0	38.6 ± 1.7	49.7 ± 2.3	52.4 ± 2.5
Number of flowers, pcs.	15 ± 2	11 ± 2	18 ± 3	20 ± 2
Fruit weight, g/plant	243 ± 15	211 ± 12	267 ± 17	288 ± 14
Yield, kg/m ²	4.1 ± 0.3	3.6 ± 0.2	4.5 ± 0.3	4.9 ± 0.3
Chlorophyll content, mg/g	1.82 ± 0.11	2.06 ± 0.13	1.67 ± 0.12	1.94 ± 0.10

Table 3. Influence of the spectral composition of phytolamps on lettuce performance

Indicator	Option I (full spectrum)	Option II (blue)	Option III (red)	Option IV (combined)
Plant height, cm	17.5 ± 1.3	14.9 ± 1.1	20.4 ± 1.5	22.1 ± 1.6
Leaf surface, cm ²	282 ± 14	316 ± 16	268 ± 13	305 ± 15
Mass of raw biomass, g	158 ± 9	134 ± 8	172 ± 10	186 ± 12
Chlorophyll content, mg/g	2.08 ± 0.12	2.47 ± 0.14	1.77 ± 0.11	2.38 ± 0.13
Dry residue, %	6.2 ± 0.3	6.5 ± 0.2	6.8 ± 0.3	7.1 ± 0.3

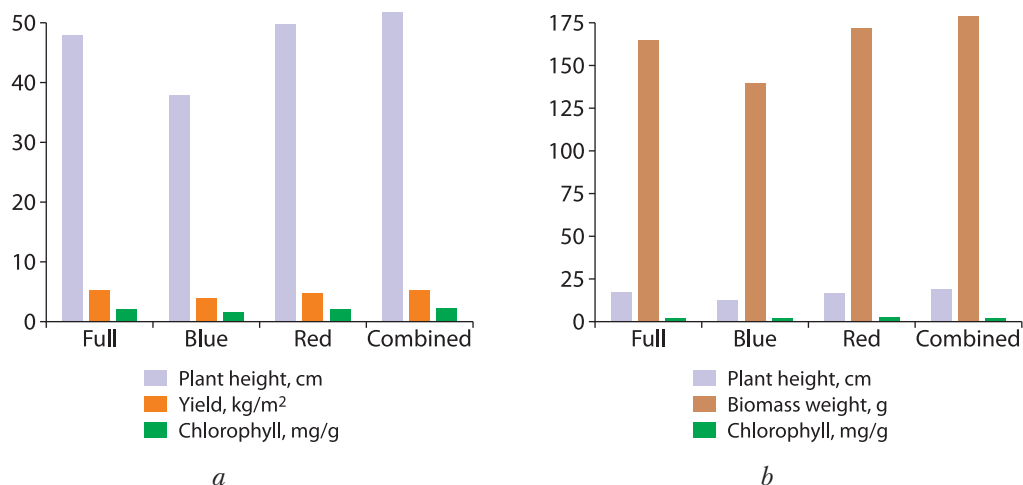


Fig. 2. Effect of the spectral composition of phytolamps on:
a – tomato; b – lettuce

Analysis of the results shows that it was with the combined spectrum that tomatoes demonstrated the highest values of key agro-physiological parameters. The yield in this variant reached 4.9 kg/m², which is 16.7% higher than the indicators of the control (full spectrum) lighting and 36% higher than the variant with a predominance of the blue spectrum.

A similar trend is observed in terms of fruit mass and the number of inflorescences. The increase in total biomass and the intensive growth of plant mass are explained by the synergistic effect of spectral components: the blue spectrum stimulates leaf development, red – promotes flowering and fruit formation, infrared improves root system growth, and ultraviolet activates plant resistance mechanisms.

Although blue light provided the highest chlorophyll concentration (2.06 mg/g), it was unable to compensate for the decrease in overall productivity, probably due to insufficient stimulation of generative processes. Red spectrum, on the contrary, significantly increased fruiting, but in the absence of sufficient vegetative support, it negatively affected the overall chlorophyll content and plant development rate.

In the case of lettuce, the advantage of the combined spectrum was also recorded, which provided the maximum indicators of biomass (186 g), height (22.1 cm) and dry matter content (7.1%), indicating harmonious growth and high quality of the product. The blue spectrum demonstrated the highest chlorophyll content (2.47 mg/g) and leaf surface area (316 cm²), but lagged behind in terms of crop weight. This confirms that the blue range is critically important in the early stages of plant development, but the presence of red and infrared light is necessary to ensure maximum productivity.

Therefore, using adaptive LED lighting with a combination of red, blue, infrared and ultraviolet spectra creates the most favorable conditions for the balanced development of both vegetative and generative organs of vegetable crops.

CONCLUSIONS

The results of the analysis of the spectral impact of LED phytolamps on the processes of vegetable crops confirm the key role of the combined spectrum in increasing the efficiency of greenhouse cultivation. It was found that the combination of red, blue, infrared and ultraviolet light contributes to the harmonious development at the main stages of plant vegetation. The use of the combined spectrum provides the highest tomato yield (up to 4.9 kg/m²) and lettuce biomass growth (up to 186 g per plant), while simultaneously improving quality characteristics such as chlorophyll and dry matter content.

Of particular note is the adaptability of LED phytolamps, which allow for rapid change of spectral ratio depending on the growth phase or external factors. Unlike traditional light sources, such lamps allow for precise adaptation of the spectrum in real time, which makes them not only agrotechnically efficient, but also economically beneficial for greenhouse farming. This allows for optimization of lighting, reduction of energy consumption, reduction of the need for additional equipment and increase of the overall profitability of growing crops in conditions of limited resources.

Therefore, the introduction of intelligent LED systems with adaptive spectral control should be considered as an important element of technological modernization of the greenhouse sector, especially relevant in the context of post-war reconstruction and restoration of the country's food security and quality.

REFERENCES

1. Мельник, Д., & Гринюк, О. (2024). Спектральна оптимізація LED-фітоламп для регуляції росту рослин у закритому ґрунті. *Інженерія аграрних систем*, 2(30), 41–48.
2. Сидоренко, В., & Литвиненко, Ю. (2023). Порівняльний аналіз спектральних характеристик фітоламп і традиційних джерел світла в аграрному виробництві. *Світло в агросистемах*, 3(11), 27–34.

3. Roberta, R., Cocetta, G., & Proietti, S. (2025). Beyond red and blue: Unveiling the hidden action of green wavelengths on plant physiology, metabolisms and gene regulation in horticultural crops. *Environmental and Experimental Botany*, 230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2025.106089>.
4. Arena, C., Tsonev, T., & Doneva, D. (2016). The effect of light quality on growth, photosynthesis, leaf anatomy and volatile isoprenoids of a monoterpene-emitting herbaceous species (*Solanum lycopersicum* L.) and an isoprene-emitting tree (*Platanus orientalis* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 130, 122–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.05.014>.
5. Gennaro, L., Mele, B., & Luca, V. (2020). The role of monochromatic red and blue light in tomato early photomorphogenesis and photosynthetic traits. *Environmental and Experimental Botany*, 179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104195>.
6. Shuangshuang, D., Pengfei, S., & Dacheng, W. (2023). Blue and red light proportion affects growth, nutritional composition, antioxidant properties and volatile compounds of *Toona sinensis* sprouts. *LWT*, 173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114400>.
7. Дяченко, І., & Романенко, Л. (2023). Вплив спектрального складу світла на фотосинтетичну активність та пігментну систему рослин. *Фізіологія рослин і клітинна біологія*, 2(16), 21–28.
8. Haidekker, M., Dong, K., & Mattos, E. (2022). A very low-cost pulse-amplitude modulated chlorophyll fluorometer. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107438>.
9. Kandpal, K. C., & Kumar, A. (2024). Migrating from invasive to noninvasive techniques for enhanced leaf chlorophyll content estimations efficiency. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 54(7), 2583–2598. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408347.2023.2188425>.
10. Montgomery, D. C., & Cahyono, S. T. (2022). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.
11. Fisher, R. A. (1935). *The Design of Experiments*. Oliver & Boyd, Edinburgh.
12. Tyystjärvi, E., & Herranen, M. (2018). Blue light reduces photosynthetic efficiency of cyanobacteria through an imbalance between photosystems I and II. *Photosynthesis Research*, 138, 103–116.
13. Zhang, C., & Porcar-Castell, A. (2019). Do all chlorophyll fluorescence emission wavelengths capture the spring recovery of photosynthesis in boreal evergreen foliage? *Plant, Cell & Environment*, 42, 2455–2469.
14. Mickens, M., & Torralba, M. (2017). Modeling light distribution within plant canopies using ray tracing and computational geometry techniques. *Frontiers in Plant Science*, 8, 805–917.

Стаття надійшла до редакції журналу 18.08.2025

РАДІОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МІСЦЕВИХ ДОБРИВ НА РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНІЙ ТЕРИТОРІЇ

М.М. Лазарєв, С.М. Єрмоленко

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

e-mail: laz_rev@i.ua; ORCID: 0000-0001-6286-0063

e-mail: ogorbachiev@ukr.net; ORCID: 0009-0003-8677-4938

У сучасних умовах актуальним є вивчення можливостей підвищення стійкості держави, зокрема продовольчої безпеки України, за рахунок залучення до аграрного виробництва радіоактивно забруднених земель виведених із використання після аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) законом України. Проблеми реабілітації радіоактивно забруднених після аварії територій розглядалися майже відразу по проведенні первинної оцінки масштабів радіоактивного забруднення. Вже впродовж 90-х років проведено науково-дослідні роботи щодо можливості отримання доброякісної сільськогосподарської продукції на території з різним рівнем радіоактивного забруднення і різними властивостями ґрунтів. Велику роль у зниженні радіоактивності рослинницької продукції відігравали мінеральні добрива, зокрема калійні та кальцієві добрива. Враховуючи ситуацію із військовими діями, тимчасові втрати територій, зокрема сільськогосподарських, здоров'я мінеральних добрив, пошук і наукове обґрунтування застосування більш доступних засобів, що можуть вплинути на надходження радіонуклідів із ґрунту у рослини, набуває особливого і важливого значення. Одним із заходів, що допомагає приватному сектору підтримувати родючість ґрунтів на присадибних ділянках є використання золи, що утворюється після спалювання деревини і сільських печак. На основі моніторингових досліджень визначено рівень радіоактивного забруднення деревної золи, що формується у приватних господарствах на забрудненій радіонуклідами території, оцінити її вплив на забруднення ^{137}Cs картоплі за внесення золи у ґрунт. У роботі проаналізовано наявну інформацію та отримані нові дані щодо радіоактивного забруднення деревної золи після спалювання деревини. Сформований об'єм золи, забрудненої радіоактивним цезієм, навесні вноситься у ґрунт під різні культури, переважно картоплю. Показано, що у низці випадків рівень радіоактивного забруднення золи в оселях межує і, навіть, перевищує критерій віднесення її до радіоактивних відходів ($>10 \text{ кБк/кг}$). Дослідження є продовженням попередніх трьох років, а одержані результати мали неоднозначну динаміку, тому ця робота відображає результати 5 років спостережень.

Ключові слова: цезій радіоактивний (^{137}Cs), зола деревна, щільність радіоактивного забруднення, питома активність ^{137}Cs , картопля.

ВСТУП

Враховуючи економічну ситуацію, що склалася в державі на сьогодні, населення, зокрема сільська спільнота радіоактивно забруднених територій Українського Полісся, змушена шукати більш «економічні» джерела енергії і використовує для обігріву особистих будівель у холодний період часу паливну деревину, що у поліських регіонах України має різні рівні радіонуклідного забруднення. Наслідком використання такої деревини є ризик отримання зольних залишків із концентруванням у них радіонуклідів. Враховуючи низку зольності де-

ревини, радіоактивність золи може у сотні разів перевищувати радіоактивність деревини, а зберігання такої золи і тим більш використання її як добрива може оцінюватися як додаткове джерело опромінення населення завдяки локальному підвищенню зовнішньої складової дози, так і формуванню внутрішньої дози опромінення за рахунок харчових продуктів, що виробляються на присадибних ділянках. Проблеми оцінки радіаційної ситуації на присадибних ділянках приватних господарств радіоактивно забруднених населених пунктів за останні 20 років майже не приділяється уваги ні з боку держави, ні з боку місцевих

органів влади. Є нечисельні наукові дослідження колективів Поліського національного університету, Інституту агроекології і природокористування НААН, НУБіП України. Тому на сьогодні відсутні чіткі уявлення щодо закономірностей впливу привнесення радіоактивної золи у ґрунт під городину: відсутні рекомендації щодо обмеження радіоактивності золи, що вноситься; співвідношення радіоактивності золи і ґрунту; накопичення додаткової радіоактивності різними сільськогосподарськими культурами тощо. Одним із перших обмежувальних параметрів щодо застосування місцевих добрив на радіоактивно забруднених територіях були опубліковані у книзі Б.С. Прістера із співавт. «Основи сільськогосподарської радіології» виданої у 1988 р., де запропоновано використовувати місцеві добрива з питомою активністю, що перевищує питому активність ґрунту не більш як у десять разів. Однак дані рекомендації стосувалися застосування органічних добрив (торф, гній) [1]. На той час, коли відбувалася тотальна газифікація сільських населених пунктів, зокрема на забрудненій радіонуклідами території, ця проблема не виглядала актуальною.

Наразі використання газу для опалення домівок у сільській місцевості майже припинено і застосовується виключно паливна деревина, а зола після спалювання вноситься у ґрунт на присадибних ділянках, що може призвести до збільшення радіонуклідного забруднення ділянки та додаткового внутрішнього опромінення людини внаслідок споживання продукції, отриманої з даних ділянок із підвищеним вмістом радіоактивного цезію [2; 3].

Мета дослідження — з'ясувати динаміку забруднення картоплі за ^{137}Cs за використання деревної золи з радіоактивно забрудненої лісової екосистеми як мінеральні добрива.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема радіоактивного забруднення лісових екосистем і деревної продукції в Україні після аварії на ЧАЕС досить

широко висвітлена у науковій літературі [4–7] і має декілька прикладних аспектів. Перша проблема пов'язана із радіологічними параметрами обмеження використання деревної продукції, що виробляється на забрудненій радіонуклідами території (ГНПАР-2005- гігієнічний норматив питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у деревині та продукції з деревини) [8; 9], що обмежують вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у паливній деревині (ПД) та паливних пучках/хмизі для особистих підсобних господарств на рівні 600 Бк/кг по ^{137}Cs і 60 Бк/кг по ^{90}Sr . Однак радіаційна ситуація на забрудненій радіонуклідами території, зокрема у північній частині Житомирської та Київської обл., останнім часом змінюється у бік підвищення питомої активності радіонуклідів у компонентах деревостану та зростання сумарного вмісту радіонуклідів у деревині [10]. Оцінювання динаміки зміни площ лісових ділянок, в яких буде можливе виробництво деревини з питомою активністю ^{137}Cs менше 600 Бк·кг⁻¹, показали, що нині для виробництва паливної деревини можна використовувати близько 60% всіх площ лісництва 2-ї зони Житомирської обл., через 10 років ця площа сягатиме до 69% і в 2037 р. становитиме 87% від загальної площі. Лише через 50 років у всіх лісництвах можливо буде заготовлювати паливну деревину без обмежень. Тобто з часом після аварії на ЧАЕС збільшаться площі лісових екосистем, де можна заготовляти деревину для палива відповідно до встановлених нормативів.

Існуючі нормативи були розраховані так, що в особистих підсобних господарствах за використання золи як добрива за таких рівнів забруднення паливної деревини, не буде відмічатися перевищення допустимих рівнів забруднення радіонуклідами сільськогосподарської продукції (картоплі) [11].

Другим обмежувальним чинником застосування деревної золи як добрива є «Рекомендації з ведення сільськогосподарського виробництва на забрудненій радіонуклідами території», де запропоновано використовувати золу, якщо питома

радіоактивність золи не перевищує питому активність ґрунту, в якій вона вноситься. Обидва обмеження мають досить наявні протиріччя: по-перше, є публікації, де розглядаються ці питання і стверджується, що ці нормативи є занадто жорсткими, зокрема по ^{90}Sr , тому що великі масиви лісу підпадають під заборону їх застосування як паливної деревини; по-друге, навіть за таких нормативів зола, що залишається після спалювання деревини, через низьку зольність має високу радіоактивність, що набагато перевищує питому активність ґрунту у більшості населених пунктів поліської зони і зола може бути додатковим джерелом опромінення населення [12; 13].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В експериментах використовували золу із вмістом ^{137}Cs , що відібрана в приватних господарствах населених пунктів Овруцького і Народицького р-нів Житомирської обл. під час виконання моніторингових досліджень [14].

Зразки золи вагою від 0,2 до 2 кг відбиралися безпосередньо у місцях утворення (печах, грубах та ін.).

Гамма-спектрометричні дослідження відібраних зразків золи проводились у лабораторії ядерно-фізичних методів аналізу і радіохімії УкрНДІСГР та на кафедрі загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності НУБіП України. Перед гамма-спектрометрією на вміст ^{137}Cs зразки золи було висушено до повітряно-сухого стану, просіяно через сито з діаметром отворів 1 мм та ретельно гомогенізовано.

Вимірювання питомої активності ^{137}Cs у попередньо підготовлених пробах золи здійснювалося на гамма-спектрометрі зі сцинтиляційним детектором СЕГ-001-63 (АКП, Україна). Вимірювання виконували в поліетиленових ємностях Марінеллі об'ємом 1000 см^3 та у ємностях Дента, об'ємом 130 см^3 . Похибка вимірювання знаходилася у діапазоні 8–11%, залежно від активності зразків.

Всього визначання вмісту ^{137}Cs було у 52 зразках золи паливної деревини, з яких

для подальшої роботи сформовано 4 зразки золи по 2 кг з активністю 1,3; 6,0; 8,0 і 13,0 кБк/кг.

З метою встановлення інтенсивності переходу ^{137}Cs з ґрунту у клубні картоплі за застосування радіоактивної золи як добрива використовували полігон, що сформований УкрНДІСГР НУБіП України у другій зоні радіоактивного забруднення (н. п. Христинівка Народицької ОТГ). За попередніми дослідженнями було визначено щільність радіоактивного забруднення ґрунту ^{137}Cs — 115 кБк/м^2 (питома активність $450\pm 60\text{ Бк/кг}$).

Площа елементарної ділянки у дослідях близько 3 м^2 ($1,75\text{ м} \times 1,75\text{ м}$). Ширина захисних смуг між елементарними ділянками — 0,5 м. Доза внесення золи на елементарних ділянках становила 1 т/га ($0,1\text{ кг/м}^2$), або $0,3\text{ кг/ділянка}$. Всього у кожному досліді було 6 варіантів у 3-кратній повторності.

Для оцінювання переходу ^{137}Cs у ланці ґрунт–рослина застосовували метод «спряжених» проб.

Зразки бульб картоплі у польовому досліді після досягнення стиглості відбиралися на елементарних ділянках з обліком усього врожаю кожного куща, поміщались у поліетиленові мішки та маркувалися. Після доставки в лабораторію, для кожної повторності дослідних варіантів було сформовано представницькі проби.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження забруднення ^{137}Cs деревної золи в приватних господарствах здійснено у 3 населених пунктах Овруцького (с. Бігунь, с. Можари, с. Піщаниця) та 2 населених пунктах Народицького р-нів (с-ще Народичі та Селець) Житомирської обл. проводили впродовж декількох років — 2017 р., 2022 р. і 2024 р. Дані населені пункти, знаходяться на різній відстані відносно ЧАЕС, на територіях із різною щільністю забруднення ^{137}Cs і у різних зонах радіоактивного забруднення відповідно до Закону України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивно-

Таблиця 1. Питома активність ^{137}Cs у деревній золі окремих населених пунктів північних районів Житомирської обл.

Область/район	Населений пункт	^{137}Cs , кБк/м ² [12]	Питома активність ^{137}Cs у золі, Бк/кг		
			2017 р.	2022 р.	2024 р.
Овруцький	с. Можари	43	4752±5338	6230±4640	5400±2200
	с. Піщаниця	93	3765±3842	4860±4880	4600±3200
	с. Бігунь	75	6722±5800	7600±5240	7000±3200
Народицький	с-ще Народичі	226	10901±10860	11900±10600	14000±8600
	с. Селець	230	12300±8860	16520±18600	15500±12000

го забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» [15] (табл. 1).

Як видно з результатів табл. 1 питома активність ^{137}Cs у зразках золи паливної деревини коливається у широкому діапазоні і тенденції щодо зниження активності радіонуклідів у деревній золі впродовж часу спостережень не спостерігається. Це підкреслює висновки співробітників НУБіП України, що площа лісових ділянок, в яких буде можливе виробництво деревини з питомою активністю ^{137}Cs менше 600 Бк·кг⁻¹ у другій зоні радіоактивного забруднення на початку ХХІ ст. становили на рівні 50–60% і збільшення таких площ буде відбуватися повільно сягаючи майже 90% у 2037 р. і лише через 30 років у всіх лісогосподарських підприємствах можна у майбутньому заготовляти паливну деревину без обмежень [10]. Все це свідчить про те, що ситуація із застосуванням радіоактивної золи на присадибних ділянках мешканців територій, що забруднені чорнобильськими радіонуклідами, буде ще тривати довгий час. Дана ситуація може бути пояснена тим, що на сьогодні відсутня організована заготівля паливної деревини для місцевого населення і часто мешканці заготовляють поряд із стовбурами дерев гілки, активність яких може істотно перевищувати радіоактивність стовбура [16; 17].

Результати, що представлені у табл. 1 показують, що у цих населених пунктах питома активність золи, що утворюється у печах сільських мешканців під час спалювання паливної деревини у 2022 і 2024 рр. дещо збільшилася порівняно із дослід-

женнями, що були проведені в 2017 р. До того ж у 2017 р. 4,5% відібраних зразків золи у приватних господарствах с. Можари за критерієм питомої активності ^{137}Cs (10 кБк/кг) є низькоактивними радіоактивними відходами відповідно до положень ОСПУ-2005 [18], а 2022 р. вказаний норматив перевищений у 7% приватних господарств досліджених населених пунктів. У населеному пункті Піщаниця цей показник у 2022 р. збільшився до 10% порівняно із 7% у 2017 р., у с-щі Народичі від 22% до 27%.

Радіоекологічні аспекти цієї проблеми поки що не знайшли дискусійного характеру у науковій літературі, але можна констатувати, що сільські будинки (вірніше печі) поступово перетворюються на сховище радіоактивних відходів, що залишаються від спалювання деревини. Другий аспект цієї проблеми стосується традиційного використання деревної золи з невідомими рівнями радіонуклідного забруднення сільським населенням як добрива-меліоранта для підвищення родючості ґрунту присадибних ділянок, на яких вирощують городину, переважно картоплю.

Якщо розглядати ситуацію, коли радіоактивна зола за тривалого її внесення в ґрунт під картоплю може розглядатися як джерело вторинного забруднення ґрунту і рослинної продукції, то така ситуація має відображатися на рівнях забруднення картоплі радіоактивним цезієм. Наші дослідження виявили, що у вищевказаних населених пунктах питома активність ^{137}Cs не перевищувала вимоги існуючих нормативів (ДР-06) [19].

З результатів представлених у *табл. 2* видно, що в жодному населеному пункті питома активність ^{137}Cs у бульбах не перевищує вимог державних гігієнічних нормативів — 60 Бк/кг і це за умов, коли мешканці цих населених пунктів регулярно використовують золу як добриво. Тобто правомірність рекомендацій щодо обмеження використання місцевих добрив із питомою активністю не вище за питому активність ґрунту виглядає занадто жорсткою. Питома активність ґрунту, на яких відбиралися проби бульб картоплі на торфових і дерново-підзолистих ґрунтах коливалась у межах 300–600 Бк/кг. Більш високі рівні забруднення картоплі пояснюються властивостями торфових ґрунтів, а саме високими коефіцієнтами переходу.

У *табл. 3* подані усереднені значення питомої активності ^{137}Cs у бульбах картоплі сорту Слав'янка на дерново-підзолистому ґрунті в умовах польового дослідження за застосування як добрива деревної золи з різними рівнями радіонуклідного забруднення.

Отже у *табл. 3* наочно представлено, що в 2022 р. рівень радіоактивного забруднення бульб картоплі у варіантах зі привнесенням додаткової активності разом із золою (питома активність золи 8,7 і 13,7 кБк/кг) був у 2–3 рази вищим за показники питомої активності картоплі на контрольній ділянці. Втім аналізуючи результати питомої активності ^{137}Cs у бульбах картоплі в 2023 і 2024 рр. можна зауважити, що цей показник продовжує бути високим у варіантах із максимальною

Таблиця 2. Питома активність ^{137}Cs у бульбах картоплі відібраних у критичних населених пунктах Рокитнівського рну Рівненської обл. та с-ща Народичі Житомирської обл. (середнє $\pm$ STD) (2022–2025 рр.)

Населені пункти	Динаміка питомої активності ^{137}Cs у бульбах, Бк/кг $\pm$ STD			
	2022 р.	2023 р.	2024 р.	2025 р.
<i>Рівненська обл. (торфові ґрунти)</i>				
с. Старе Село	16 $\pm$ 9	20 $\pm$ 15	14 $\pm$ 13	17 $\pm$ 10
с. Вежиця	17 $\pm$ 17	12 $\pm$ 6	15 $\pm$ 11	17 $\pm$ 17
с. Дроздинь	21 $\pm$ 12	24 $\pm$ 21	26 $\pm$ 20	22 $\pm$ 14
с. Переходичі	21 $\pm$ 11	11 $\pm$ 5	9 $\pm$ 3	23 $\pm$ 10
<i>Житомирська обл. (дерново-підзолисті ґрунти)</i>				
с-ще Народичі	2 $\pm$ 1	5 $\pm$ 1	4 $\pm$ 2	6 $\pm$ 2
с. Можари	12 $\pm$ 7	9 $\pm$ 5	8 $\pm$ 5	9 $\pm$ 2
с. Піщаниця	18 $\pm$ 6	15 $\pm$ 4	24 $\pm$ 12	18 $\pm$ 7

Таблиця 3. Питома активність ^{137}Cs у бульбах на дерново-підзолистому ґрунті для картоплі сорту Слав'янка в умовах польового дослідження за 2022–2024 рр. (середнє $\pm$ STD)

№ варіанта Питома активність ^{137}Cs у золі, Бк/кг	Доза внесення золи, т/га	Питома активність ^{137}Cs у бульбах, Бк/кг (2022 р.)	Питома активність ^{137}Cs у бульбах, Бк/кг (2023 р.)	Питома активність ^{137}Cs у бульбах, Бк/кг (2024 р.)
Контроль	1	1,6 $\pm$ 1,8	2,2 $\pm$ 2,0	2,6 $\pm$ 1,4
1390	1	3,7 $\pm$ 0,5	3,5 $\pm$ 1,8	3,8 $\pm$ 1,4
3500	1	4,0 $\pm$ 0,8	4,8 $\pm$ 2,0	5,4 $\pm$ 2,0
6700	1	5,2 $\pm$ 0,4	5,0 $\pm$ 1,6	6,0 $\pm$ 1,6
8700	1	6,4 $\pm$ 1,0	8,0 $\pm$ 1,9	7,0 $\pm$ 2,5
13700	1	9,0 $\pm$ 0,8	5,5 $\pm$ 1,6	8,5 $\pm$ 2,0

радіоактивністю ^{137}Cs у золі, але перевищення вимог ДР-06 не спостерігається. Тому привнесення радіоактивності (^{137}Cs) у ґрунт під картоплю із золою, радіоактивність якої в 10 разів перевищує радіоактивність ґрунту не приводить до достовірного збільшення радіоактивності картоплі. Зростання радіоактивності золи до 30 разів порівняно з питомою активністю ^{137}Cs у ґрунті зумовлює достовірне підвищення питомої активності радіоактивного ізотопу в картоплі. Враховуючи те, що питома активність картоплі у жодному варіанті не перевищувала вимоги ДР-06, то і 30-кратне збільшення питомої активності ^{137}Cs у золі над питомою радіоактивністю ґрунту не може слугувати обмеженням для її застосування на дерново-підзолистих ґрунтах зі щільністю радіоактивного забруднення ^{137}Cs 115 кБк/м², як у нашому досліді. Це питання не можна трактувати однозначно з точки зору впливу додаткового використання радіоактивної золи під різні сільськогосподарські культури, зокрема овочеві, але проблема заслуговує на увагу, особливо у часи військових дій, коли обмежений доступ до мінеральних добрив і калію зокрема. Відомо, що деревна зола є джерелом багатьох мінеральних речовин і застосування її у рекомендованих дозах 1 т на га може задовільнити фізіологічні потреби рослин у калії, якій є конкурентом для цезію, а здатність золи впливати на зменшення кислотності ґрунту, за рахунок лужно-земельних металів, сприяє зменшенню доступності радіонуклідів.

Зазначенні аспекти потребують проведення подальших досліджень та розроблення відповідних рекомендацій щодо поводження із забрудненою радіонуклідами золою.

ВИСНОВКИ

Зола є унікальним комплексним добривом і характеризується як джерело багатьох біогенних макро- та мікроелементів, прояв-

ляє властивості меліоративного характеру покращуючи механічні властивості ґрунту, нейтралізує кислі ґрунти. Дослідження щодо вивчення наслідків багаторазового застосування радіоактивно забрудненої золи під вирощування картоплі показало, що в населених пунктах другої зони «Зони безумовного (обов'язкового) відселення» на прикладі с-ща Народичі відсутній радіологічний контроль під час заготівлі паливної деревини для опалення домівок.

Рівень радіоактивного забруднення деревної золи ^{137}Cs у приватних господарствах с-ща Народичі коливався від 4000 Бк/кг до 22 000 Бк/кг (рівень забруднення вище за 10 000 Бк/кг класифікується як радіоактивні відходи). Маса золи, що накопичується у приватних господарствах за зимовий період, коливається від 60 до 100 кг.

Встановлено, що використання радіоактивної золи на присадибних ділянках мешканців с-ща Народичі не призвело до перевищення вимог державних гігієнічних нормативів у картоплі. Питома активність ^{137}Cs у картоплі була в межах від 8 до 22 Бк/кг (допустимий рівень радіоактивного забруднення картоплі за ДР-06 — 60 Бк/кг). Встановлено, що застосування забрудненої ^{137}Cs деревної золи з різною питомою активністю (1300–13700 Бк/кг) як добрива під картоплю на дерново-середньопідзолистому оглеєному ґрунті з питомою активністю ^{137}Cs у ґрунті не спричинило перевищення встановленого ДР-2006 допустимого рівня вмісту ^{137}Cs у бульбах картоплі, але помітна тенденція до збільшення радіоактивності бульб картоплі за зростання радіоактивності золи.

Залишається не визначеним питання максимально граничних значень рівнів радіоактивного забруднення деревної золи на території з різною щільністю радіоактивного забруднення, що дасть можливість отримати картоплю відповідно до вимог санітарно-гігієнічних нормативів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пристер, Б. С. (1988). *Основи сільськогосподарської радіології*. Київ.
2. Лазарев, М. М., Косарчук, О. В., Поліщук, С. В.,

- & Левчук, С. Є. (2017). Радіоекологічна оцінка деревної золи в населених пунктах півночі Житомирського Полісся. *Агроекологічний журнал*, 4, 29–36.

3. Лазарев, М. М., Отрешко, Л. М., Косарчук, О. В., Полішук, С. В., & Йошенко, Л. В. (2019). Обґрунтування можливості використання паливної деревини з північних районів Полісся. *Науково-технічний журнал Чорнобильської зони відчуження*, 19, 46–58.
4. Краснов, В. П. (1998). *Радіоекологія лісів Полісся України*. Житомир: Волинь.
5. Кашпаров, В. О. (2016). *Чорнобиль: 30 років спадщини радіоактивного забруднення (звіт)*. Замовлено Greenpeace, Бельгія. Київ.
6. Ладіжкієнє, Р. (2010). Радіологічне дослідження деревини, що використовується для спалювання. *ЕКОЛОГІЯ*, 56, 3–4, 87–93. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10055-010-0012-x>.
7. Zibitsev, S. V. (2012). *Theoretical and methodological substantiation of monitoring of forests in zones of radioactive contamination as a result of the accident at the Chornobyl NPP*. [Doctoral dissertation, Kyiv, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine].
8. Гігієнічний норматив питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у деревині та продукції з деревини (ГНПАР-2005). Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 573 (2005). (Україна).
9. Отрешко, Л. М., Йошенко, Л. В., Полішук С. В., & Косарчук, О. В. (2018). Збереження, оптимізація й управління запасами вуглецю та біологічних різноманітнім у Чорнобильській зоні відчуження. *Наукові доповіді НУБіП України: матеріали проєкту Глобального екологічного фонду (UNEP-GEF)*, 1(71) 19, 58–67.
10. Кашпаров, В. О. (2013). *Повернення в господарське використання для виробництва біоенергоресурсів відчужених радіоактивно забруднених територій* (Звіт № 0109U000780). Київ: УкрНДІСТР НУБіП України.
11. Лось, І. П., Шабуніна, Н. Д., Орлов, О. О., Краснов, В. П., & Ландін, В. П. (2008). Обґрунтування нормативу вмісту радіонуклідів у паливній деревині та оцінка його обґрунтування. *Довкілля та здоров'я*, 2, 19–22.
12. Ландін, П. П. (2018). *Чорнобильська катастрофа. Актуальні проблеми, напрямки та шляхи їх вирішення: зб. тез міжнар. наук.-практ. конф.*, 26–27 квітня 2018 р. Житомир: ЖНАЕУ.
13. Якименко, А. Н., Швиденко, І. К., Райчук, Л. А., & Паньковская, Г. П. (2013). Визначення рівня радіаційного забруднення бульб картоплі, вирощеної в умовах Українського Полісся. *Науковий вісник НЛТУ України*, 23(4), 105–110.
14. Косарчук, О. В., & Полішук, С. В. (2018). Радіологічні наслідки використання забрудненої радіонуклідами золи на сільськогосподарських угіддях. *Чорнобильська катастрофа. Актуальні проблеми, напрямки та шляхи їх вирішення: зб. тез міжнар. наук.-практ. конф.* (с. 45–50). Житомир: ЖНАЕУ.
15. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи. Закон України № 791а-ХІІ (1991). (Україна). URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/791%D0%-12>.
16. Голяка, Д. М., Левчук, С. Є., Кашпаров, В. О., Голяка, М. А., Йошенко, Л. В., Отрешко, Л. М., ... Косарчук, О. В. (2020). Вертикальний розподіл ^{90}Sr у ґрунтах та його накопичення в деревині сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна фізика та енергетика*, 21, 157–165.
17. Отрешко, Л. Н., Журба, М. А., Білоус, А. М., & Йошенко, Л. В. (2015). Вміст ^{90}Sr і ^{137}Cs у деревині на південному паливному сліді радіоактивних опадів ЧАЕС. *Ядерна фізика та енергетика*, 16, 2, 183–192. DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2015.02.183>.
18. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ — 2005). Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 54 (2005). (Україна). URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05>.
19. Державні гігієнічні нормативи «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді», ГН 6.6.1.1-130-2006. URL: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE12719.html.

Стаття надійшла до редакції журналу 24.10.2025

ПОЗАКОРЕНЕВЕ ПІДЖИВЛЕННЯ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

О.С. Дем'янюк, О.П. Полтава

Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: demolena@ukr.net; ORCID: 0000-0002-4134-9853

e-mail: o.poltava@profi.land; ORCID: 0009-0006-3007-6550

В умовах зростаючих викликів продовольчої безпеки та негативного впливу змін клімату стратегічного значення набуває підвищення ефективності аграрного виробництва, зокрема шляхом оптимізації живлення рослин. Одним із таких способів є позакореневе підживлення, що забезпечує швидке та ефективне надходження поживних речовин у рослини, особливо в періоди, коли поглинання елементів живлення з ґрунту обмежене. Метою дослідження є узагальнення наукових підходів і практичного досвіду застосування позакореневого підживлення як ефективного способу збільшення врожайності основних зернових культур (пшениця, кукурудза, рис, жито, ячмінь, овес, просо). Здійснено бібліографічний пошук і контент-аналіз публікацій у міжнародних і національних наукових базах, використано методи порівняльного та аналітично-оглядового аналізу. Результати дослідження показали, що позакореневе внесення добрив сприяє підвищенню врожайності та якості зерна (пшениці, кукурудзи, рису, ячменю, жита, вівса та проса). Підживлення у критичні фази росту стимулює фізіолого-біохімічні процеси, збільшує вміст хлорофілу, активність фотосинтезу, накопичення білка і вуглеводів, поліпшує структуру врожаю та елементи продуктивності. Особливо ефективним є застосування комплексних добрив, мікроелементів (Zn, B, Mn, Cu, Si, S та ін.), органіко-мінеральних і наноформ, що посилюють засвоєння поживних речовин, стійкість рослин до посухи, засолення. Позакореневе підживлення також зменшує екологічне навантаження на агроєкосистеми завдяки зниженню втрат азоту, покращанню ефективності використання поживних елементів добрив і зменшенню ризиків забруднення ґрунтів. Отже, такий спосіб внесення добрив є невід'ємним елементом інтегрованого управління живленням рослин і важливою складовою сталого землеробства, спрямованого на підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, збереження родючості ґрунтів і забезпечення продовольчої безпеки.

Ключові слова: *живлення рослин, удобрення рослин, технологія вирощування, зернові культури, врожайність, якість продукції, ефективність, мікроелементи, стійкість.*

ВСТУП

З підвищенням уваги до продовольчої безпеки та зростаючою негативною дією змін клімату постає стратегічне завдання посилення ефективності аграрного сектору [1; 2], що передбачає застосування сучасних інноваційних методів та сталих практик.

У низці агротехнологічних заходів вирощування сільськогосподарських культур чільне місце займають технології живлення рослин [3], які дають змогу підвищити врожайність та якість вирощеної продукції, поліпшити агрохімічні показники ґрун-

ту, знизити негативний вплив на навколишнє природне середовище.

Сучасне землеробство функціонує в умовах загострення наслідків кліматичних змін, інтенсивної експлуатації ґрунтів та виснаження їхньої родючості, що обмежує реалізацію генетичного потенціалу сільськогосподарських культур. Наслідком деградації ґрунтів в агроєкосистемах є зниження потенційної та актуальної родючості, що визначається втратою органічної речовини, зменшенням вмісту основних макро-, мезо- і мікроелементів, та негативно впливає на ріст і розвиток сільськогосподарських культур, а також на про-

дуктивність агроценозів та економічну ефективність виробництва [4]. В таких умовах оптимізація живлення рослин має одне із ключових завдань збільшення продуктивності сільськогосподарських культур та переходу до більш сталих агроценозів [3].

Розроблення та впровадження ефективних технологій удобрення, зокрема позакореневого підживлення та інтегрованих систем живлення, дає змогу підвищити використання елементів живлення добрив, поліпшити фізіологічний стан рослин та їх імунітет, забезпечити стабільне зростання врожайності, знизити втрати продуктивності через стресові чинники та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. Тому, дослідження ефективних способів забезпечення сільськогосподарських культур збалансованим живленням залишається актуальним завданням сучасної аграрної науки та виробництва.

Мета роботи — проаналізувати наукові підходи та практичний досвід застосування позакореневого підживлення як ефективного способу підвищення врожайності основних зернових культур, розкрити переваги та перспективи позакореневого підживлення.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У процесі дослідження використано комплекс наукових методів, спрямованих на узагальнення результатів застосування позакореневого підживлення основних зернових культур (пшениця, кукурудза, рис, жито, ячмінь, овес, просо). Здійснено бібліографічний пошук наукових джерел у міжнародних і національних базах та їх контент-аналіз для виявлення основних тенденцій і отриманих результатів. Застосовано методи порівняльного аналізу, а також систематизації та узагальнення для формування висновків. Аналітично-оглядовий метод дав змогу критично оцінити результати сучасних наукових досліджень та окреслити перспективи у цій сфері.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розроблення більш ефективних та сталих методів ведення сільського господарства знаходиться в центрі уваги дослідників в усьому світі, оскільки глобальні проблеми, як-от зміни клімату, посилення розвитку деградаційних процесів та втрата природних ресурсів негативно впливають на продуктивність агроєкосистем.

Результати досліджень свідчать, що наразі традиційні методи удобрення стають менш ефективними та часто спричиняють негативні наслідки на навколишнє середовище. Тривале використання мінеральних добрив у високих нормах внесення сприяло зростанню продуктивності сільськогосподарських культур, але водночас призвело до забруднення ґрунтів і водних джерел, втрати біорізноманіття, негативно вплинуло на здоров'я людини [5].

Основними зерновими культурами світу є пшениця, рис та кукурудза, які називають «трьома хлібами людства» і є важливими у гарантуванні продовольчої безпеки світу [6]. До інших необхідних зернових культур належать ячмінь, овес, жито та просо, які в певних регіонах світу займають провідні позиції у забезпеченні якісного і поживного харчування.

Зерновим культурам для формування якісного зерна потрібне повноцінне постачання поживними елементами, що впродовж тривалого часу забезпечувалось через внесення мінеральних добрив. Однак зазначають про доволі високі втрати азоту з внесених мінеральних добрив. За оцінками понад 60% азоту, що вноситься у формі сечовини, втрачається в навколишньому середовищі [7]. З азоту, що потрапляє в навколишнє середовище від додавання добрив, приблизно 1/3 денітрифікується до N_2 , 1/3 — потрапляє в ґрунтові води у вигляді нітратів, а 1/3 — вивільняється у вигляді N_2O і спричиняє руйнування озонового шару [8].

Тому сучасні дослідження спрямовано на вирішення багатогранних можливостей збалансованого забезпечення сільськогосподарських культур поживними елементами.

ми за одночасного зниження екологічних проблем. Зокрема, розробляються інноваційні підходи до покращання живлення рослин, що виходять за рамки традиційних методів, приділяється увага підвищенню ефективності використання поживних речовин добрив, технологічним аспектах внесення добрив, розробці нових форм добрив та їх екологічній безпеці.

Одним із таких технологічних рішень є позакореневе підживлення, що використовується для доповнення за основного удобрення рослин, гарантуючи більш ефективне рішення проблеми дефіциту поживних речовин [9; 10]. Коли поглинання поживних речовин із ґрунту гальмується з різних причин, позакореневе підживлення може бути альтернативним та високоефективним рішенням компенсації дефіциту поживних речовин для рослини.

Такий спосіб внесення добрив забезпечує оптимальні умови для росту та розвитку рослин, формування імунітету та стійкості рослин до біотичних й абіотичних чинників, що робить його важливою частиною інтегрованої стратегії боротьби зі шкідниками і хворобами. Серед переваг позакореневого внесення добрив є швидке та легке проникнення і засвоєння поживних речовин рослинами, низькі концентрації добрив, можливість поєднання із засобами захисту рослин [10]. Науково обґрунтоване застосування такого способу внесення добрив не лише позитивно впливає на рослину, а також зменшує негативний вплив на навколишнє середовище та підвищує рентабельність виробництва [11].

Наприклад, вирощування пшениці м'якої і твердої із позакореневим підживленням азотом гарантувало отримання максимальних урожаїв із високим вмістом білка в зерні [12; 13]. Дослідники зазначають, що такий спосіб внесення азоту в період після цвітіння підвищує його вміст у зерні й сприяє подовженню активного функціонування фотосинтетичного апарату рослин унаслідок зменшення конкуренції за азотовмісні сполуки між ним і зернівками [14].

Виявлено збільшення кількості колосків та зерен у колосі, масу 1000 зерен за позакореневого внесення сечовини (в концентрації 1–5%) у посівах пшениці до цвітіння [15]. Також додавання помірних доз азоту по вегетації рослин стримує старіння листків та подовжує період наливу зерна [16]. Крім того, показано, що незначна кількість азоту, що потрапляє в ґрунт за позакореневого підживлення, підтримує високу ефективність засвоєння та використання азоту з ґрунту рослинами пшениці. Це також має позитивний вплив на навколишнє середовище через зменшення на 25–40% азотного навантаження на агроценози [12].

Підживлення препаратами «НАЙС зернові» і «Акселератор Мікро» на фоні внесення мінеральних добрив забезпечило зростання врожайності відповідно на 7,9% і 11,5%, вмісту клейковини в зерні — на 20,9% і 14,4%, вмісту білка — до 13,6% і 14,1% відповідно. Такі показники структури врожаю як довжина стебла та колоса, кількість колосків у колосі, маса одного колоса і 1000 насінин, натура зерна були найкращими за позакореневого підживлення рослин пшениці комплексним добривом «Акселератор Мікро» (1,5 кг/га) на початку IV і V етапу органогенезу [17].

Позакореневе підживлення рослин пшениці комплексним добривом YaraVita Gramitrel, YaraVita Kombiphos, YaraVita Thiotrac із різним умістом мікроелементів позитивно діяло на стан живлення рослин (індекс SPAD) та площу листків порівняно з контролем. Фіксували зростання врожайності після позакореневого підживлення, а також підвищення вмісту білка та мікроелементів [18].

У критичні фази розвитку рослин кукурудзи (цвітіння та налив зерна) позакореневе підживлення посилило вміст вуглеводів та білка в зерні, рівень ліпідів, збільшило масу 1000 зерен та їх розмір [19]. Зменшуючи перекисне окислення ліпідів у рослинах та підтримуючи гомеостаз, цей спосіб внесення добрив є більш ефективним у підвищенні врожайності кукурудзи в стресових умовах, зокрема в умовах по-

сухи [20; 21]. Дослідження підтвердили, що двократне фоліарне підживлення кукурудзи (у фазі 3–5 і 6–8 листків) органомінеральними добривами, збалансованими за вмістом макро- і мікроелементів із додаванням біологічно активних речовин, позитивно вплинуло на ріст і розвиток рослин, на формування структури врожаю та підвищення загальної продуктивності [22].

Серед зернових культур особливе місце займає рис, який за прогнозами стане основним джерелом харчування для майже 9 млрд людей до 2050 р. Щоб задовольнити цей попит, виробництво рису має збільшитись щонайменше на 60%, а тому численні дослідження спрямовано на пошук ефективних шляхів зростання врожайності цієї культури. Серед таких агрозаходів позакореневе підживлення рису набуває поширеності. Зокрема, зважаючи на те, що рослини рису більш схильні до солявого стресу, ніж інші культури, ведеться пошук препаратів для зниження такого стресу. Наприклад, встановлено позитивний вплив оброблення рослин розчином сульфату магнію за вирощування на засолено-лужних ґрунтах, що проявлявся у підвищенні активності ферментів, та вмісту хлорофілу у прапорцевому листку, затримці в'янення кінчиків листків та у такий спосіб покращанні фотосинтетичної активності рослин рису. Крім того, обробка розчином сульфату магнію значно зменшила накопичення токсичних іонів натрію у рисі порівняно з необробленим контролем та сприяло підвищенню врожайності [23].

Для посилення стійкості рису до водного стресу, особливо на критичних стадіях росту, рекомендовано позакореневе обприскування рослин діоксидом кремнію (400 мг/л). Цей агрозахід забезпечує поліпшення фізіологічних та біохімічних параметрів, а також ріст рослин в умовах посухи. Зокрема, за застосування діоксиду кремнію фіксували зниження вмісту малонового діальдегіду в листках рослин рису, збільшення вмісту фотосинтетичних пігментів та проліну, підвищення стійкості рослин у стресових умовах посухи. Поліп-

шення фізіологічного стану рослин дало змогу не лише зменшити вплив стресу від посухи, але й підвищити врожайність та покращити якісні показники зерна [24].

Встановлено, що позакореневе внесення поживних речовин (комплекс N, P, K, Fe, B, Zn, Mn, Cu) у період кушення — формування волоті істотно впливає на висоту рослин, кількість пагонів на рослині, концентрацію хлорофілу в листках, кількість виповнених зерен на рослині та врожайність зерна. Крім того, позакореневе внесення поживних речовин позитивно вплинуло на фізіологічні показники, включаючи індекс площі листків, інтенсивність ростових процесів та накопичення сухої маси рослинами [25].

Низкою польових дослідів показано ефективність позакореневого підживлення рослин рису комплексом мікроелементів. Зокрема, обприскування рослин комплексним препаратом Boost Xtra (150 мл/15 л води) на стадії формування волоті зафіксувало позитивний вплив на вміст хлорофілу в рослині, висоту та накопичення біомаси, показники структури врожаю (кількість волоті на рослину, кількість зерен на волоть, відсоток дозрілих зерен та їх масу) та загальну врожайність [26].

Інші польові випробування виявляли, що позакореневе підживлення рослин рису комплексом мікроелементів (Zn, B, Mg, S) у різних поєднаннях було ефективним лише за умови основного удобрення NPK та відсутності посухи [27].

Встановлено, що нанодобрива на основі сірки та кремнію (S–Si, 4 мл/л) є перспективним рішенням для підвищення врожайності рису за вирощування на ґрунтах із низьким вмістом азоту та калію. Внаслідок покращання поглинання поживних речовин із ґрунту, рослини рису були вищими, формували більшу кількість пагонів та листків на рослині. Також поліпшувались такі біохімічні показники, як вміст вітаміну C, розчинного білка, відновлювальних цукрів, фенольних сполук та флавоноїдів [28].

Подібні позитивні результати отримано і для інших зернових культур. Так, вирощу-

вання проса на фоні основного удобрення мінеральними добривами із підживленням мікродобривом (Браман мультикомплекс, 2,0 л/га) у фазі кушення дало змогу рослинам сформувати максимальну висоту, найбільшу надземну біомасу, кількість гілочок другого порядку та відповідно отримати найвищу врожайність зерна [29].

Також показано, що позакореневе внесення наночастинок ZnO (2,6 мг/л) за вирощування проса покращує ефективність фотосинтезу, транспірацію і ферментативну активність та водночас знижує індекс водного стресу рослин. Це зрештою мало позитивний вплив на масу 1000 зерен та врожайність зерна [30].

Дослідженнями В. Мусіч та О. Присяжнюка [31; 32] було встановлено, що вирощування проса прутоподібного на кислих та малопродуктивних ґрунтах із застосуванням позакореневого підживлення гуматами (гумат калію (Гуміфід), 50 г/га) та антистресантом (АміноСтар, 1,0 л/га) дає змогу отримати максимальну врожайність сухої біомаси (6,1 т/га), уміст клітковини у листках і стеблах (55,3% і 55,6% відповідно) та вихід енергії з отриманим урожаєм (102,4–102,5 ГДж/га) [31]. Досліджувані технологічні елементи позитивно вплинули на якість сировини, що свідчить про зменшення інтенсивності поглинання деяких важких металів і їх накопичення в сухій речовині [32].

Досліджуючи ефективність різних препаратів для позакореневого підживлення жита за вирощування на бідних піщаних ґрунтах було виявлено їх диференційований вплив на врожайність та якісні показники зерна. Зокрема, обробка рослин у фазі формування першого міжвузля препаратом Басфоліар 36 Екстра (8 л/га) забезпечило одержання максимальної врожайності. Натомість позакореневе підживлення препаратом Polyactiv Mn (2,5 л/га) було ефективним як у підвищенні врожайності, так і поліпшенні якісних показників зерна [33]. Позитивну реакцію рослин жита на позакореневе підживлення мікроелементами (Zn, Mn) описано в досліджах А. Stepień з колегами [34]. Встановлено, що удобрен-

ня мінеральними добривами та позакореневе підживлення мікроелементами збільшили вміст білка в зерні жита.

Результати дослідження визначили, що позакореневе удобрення ячменю ярого азотом (2,0%) у фазі кушення та у фазі виходу в трубку сприяло формуванню максимальної висоти рослин (66,7 см), кількості пагонів (490,7 шт./м²), довжини колоса (8,3 см), кількості зерен у колосі (35,0 шт.), маси 1000 насінин (30,3 г), біологічної врожайності (7,1 т/га) та врожайності зерна (3,1 т/га). Зменшення концентрації до 1,0% азоту та позакореневе внесення у фазі кушення та виходу в трубку дало аналогічні результати, що виявилось найкращим способом отримання оптимального врожаю ячменю та є більш економічно вигідним [35].

В. Stadnik із співавт. [36] підтвердили значний економічний та екологічний аспект вирощування ячменю із позакореневим внесенням мікродобрив, до складу яких включено мікроелементи Cu, Mn, Mo або Zn. Результати показали, що такий агрозахід зумовив покращання окремих елементів структури врожаю та збільшення врожайності зерна.

Під час вирощування вівса встановлено високу ефективність використання азоту з рідкого добрива N-Tor® шляхом позакореневого його внесення, що було на рівні удобрення сечовиною. Втім автори зазначають про зростання вартості такої технології і не рекомендують її в промислових масштабах [37].

Вирощування вівса в умовах Полісся України із позакореневим підживленням рідким комплексним добривом (Rost концентрат N₁₄P₇K₇ + мікроелементи) у фазі сходів, кушення та виходу у трубку зафіксувало високу ефективність щодо поліпшення загального стану посівів, збільшення висоти рослин (на 3–7 см) та густоти рослин (на 21–38 шт./м²), зростання врожайності зерна та отримання приросту на рівні 1,13–1,20 т/га [38].

Застосування позакореневого підживлення рослин такими мікроелементами, як кремній і сірка у посівах вівса підвищує

стійкість рослин до абіотичних чинників — посухи та засолення ґрунту. Так, позакореневе підживлення кремнієвими та сірчаними добривами спричинило різницю в швидкості фотосинтезу, загальній провідності до CO_2 , транспірації, ефективності використання води, площі листків, вмісту хлорофілу та каротиноїдів, масі 1000 зерен та врожайності вівса озимого. Внесення кремнію значно збільшило швидкість фотосинтезу (16,8–149,3%), транспірацію (5,4–5,6), вміст хлорофілу (1,0) та каротиноїдів (2,5%), урожайність зросла на 10,2% (Si) та 8,0% (Si + S) [39].

В умовах засоленого ґрунту позакореневе підживлення рослини вівса кремнієм (Optysil 0,1% або 0,2%) зменшує сольовий стрес, збільшує вміст хлорофілу в листках, наростання біомаси, нормалізує процеси газообміну [40].

ВИСНОВКИ

Аналіз наукових публікацій показав, що використання позакореневого підживлення рослин є поширеною практикою у виробництві зернових культур в усьому світі. Цей спосіб забезпечення зернових культур мікро-, мезо- і макроелементами є економічно й екологічно виправданим, розглядається як сталий метод управління мінеральним живленням рослин та є складовою сучасних агротехнологій.

В умовах виснаження ґрунту і дефіциту ресурсів застосування позакореневого підживлення в доповненні з мікроелементами у критичні фази розвитку рослин покращує поглинання поживних речовин із ґрунту, стимулює фізіологічні й біохімічні процеси в рослинах, підвищує стійкість до біотичних та абіотичних стресів, врожайність, а також якісні показники зерна.

ЛІТЕРАТУРА

- Islam, S. (2025). Agriculture, food security, and sustainability: a review. *Explor Foods Foodomics*, 3, 101082. DOI: <https://doi.org/10.37349/eff.2025.101082>.
- Mutale, B., Dai, S., Chen, Z., & Maulu, S. (2025). Enhancing food security amid climate change: assessing impacts and developing adaptive strategies. *Cogent Food & Agriculture*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2519800>.
- Hernandez, L. E., Ruiz, J. M., Espinosa, F., Alvarez-Fernandez, A., & Carvajal, M. (2024). Plant nutrition challenges for a sustainable agriculture of the future. *Physiologia plantarum*, 176(6), e70018. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.70018>.
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.
- Gnanaprakasam, P. D., & Vanisree, A. J. (2022). Recurring detrimental impact of agrochemicals on the ecosystem, and a glimpse of organic farming as a possible rescue. *Environmental Science of Pollution Research*, 29(1–4), 75103–75112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22750-1>.
- Wrigley, C. W., & Nirmal, R. C. (2017). The major cereal grains: corn, rice, and wheat. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471238961.23080501.a01.pub3>.
- Beig, B., Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Hussain, A., Zia, M. H., & Mehran, M. T. (2020). Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 43(6), 1510–1533. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1744647>.
- Good, A. G., & Beatty, P. H. (2011). Fertilizing nature: A tragedy of excess in the commons. *PLoS Biol*, 9, e1001124. DOI: [10.1371/journal.pbio.1001124](https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001124).
- Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K., & Yan, D. (2021). Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. *J. Soil Sci. Plant Nutr*, 21, 104–118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3>.
- Patil, B., & Chetah, H. T. (2018). Foliar fertilization of nutrients; A review. *Marumegh*, 3, 49–53.
- Гангур, В. В., Кочерга, А. А., Пипк, О. С., & Лень, О. І. (2021). Ефективність мікродобрив за умови обробки насіння та листового підживлення посівів пшениці озимої. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 2, 46–51. DOI: [10.31210/visnyk2021.02.05](https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.05).
- Ferrari, M., Dal Cortivo, C., Panozzo, A., Barion, G., Visioli, G., Giannelli, G., & Vamerali, T. (2021). Comparing soil vs. foliar nitrogen supply of the whole fertilizer dose in common wheat. *Agronomy*, 11(11), 2138. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11112138>.
- Visioli, G., Bonas, U., Dal Cortivo, C., Pasini, G., Marmiroli, N., Mosca, G., & Vamerali, T. (2018). Variations in yield and gluten proteins in durum wheat varieties under late-season foliar versus soil application of nitrogen fertilizer in a northern Mediterranean environment. *J. Sci. Food Agric*, 98(6), 2360–2369. DOI: [10.1002/jsfa.8727](https://doi.org/10.1002/jsfa.8727).
- Vaguseviciene, I., Burbulis, N., Jonytiene, V., & Vaisinauskiene, R. (2012). Influence of nitrogen fertilization on winter wheat physiological parameters and productivity. *J. Food Agricult. Environ*, 10(3–4), 733–736.

15. Wagan, Z. A., Buriro, M., Wagan, T. A., Wagon, Z. A., Jamro, S. A., Memon, Q. U. A., & Wagan, S. A. (2017). Effect of foliar applied urea on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Int. J. Bioorg. Chem.*, 2, 185–191.
16. Blandino, M., Visioli, G., Marando, S., Marti, A., & Reyneri, A. (2020). Impact of late-season N fertilisation strategies on the gluten content and composition of high protein wheat grown under humid Mediterranean conditions. *J. Cereal Sci.*, 94, 102995. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102995>.
17. Коткова, Т. М., & Довбиш, Л. Л. (2023). Вплив позакореневого (фоліарного) підживлення рослин пшениці озимої на урожай і якість зерна. *Український журнал природничих наук*, 3, 176–185. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.3.2023.176-185>.
18. Jarecki, W., & Czernicka, M. (2022). Reaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) depending on the multi-component foliar fertilization. *Chem. Proc.*, 10, 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/IOGAG2022-12292>.
19. Ssemugenze, B., Ocwa, A., Kuunya, R., Gumisiriya, C., Bojtor, C., Nagy, J., Széles, A., & Illés, Á. (2025). Enhancing maize production through timely nutrient supply: the role of foliar fertiliser application. *Agronomy*, 15(1), 176. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15010176>.
20. Jalali, M., Ghanati, F., & Modarres-Sanavi, A. M. (2016). Effect of Fe₃O₄ nanoparticles and iron chelate on the antioxidant capacity and nutritional value of soil cultivated maize (*Zea mays*) plants. *Crop Pasture Sci.*, 67(6), 621–628. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP15271>.
21. Brankov, M., Simic, M., Dolijanovic, Z., Rajkovic, M., Mandic, V., & Dragicevic, V. (2020). The response of maize lines to foliar fertilizing. *Agriculture*, 10(9), 365. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10090365>.
22. Полтава, О. П., & Дем'янюк, О. С. (2025). Ефективність позакореневого підживлення кукурудзи (*Zea mays* L.) у Лівобережному Лісостепу України. *Агроекологічний журнал*, 2, 148–155. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2025.333840>.
23. Liu, Y., Zhu, Q., Li, R., Wei, R., Geng, X., Zhang, X., ... Chen, Y. (2025). Foliar magnesium enhances rice salt tolerance by improving photosynthesis and regulating ion homeostasis. *Front. Plant Sci.*, 16, 1578023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1578023>.
24. El-Okkiah, S. A. F., El-Afry, M. M., Shehab Eldeen, S. A., El-Tahan, A. M., Ibrahim, O. M., Negm, M. M., ... Selim, D. A. (2022). Foliar spray of silica improved water stress tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Frontiers in plant science*, 13, 935090. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.935090>.
25. Mahmoodi, B., Moballeghi, M., Eftekhari, A., & Neshai-Mogadam, M. (2020). Effects of foliar application of liquid fertilizer on agronomical and physiological traits of rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agrobotanica*, 73(3), 7332. DOI: <https://doi.org/10.5586/aa.7332>.
26. Amoah, A. A., Asante, M., Boadu, A. D., Akowuah, J., Blavo, P. L., & Danso, Q. A. (2023). Response of rice (*Oryza sativa* L.) to foliar fertilizer. *African Journal of Agricultural Research*, 19(7), 698–704. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2023.16341>.
27. Senthilkumar, K., Sillo, F. S., Rodenburg, J., Dimkpa, C., Saito, K., Dieng, I., & Bindraban, P. S. (2021). Rice yield and economic response to micronutrient application in Tanzania. *Field Crops Research*, 270, 108201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108201>.
28. Soeparjono, S. S., Harsanti, R. S., & Saputra, M. W. (2025). The effect of foliar application of Nano-Sulfur-Silica fertilizer on growth, yield, and biochemical characteristics of two rice varieties in suboptimal soils. *J. Crop Sci. Biotechnol.*, 28, 463–474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12892-025-00292-5>.
29. Грищенко, Р., & Гордієнко, М. (2025). Ефективність удобрення у формуванні врожаю проса в Правобережному Лісостепу. *Землеробство та рослинництво: теорія та практика*, 2, 82–90. DOI: <https://doi.org/10.54651/agri.2025.02.09>.
30. Kolenčik, M., Ernst, D., Komár, M., Urík, M., Šebesta, M., Dobročka, E., ... Kratošová, G. (2019). Effect of foliar spray application of zinc oxide nanoparticles on quantitative, nutritional, and physiological parameters of foxtail millet (*Setaria italica* L.) under Field Conditions. *Nanomaterials*, 9(11), 1559. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano9111559>.
31. Мусіч, В. В., & Присяжнюк, О. І. (2022). Особливості формування продуктивності та якості біомаси проса прутіподібного на кислих ґрунтах. *Новітні аеротехнології*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.47414/na.10.1.2022.265661>.
32. Присяжнюк, О. І., Мусіч, В. В., Костина, Т. П., Кононюк, Н. О., Черняк, М. О., Гончарук, О. М., & Качура, Є. В. (2023). Формування врожайності та якості проса прутіподібного за багаторічного його вирощування на малопродуктивних ґрунтах Правобережного Лісостепу України. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*, 31, 110–125. DOI: <https://doi.org/10.47414/np.31.2023.292403>.
33. Drăghici, R., Drăghici, I., Croitoru, M., Diaconu, A., Dima, M., & Badi, O. C. (2022). Improving the productivity and quality of rye production, by applying foliar fertilizers with a high content of microelements, in sandy soil conditions. *Sci. Pap. Ser. Agron.*, LXV(1), 304–311.
34. Stepień, A., Wojtkowiak, K., Pietrusiewicz, M., Skłodowski, M., & Pietrzak-Fiečko, R. (2016). The yield and grain quality of winter rye (*Secale cereale* L.) under the conditions of foliar fertilization with micronutrients (Cu, Zn and Mn). *Pol. J. Nat. Sci.*, 31, 33–46.
35. Khaskheli, S. A., Ahmed, M., Shah, S. M. A., Khan, B., Mengal, A. A., & Ziad, T. (2018). Impact of foliar applied nitrogen on the growth and yield of barley (*Hordeum vulgare* L.) at local climate condition at Sindh. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 13(1), 136–143.
36. Stadnik, B., Tobiasz-Salach, R., & Migut, D. (2024). Influence of foliar application of microelements on yield and yield components of spring malting barley.

- Agriculture*, 14(3), 505. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030505>.
37. Henrichsen, L., Basso, N. C. F., Gonzalez da Silva, J. A., ... Steidl, M. E. (2023). The efficiency of liquid source nitrogen for foliar absorption in oat. *Australian Journal of Crop Science*, 17(5), 453–462. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.05.p3843>.
38. Панчишин, В. З., & Кашпур, С. Р. (2019). Формування урожайності зерна вівса посівного в умовах Полісся. *Наукові горизонти*, 1(74), 46–51. DOI: <https://doi.org/10.332491/2663-2144-2019-74-1-46-51>.
39. Kutasy, E., Buday-Bódi, E., Virág, I. C., Forgács, F., Melash, A. A., Zsombik, L., ... Csajbók, J. (2022). Mitigating the negative effect of drought stress in oat (*Avena sativa* L.) with silicon and sulphur foliar fertilization. *Plants*, 11(1), 30. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11010030>.
40. Stadnik, B., & Tobiasz-Salach, R. (2022). Physiological response of oat (*Avena sativa* L.) to the foliar application of silicon in conditions of increased soil salinity. *Chemistry Proceedings*, 10(1), 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/IOCAG2022-12332>.

Стаття надійшла до редакції журналу 10.10.2025

ФІТОСАНІТАРНИЙ СТАН АГРОЦЕНОЗУ КУКУРУДЗИ ЗАЛЕЖНО ВІД СИСТЕМ ХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ

Д.В. Глуховець, Г.Д. Матусевич

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

e-mail: denys.glukhovets@basf.com; ORCID: 0009-0009-1973-485X

e-mail: matusevichgalina1971@gmail.com; ORCID: 0009-0008-6513-5287

У статті висвітлено результати досліджень щодо впливу різних систем хімічного захисту на формування фітосанітарного стану агроценозу кукурудзи в умовах Правобережного Лісостепу України. Впродовж 2023–2025 рр. проводилась оцінка ефективності гербіцидного, інсектицидного та фунгіцидного захисту культури за рівнем забур'яненості, чисельністю основних шкідників і розвитком хвороб. Встановлено, що комбіноване застосування ґрунтового і страхового гербіцидів (Акріс + Стеллар Плюс) забезпечувало істотне зниження забур'яненості посівів (до 3,5–8,2 шт./м²) з технічною ефективністю до 95,3%. Дослідження видового складу бур'янів у посівах кукурудзи засвідчили, що 85,6% їхньої чисельності припадає на однорічні види. Крім того, найістотніше представлені ярі однорічні бур'яни, які охоплюють 74,6% бур'янової синузії. Серед шкідливих видів найбільшу загрозу для посівів становили личинки дротяників (Elateridae) та стебловий метелик кукурудзи (*Ostrinia nubilalis* Hbn.), які відзначалися високим рівнем шкодочинності. Інтенсивність пошкодження кукурудзи цими шкідниками істотно залежала від гідротермічних умов. У роки з надмірним зволоженням ґрунту (травень 2025 р. — 64,6 мм опадів) рівень ушкоджень сходів личинками ковалеків перевищував 10–15%, тоді як у посушливі періоди (травень 2023–2024 рр.) він знижувався, але залишався в межах ЕПШ. Найвищу шкодочинність стеблового метелика зафіксовано у 2024–2025 рр., коли рівень ураження посівів кукурудзи коливався у межах 22,0–40,0%, що було зумовлено надлишковими опадами в червні. Водночас різке підвищення температури в липні 2024 р. спричинило зниження чисельності шкідника і рівня пошкодженості посівів. Обробка інсектицидом Ампліго (0,2 л/га) у фазі ВВСН 18–19 виявилась ефективним засобом контролю чисельності ґрунтових і стеблових шкідників, зменшуючи шкодочинність на 25–35%. Застосування фунгіциду Абакус (1,5 л/га) дало можливість істотно знизити розвиток і поширення гельмінтоспоріозу та фузаріозу кукурудзи, забезпечивши ефективний захист рослин у критичні фази органогенезу. Препарат сприяв зниженню ураження листової поверхні та качанів, що позитивно позначилося на збереженні фотосинтетичного потенціалу рослин. Отримані результати підтверджують доцільність застосування фунгіциду Абакус у системі захисту кукурудзи проти комплексу грибкових хвороб.

Ключові слова: зернові культури, гербіциди, інсектициди, фунгіциди, бур'яни, шкідники, хвороби, агроєкосистема.

ВСТУП

Серед провідних зернових культур, що вирощуються в Україні, кукурудза займає одне з провідних місць як за площею посівів, так і за валовим збором зерна. Завдяки високому генетичному потенціалу врожайності, пластичності та багатофункціональному використанню, кукурудза стала базовою культурою у зерновому кліні багатьох господарств. Однак забезпечення стабільного й високого врожаю кукурудзи неможливе без ефективного захисту посі-

вів від комплексу шкідливих організмів, що включає бур'яни, шкідників та хвороби.

Фітосанітарний стан агроценозу кукурудзи є динамічною характеристикою, що формується під впливом численних чинників, серед яких особливу роль відіграють система хімічного захисту, погодні умови, біоценотичні зв'язки та агротехнічні заходи. У сучасних умовах господарювання важливо не лише забезпечити ефективний захист рослин, а й мінімізувати екологічне навантаження на навколишнє середовище. Саме тому актуальним є пошук та наукове

обґрунтування оптимальних систем хімічного захисту, що дають змогу одночасно досягати високої ефективності контролю шкочочинних організмів та зберігати екологічну рівновагу агроценозу.

Метою дослідження є оцінка фітосанітарного стану агроценозу кукурудзи за умов застосування різних систем хімічного захисту та обґрунтування їх впливу на склад і чисельність шкідливих організмів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема формування оптимального фітосанітарного стану агроценозів кукурудзи активно вивчається як вітчизняними, так і зарубіжними вченими. За даними досліджень (І.І. Мостов'яка, А.О. Мечета, С.В. Поспелова зі співавт. [1–3]), важливими складовими фітосанітарного стану є видова структура бур'янів, чисельність основних фітофагів та рівень ураженості хворобами. Системи хімічного захисту, що застосовуються в сучасному землеробстві, істотно впливають на динаміку цих показників, формуючи як прямі, так і опосередковані ефекти.

У роботах науковців Інституту захисту рослин НААН, зокрема В.Г. Сергієнка, О.В. Шита [4] наголошено, що ефективність хімічного захисту залежить не лише від вибору препаратів, а й від строків їх застосування. Результати польових досліджень засвідчили, що використання сучасних гербіцидних препаратів допомагає ефективно контролювати засміченість посівів кукурудзи. Втім результативність досходового обприскування значною мірою залежить від вологості ґрунту — її дефіцит здатен значуще знижувати гербіцидну активність. У досходовий період високі показники ефективності демонструють такі препарати, як Аденго 465 SC, к.с. (0,5 л/га), Мерлін Флекс Дуо 475 SC, КС (2,0 л/га) та Примекстра TZ Голд 500 SC, к.с. (4,5 л/га). У післясходовий період можливості гербіцидного захисту досить широкі, що дає змогу підібрати оптимальні засоби з урахуванням складу бур'янів і фаз розвитку кукурудзи.

Найкращі результати у стримуванні однорічних злакових і дводольних бур'янів продемонстрували певні поєднання гербіцидів, а саме: Майстер Пауер OD (1,5 л/га), Лаудіс 30 WG (0,5 кг/га) з додаванням ПАР Метро (2,0 л/га), а також Стеллар, РК (1,25 л/га), а також ПАР Метолат (1,25 л/га).

О.В. Сніжок та Т.В. Шевченко [5] також вивчали ефективність хімічного захисту від способів обробітку ґрунту. Результати досліджень засвідчили, що застосування полицевого обробітку ґрунту в поєднанні з гербіцидним захистом забезпечило майже повне пригнічення бур'янової рослинності в агроценозі кукурудзи, чисельність бур'янів зменшилася на 96,8% порівняно з ділянками без обробки.

Експериментальні дослідження Д.О. Шацмана [6] зафіксували, що використання ґрунтових гербіцидів не завжди забезпечує надійний контроль бур'янів у посівах кукурудзи. Недостатня ефективність засобів захисту часто негативно позначається на рості та розвитку культури, що пов'язано з впливом погодних чинників, зокрема температурного режиму та кількості опадів у початковий період вегетації. Посушливі умови гальмують як проростання насіння та початковий ріст рослин, так і активність ґрунтових гербіцидів, зменшуючи їхню ефективність у боротьбі з бур'янами.

Згідно з Директивою Європейського Союзу про стале використання пестицидів (Sustainable Use of Pesticides Directive (SUD)), яка спрямована на зниження ризиків, пов'язаних із використанням пестицидів пріоритетними напрямками у системах хімічного захисту є зменшення пестицидного навантаження, впровадження селективних препаратів із низькою токсичністю для нецільових організмів, а також поєднання хімічного захисту з біологічними методами [7]. Зокрема, в роботах зарубіжних дослідників (A. Jhala et al., D. Joseph Bollman et al.; G. Mitchell et al.) [8–10] наведено результати ефективності гербіцидів групи HPPD-інгібіторів у боротьбі з широким спектром бур'янів у посівах кукурудзи,

до того ж їх дія не справляла значного пригнічення на культуру.

Наукові доробки таких українських вчених, як А. Донець та Т. Марченко із спів-авт. [11], засвідчили ефективність застосування хімічних та біологічних засобів захисту в боротьбі з кукурудзяним стебловим метеликом (*Ostrinia nubilalis* Hübner) за умов краплинного зрошення та безперервного вирощування кукурудзи різних груп стиглості. З'ясовано, що біологічний препарат Трихопсин БТ, який має інсектицидні, фунгіцидні та рістстимулювальні властивості, забезпечував задовільний рівень контролю чисельності шкідника. Комплексне використання біо- та хімічних засобів, зокрема інсектициду Бі-58, забезпечило найкращий результат у зменшенні шкідливості кукурудзяного стеблового метелика.

Результати досліджень І.В. Мовчан [12] виявили, що включення до робочих розчинів гербіцидів Мілагро та Тітус поверхнево-активних речовин, як-от аміачна селітра, Фолікер та Енпосан, сприяє підвищенню їх ефективності, дозволяючи зменшити норму витрати препаратів на 25%. Також зазначено, що поєднання гербіцидів Мілагро і Калісто з ад'ювантом АТПлюс у бакових сумішах підсилює гербіцидну дію та розширює спектр контрольованих бур'янів в агроценозі кукурудзи.

Водночас численні дослідження свідчать про те, що тривале та надмірне застосування одних і тих самих діючих речовин призводить до формування резистентності серед бур'янів та шкідників. Як вказує у своїх роботах В.В. Швартау [13], одним із найсерйозніших викликів у системі захисту ярих культур є резистентність до ацетоллактатсинтазних (ALS) гербіцидів у таких видів бур'янів, як дводольних видів щиріці запрокинутої і лободи білої у розповсюджених до гербіцидів класу імідазолінонів — імазапіру та імазамоксу. Виявлено крос-резистентність до гербіцидів — інгібіторів ALS класу сульфонілсечовин, а також до похідного триазолінонів, до похідних триазолпіримідинів. Подолання цієї проблеми вимагає ротації діючих ре-

човин, зміни технологій обробки та впровадження гербіцидних сумішей.

Особливу увагу науковці приділяють дослідженню впливу хімічних засобів на ентомофауну та мікробіоту ґрунту. Згідно з даними О.С. Дем'янюк, Д.О. Шацмана [15] за застосування гербіцидів у системі захисту кукурудзи в умовах беззмінного вирощування спостерігалось зменшення загальної біомаси мікроорганізмів у типовому чорноземі на 8–57% порівняно з ґрунтом перелогу. Мікробіоценоз зазнавав найбільшого негативного впливу під дією гербіциду Естерон 60 к.е. у дозі 0,8 л/га — він зменшував біомасу мікроорганізмів на 42,1% і знижував активність оксидоредуктаз на 19–20% порівняно з контролем.

Отже, можна констатувати, що оптимізація систем хімічного захисту кукурудзи має базуватися на принципах інтегрованого управління, динамічного моніторингу фітосанітарного стану та адаптації до конкретних ґрунтово-кліматичних умов. У той самий час, потребує подальшого дослідження комплексний вплив таких систем на агробіоценоз загалом, з урахуванням змін у популяційній структурі бур'янів, шкідників і патогенів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження з вивчення фітосанітарного стану агроценозу кукурудзи залежно від систем хімічного захисту проводились у зоні Правобережного Лісостепу на дослідному полі в агроцентрі ТОВ «БАСФ ТОВ» «Центр» с. Терезине Білоцерківського р-ну Київської обл.

Ґрунти дослідної ділянки — чорноземи типові малогумусні. Вміст гумусу 3,8%, рН сольової витяжки — 5,6, гідролітична кислотність 1,6–1,9 мг-екв./100 г ґрунту, вміст легкогідролізованого азоту (за Корнфілдом) — 113,0 мг/кг, рухомих сполук калію і фосфору (за Чириковим) — відповідно 150,0 мг/кг і 215,4 мг/кг ґрунту, рівноважна щільність ґрунту 1,03–1,12 г/см³.

Площа облікової ділянки — 50 м², триразова повторність. Культура — кукурудза, гібриди з ФАО (201–300, середньо-

ранні різних виробників), а саме Касандро (Saatbau) — ФАО 250; КВС 2370 (КВС) — ФАО 280; Астероїд (Euralis, запоз Lidea) — ФАО 290; МАС 24С (MAS Seeds) — ФАО 280; Тоначія (Vitterra Seed) — ФАО 220.

Схема досліджу включала три варіанти хімічного захисту кукурудзи. Варіанти відрізнялися різною нормою витрат гербіцидів та їх строків внесення. Вибір засобів захисту рослин для кукурудзи обґрунтовано біологічними особливостями культури, спектром поширених бур'янів, хвороб і шкідників, а також необхідністю забезпечення комплексного захисту посівів. Для дослідження обрано препарати компаній BASF та SYNGENTA, які характеризуються високою біологічною активністю, селективністю, тривалим захисним ефектом та внесені до Державного реєстру пестицидів і агрохімікатів, дозволених для використання в Україні [16].

Варіант 1: Стеллар Плюс, 1,25 л/га (д.р. 50 г/л топрамезон + 160 г/л дикамба 1,25 л/га), гербіцид, ВВСН 16–17; Ампліго, 0,2 л/га, (д.р. 100 г/л хлорантраніліпрол + 50 г/л лямбда-цигалотрин) інсектицид, ВВСН 18–19, Абакус, 1,5 л/га (д.р. 62,5 г/л епоксиконазол + 62,5 г/л піраклостробін) фунгіцид, ВВСН 57.

Варіант 2: Акріс (д.р. 280 г/л диметен-амід-П + 250 г/кг тербутилазин) + Стеллар Плюс, 1,5 + 0,8 л/га, гербіциди, ВВСН

16–17; Ампліго, 0,2 л/га інсектицид, ВВСН 18–19; Абакус, 1,5 л/га, фунгіцид, ВВСН 57.

Варіант 3: Акріс, 1,5 л/га досходовий гербіцид, ВВСН 00; Стеллар Плюс, 1,0 л/га, гербіцид, ВВСН 16–17; Ампліго, 0,2 л/га, інсектицид, ВВСН 18–19; Абакус, 1,5 л/га, фунгіцид, ВВСН 57.

Гербіцид Акріс, СЕ вносили як післясходовий гербіцид у 2 варіанті та досходовий у 3 варіанті досліджу, згідно з рекомендаціями виробника.

Погодні умови 2023–2025 рр. досліджень різнилися за агрометеорологічними показниками. Характерною ознакою 2024 р. була контрастність перепадів температур повітря та нерівномірність розподілу опадів упродовж усього вегетаційного періоду, що мало вплив на біометричні показники рослин сояшника й кукурудзи та їх продуктивність, ефективність хімічних препаратів і біологічну активність ґрунту. Погодні умови 2025 р. досліджень були сприятливі для вирощування сояшника й кукурудзи.

Польовий дослід закладено за дотримання положень «Методики наукових досліджень в агрономії» [17]. Облікові спостереження щодо забур'яненості посівів проводили трічі: до застосування гербіцидів, на 21-й день після їх внесення, а також у фазі повної стиглості кукурудзи.

Таблиця 1. Показники гідротермічних умов вегетаційного періоду кукурудзи, 2023–2025 рр.

Рік	Місяць						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Температура, °C							
2023	+19,9	+26,9	+30,4	+31,8	+35,7	+28,3	+22,0
2024	+25,9	+27,3	+31,3	+35,9	+35,1	+32,5	+22,4
2025	+26,8	+25,8	+31,6	+33,7	+32,1	+30,4	+13,9
Норма	+10,0	+15,8	+19,5	+21,3	+20,4	+14,9	+8,6
Опади, мм							
2023	102,6	14,1	87,6	136,1	19,6	8,6	67,2
2024	79,0	15,3	109,5	51,9	24,7	20,5	64,1
2025	42,1	64,6	136,5	96,1	47,7	44,6	68,0
Норма	42,0	65,0	74,0	68,0	56,0	58,0	46,0

Під час обліків фіксували видовий склад бур'янів та їх чисельність у межах 1 м² [18]. Оцінювання враження рослин хворобами здійснювали відповідно до методичних рекомендацій В.П. Омелюти [19]. Для вивчення фітофагів використовували стандартизовану ентомологічну методику, прийняту в науковій практиці [20]. Рівень пошкодження рослин кукурудзяним стебловим метеликом визначали візуально за шестибальною шкалою, розробленою О.О. Бахмутом [21; 22].

Математичний аналіз виконували та опрацьовували за допомогою програм Statistica 10 і Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Проведені дослідження показали, що в агроценозах гібридів кукурудзи домінує змішаний характер засміченості, представлений як злаковими, так і дводольними видами бур'янів. Упродовж 2023–2025 рр. в агроценозі кукурудзи виявлено 12 видів сегетальної рослинності, які належали до 5 агробіологічних груп, а саме пізні ярі — 2 види, ранні ярі — 4, зимуючі — 3, коренепаросткові — 2, кореневищні — 1 вид. У видовій структурі бур'янового компонен-

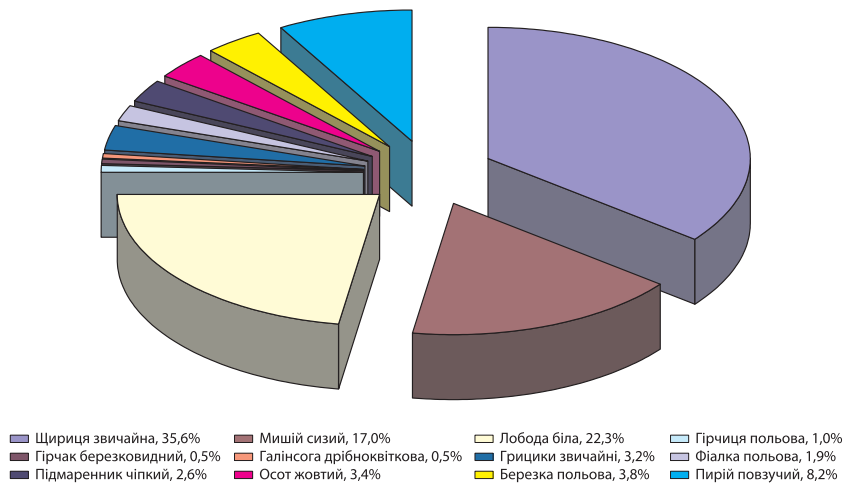
ту агроценозу кукурудзи домінують однорічні види, частка яких становить 85,6% від загальної кількості виявлених видів. Серед них переважають однорічні ярі бур'яни, які формують 74,6% загальної бур'янової синузії. Цей екологічно-біологічний тип представлений такими поширеними видами, як *Amaranthus retroflexus* L. (щириця звичайна), *Setaria glauca* L. (мишій сизий), *Chenopodium album* L. (лобода біла), *Sinapis arvensis* L. (гірчиця польова), *Polygonum convolvulus* L. (гірчак березковидний), *Galinsoga parviflora* Cav. (галінсога дрібноквіткова). Крім того, у посівах кукурудзи фіксуються однорічні зимуючі види, серед яких найчастіше трапляються *Capsella bursa-pastoris* L. Medic. (грицики звичайні), *Viola arvensis* Murr. (фіалка польова), *Galium aparine* L. (підмаренник чіпкий). Їх присутність у структурі бур'янового угруповання є типовою для ранньовесняного періоду вегетації (табл. 2).

Багаторічні бур'яни, зокрема осот жовтий (*Sonchus arvensis* L.), березка польова (*Convolvulus arvensis* L.) та пирій повзучий (*Elytrigia repens* L.), становили 15,4% у загальній структурі засміченості.

Основними видами бур'янів у посівах кукурудзи були: щириця звичайна — 35,6%,

Таблиця 2. Видовий склад бур'янів агроценозу кукурудзи у середньому за 2023–2025 рр.

Видовий склад бур'янів	Агробіологічна група
<i>Однорічні</i>	
Щириця звичайна (<i>Amaranthus retroflexus</i> L.) Мишій сизий (<i>Setaria glauca</i> L.)	Пізні ярі
Лобода біла (<i>Chenopodium album</i> L.) Гірчиця польова (<i>Sinapis arvensis</i> L.) Гірчак березковидний (<i>Polygonum convolvulus</i> L.) Галінсога дрібноквіткова (<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.)	Ранні ярі
Грицики звичайні (<i>Capsella bursa pastoris</i> L. Medic.) Фіалка польова (<i>Viola arvensis</i> Murr.) Підмаренник чіпкий (<i>Galium aparine</i> L.)	Зимуючі
<i>Багаторічні</i>	
Осот жовтий (<i>Sonchus arvensis</i> L.) Березка польова (<i>Convolvulus arvensis</i> L.)	Коренепаросткові
Пирій повзучий (<i>Elytrigia repens</i> L.)	Кореневищні



Структура видового складу популяцій бур'янів у агроценозах кукурудзи, 2023–2025 рр.

лобода біла — 22,3, мишій сизий — 17,0, пирій повзучий — 8,2% (рис.).

Забур'яненість посівів кукурудзи перед внесенням засобів захисту рослин у середньому за 2023–2025 рр. на контрольному варіанті та на варіантах із різними системами захисту становила 94,1–99,9 шт./м² (табл. 3). Застосування гербіцидів у фазі ВВСН 16–17 ефективно контролювало забур'яненість посівів, пригнічуючи розвиток як однорічних, так і багаторічних коренепаросткових видів. Через 21 день після внесення гербіцидів спостерігало-

ся істотне зниження чисельності бур'янів у посівах кукурудзи. Найвища ефективність у контролі бур'янового компоненту відзначалася за досхового використання гербіциду Акріс, 1,5 л/га та страхового препарату Стеллар Плюс, 1,0 л/га у фазі ВВСН 16–17, що забезпечило стійкий гербіцидний ефект і зменшення загальної забур'яненості на максимальному рівні до 3,5 шт./м².

Сумісне внесення досхового гербіциду Акріс, 1,5 л/га та страхового препарату Стеллар Плюс, 0,8 л/га призвело до змен-

Таблиця 3. Забур'яненість посівів кукурудзи залежно від системи хімічного захисту, шт./м², середнє за 2023–2025 рр.

Система хімічного захисту	Перед внесенням гербіцидів	Через 21 день після внесення гербіцидів	Фаза повної стиглості зерна	Технічна ефективність, %
Контроль (без внесення ЗЗР)	98,6	147,8	174,4	—
Варіант 1. Стеллар Плюс (страховий гербіцид) 1,25 л/га, ВВСН 16–17	94,1	10,1	19,3	88,9
Варіант 2. Акріс + Стеллар Плюс (страхові гербіциди) 1,5 + 0,8 л/га, ВВСН 16–17	99,2	6,4	14,5	91,7
Варіант 3. Акріс (досховий гербіцид) 1,5 л/га, ВВСН 00, Стеллар Плюс (страховий гербіцид) 1,0 л/га, ВВСН 16–17	99,9	3,5	8,2	95,3

шення чисельності бур'янів до 6,4 шт./м², а внесення лише страхового гербіциду Стеллар Плюс, 1,25 л/га до 10,1 шт./м². На контрольному варіанті (без додавання гербіцидів) забур'яненість посівів кукурудзи зросла від 98,6 до 147,8 шт./м².

У фазі повної стиглості зерна кукурудзи відмічено повторне зростання рівня забур'яненості посівів. Це зумовлено переважно припиненням післядії гербіцидів, а також появою пізніх хвиль проростання бур'янів, які не були повністю пригнічені в попередній фазі розвитку культури. Найбільш чисельно в цей період були представлені однорічні ярі та зимуючі види, які характеризуються тривалим періодом вегетації та високою регенеративною здатністю.

У зв'язку зі змінами у видовому складі бур'янів упродовж вегетаційного періоду та варіативністю динаміки забур'яненості залежно від фази розвитку кукурудзи, виникає необхідність кількісно оцінити ефективність застосованих систем гербіцидного захисту. З цією метою було проведено аналіз технічної ефективності різних схем обробки, що включали як ґрунтові, так і страхові гербіциди, окремо та у сумішених варіантах. Технічна ефективність визначалася за загальноприйнятною методикою, що передбачає розрахунок ступеня зменшення забур'яненості порівняно з контролем (без обробки ЗЗР) [23]. Отримані результати дали можливість здійснити об'єктивну оцінку дії різних препаратів і їх комбінацій у системі захисту кукурудзи. Так, технічна ефективність гербіцидного захисту посівів кукурудзи становила 88,9–95,3%, що свідчить про значне зниження рівня забур'яненості порівняно з контрольним варіантом. Найвищу ефективність зафіксовано у варіантах із комбінованим застосуванням ґрунтового та страхового гербіцидів, зокрема за використання препарату Акріс у досходовий період.

Для оцінювання ефективності внесення інсектициду щодо регуляції чисельності окремих видів шкідників у посівах кукурудзи застосовували препарат Ампліго, який є системно-контактним комбінова-

ним інсектицидом широкого спектра дії, що містить дві активні речовини з різними механізмами впливу: 100 г/л хлорантраніліпролу та 50 г/л лямбда-цигалотрину.

За підсумками трирічних досліджень встановлено, що основними фітофагами, які завдають найбільшої шкоди посівам кукурудзи, є личинки коваликів (*Elateridae*) та кукурудзяний стебловий метелик (*Ostrinia nubilalis* Hbn.). Останній, широко поширений у різних агрокліматичних зонах України, завдяки своїм біологічним особливостям здатний наносити значні пошкодження листковій поверхні, стеблам і качанам кукурудзи, що призводить до істотних втрат врожаю. Так, щільність популяції личинок коваликів перед висівом кукурудзи в середньому за роки досліджень становила 5,1 екз./м², тоді як у фазі сходів культури ці показники зросли до 6,9 екз./м². Отримані значення перевищували встановлений економічний поріг шкідливості (3–5 екз./м²) у середньому на 20%, що вказує на підвищений рівень фітосанітарного ризику на дослідних ділянках.

Інтенсивність ураження кукурудзи личинками коваликів істотно варіювалася залежно від гідротермічного режиму весняного періоду. Зокрема, у травні 2025 р., коли спостерігалось значне зволоження ґрунту (64,6 мм опадів), пошкодженість рослин у фазі сходів перевищувала 10–15% (див. *табл. 1*). У роки з посушливими умовами в травні (2023, 2024 рр. відповідно 14,1 мм і 15,3 мм опадів) рівень ушкоджень був меншим, у межах економічного порогу шкідливості.

З метою оцінювання рівня пошкодженості кукурудзи кукурудзяним стебловим метеликом здійснювали обстеження 100 рослин у чотирьох повтореннях у фазах цвітіння та молочної стиглості. Під час огляду фіксували кількість уражених рослин та оцінювали чисельність гусениць фітофага.

У результаті проведених досліджень встановлено, що на чисельність та пошкодження кукурудзи стебловим метеликом безпосередньо вплинули погодні умови в роки досліджень (див. *табл. 1*). Так, най-

вищу чисельність і шкодочинність кукурудзяного стеблового метелика було зафіксовано у 2024–2025 рр., коли рівень ураження посівів кукурудзи коливався в межах 22,0–40,0%. Надмірна кількість опадів у червні (109,5–136,5 мм, що сягало 148–184% кліматичної норми) сприяла активному розвитку популяцій: у фазі цвітіння виявлено 9,5 кладок яєць на 100 рослин, у фазі молочної стиглості — до 12,0 шт./100 рослин. Водночас, у липні 2024 р. різке підвищення температури до +35,9°C призвело до часткової загибелі особин кукурудзяного метелика і, як наслідок, до зменшення щільності популяцій до 4,0 кладок на 100 рослин, за зниження пошкодженості до 2,5%.

Важливим чинником зменшення продуктивності кукурудзи залишається ураження рослин збудниками хвороб. З урахуванням високого рівня патогенного навантаження на агроценоз кукурудзи та сприятливих умов для розвитку грибкових хвороб у дослідженнях було передбачено застосування сучасного фунгіциду системної дії — Абакус (піраклостробін, 62,5 г/л + епоксиконазол, 62,5 г/л). Препарат використовували у фазі ВВСН 57 з метою пригнічення збудників фузаріозу, гельмінтоспоріозу та комплексу листкових плямистостей.

За результатами проведених досліджень застосування фунгіциду Абакус (1,5 л/га) у фазі наприкінці викидання волоті вплинуло на розвиток та поширення гельмінтоспоріозу та фузаріозу кукурудзи. У фазі початку викидання волоті кукурудзи розвиток гельмінтоспоріозу становив 5,8–6,1%, поширення — 7,8–10,1%; розвиток фузаріозу — 7,0–7,4%, поширення — 8,9–10,3%. Одноразове внесення фунгіциду Абакус зменшило розвиток гельмінтоспоріозу до 3,6%, поширення — 5,8–6,0%, розвиток фузаріозу до 4,2%, поширення — 6,2–7,0%. На контрольному варіанті в середньому за роки досліджень розвиток гельмінтоспоріозу та фузаріозу у фазі наприкінці викидання волоті сягав 15,7% і 16,7%, поширення — 17,1% й 24,1% відповідно.

ВИСНОВКИ

Фітосанітарний стан агроценозу кукурудзи значною мірою залежав від обраної системи хімічного захисту. Найефективнішим виявився варіант із комбінованим додаванням ґрунтових та страхових гербіцидів, зокрема поєднання Акрісу (1,5 л/га) у досходовий період із післясходовим внесенням Стеллар Плюс (1,0 л/га), що забезпечило найнижчу забур'яненість посівів (3,5–8,2 шт./м²) та найвищу технічну ефективність (95,3%).

Домінувальний видовий склад бур'янів у посівах кукурудзи формували переважно однорічні ярі види, що становили до 74,6% загальної фітоценотичної структури. Найчастіше зустрічалися щиріця звичайна, лобода біла та мишій сизий. У фазі повної стиглості зафіксовано повторне збільшення забур'яненості, що зумовлено припиненням дії гербіцидів і появою нових хвиль проростання бур'янів.

У посівах кукурудзи впродовж 2023–2025 рр. досліджень ідентифіковано основних шкідників, серед яких найбільшу шкоду завдавали личинки коваликів (*Elate-ridae*) та кукурудзяний стебловий метелик (*Ostrinia nubilalis* Hbn.). Щільність популяцій коваликів у фазі сходів перевищувала економічний поріг шкідливості, що спричиняло до 15% пошкоджених рослин. Пошкодженість кукурудзи кукурудзяним стебловим метеликом досягала максимальних значень у 2024–2025 рр. (22,0–40,0%) за підвищеної кількості опадів у червні (до 170% норми), що створювало сприятливі умови для розвитку гусениць. Застосування інсектициду Ампліго (0,2 л/га), виявилося ефективним засобом контролю чисельності ґрунтових і стеблових шкідників, зменшуючи шкодочинність на 25–35%.

У фазі викидання волоті зафіксовано поширення гельмінтоспоріозу до 10,1% та фузаріозу до 10,3%. Одноразове внесення фунгіциду Абакус (1,5 л/га) у фазі ВВСН 57 значно знизило розвиток та поширення обох інфекцій: у середньому на 40–60% порівняно з контролем.

Тому, комплексне використання гербіцидів, інсектицидів і фунгіцидів у системі

захисту кукурудзи з урахуванням біологічних особливостей фітофагів, видового складу бур'янів та погодних умов забез-

печує стабільний контроль основних шкідливих організмів і сприяє підтриманню агроекологічної рівноваги агроценозу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мостов'як, І. І., & Дем'янюк О. С. (2020). Чинники дестабілізації фітосанітарного стану агроценозів зернових культур Центрального Лісо-степу України. *Збалансоване природокористування*, 2, 73–84. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2020.208812>.
2. Мечет, А. О., & Дудченко, В. В. (2024). Фітосанітарний стан посівів кукурудзи в умовах Північного Степу України. *Досягнення і перспективи в захисті та карантині рослин: матеріали III Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищої освіти, присвяченій 126-річчю НУБіП України*, 23 квітня 2024 р. Київ: НУБіП України. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u366/zbirnik_konferenciyi_2024.pdf.
3. Поспелов, С. В., Поспелова, Г. Д., Нечипоренко, Н. І., Коваленко, Н. П., & Охріменко, В. В. (2021). Моніторинг хвороб кукурудзи в умовах Полтавського регіону. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 3, 37–44. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.04>.
4. Сергієнко, В. Г., & Шита, О. В. (2021). Контроль забур'яненості посівів кукурудзи за різних схем застосування гербіцидів. *Захист і карантин рослин*, 67, 196–211. DOI: <https://doi.org/10.36495/1606-9773.2021.67.196-211>.
5. Сніжок, О. В., & Шевченко, Т. В. (2022). Розвиток шкідливих організмів у посівах кукурудзи залежно від обробітків ґрунту та системи захисту. *Фітосанітарна безпека*, 68, 156–167. DOI: <https://doi.org/10.36495/1606-9773.2022.68.156-167>.
6. Шацман, Д. О. (2019). Оцінка дії гербіцидів на забур'яненість, ріст і розвиток рослин кукурудзи за беззмінного вирощування у Лівобережному Лісостепі України. *Агроекологічний журнал*, 1, 109–116. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2019.163287>.
7. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the council of 21 october 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides (text with EEA relevance). (2009). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009L0128-20091125&from=EN>.
8. Jhala, A. J., Kumar, V., Yadav, R., Jha, P., Jugulam, M., ... Norsworthy, J. K. (2023). 4-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase (HPPD)-inhibiting herbicides: past, present, and future. *Weed Technology*, 37, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1017/wet.2022.79>.
9. Joseph, D., Bollman, Chris, M., Boerboom, Roger, L., & Becker Vince, A. Fritz. (2008). Efficacy and Tolerance to HPPD-Inhibiting Herbicides in Sweet Corn. *Weed Technology*, 22(4), 666–674. DOI: <https://www.jstor.org/stable/25195105>.
10. Mitchell, G., Bartlett, D. W., Fraser, T. E., Hawkes, T. R., Holt, D. C., Townson, J. K., & Wichert, R. A. (2001). Mesotrione: a new selective herbicide for use in maize. *Pest Management Science*, 57(2), 120–128. DOI: [https://doi.org/10.1002/1526-4998\(200102\)57:2<120::AID-PS254>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1526-4998(200102)57:2<120::AID-PS254>3.0.CO;2-E).
11. Donets, A., Marchenko, T., Piliarska, O., Mishchenko, S., & Lavrynenko, Y. (2025). The effectiveness of protection measures for maize hybrids of different FAO groups against damage caused by *Ostrinia nubilalis* Hübner under continuous maize cultivation conditions with irrigation. *Modern Phytomorphology*, 19, 91–95. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.200121>.
12. Мовчан, І. В. (2014). Improving the efficiency of chemical control method weeds in corn for grain under the right bank forest steppe of Ukraine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10(68)), 45–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23529>.
13. Mykhalska, L. M., & Schwartau, V. V. (2022). Identification of acetolactate synthase resistant *Amaranthus retroflexus* in Ukraine. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 3, 231–240. DOI: <https://doi.org/10.15421/022230>.
14. Schwartau, V., & Mykhalska, L. (2022). Herbicide-resistant weed biotypes in Ukraine. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 85–94. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovid2022.06.085>.
15. Дем'янюк, О. С., & Шацман, Д. О. (2019). Біологічна активність чорнозему типового за внесення гербіцидів у технології вирощування кукурудзи. *Агроекологічний журнал*, 3, 93–99. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2019.183479>.
16. Державний реєстр пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні. (2025). [Чинний від 2025-09-19]. Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy/derzhavnyj-rejestr-pestytsydiv-i-agrohimikativ-dozvolenyh-do-vykorystannya-v-ukrayini/>.
17. Міщенко, Ю. Г., Прасол, В. І., Давиденко, Г. А., Масик, І. М., Ермантраут Е. Р., & Гудзь, В. П. (2024). *Методика наукових досліджень в агрономії: навч. посіб.* Суми: СНАУ.
18. Трибель, С. О., Сігарьова, Д. Д., Секун, М. П., & Іващенко, О. О. (2001). *Методика випробування і застосування пестицидів*. Київ: Світ.
19. Омелюта, В. П., Григорович, І. В., Чабан, В. С., Підоплічко, В. Н., Галенич, Ф. С., & Черненко, О. О. (1986). *Облік шкідників і хвороб сільськогосподарських культур*. Київ: Урожай.
20. Покозій, Й. Т., Писаренко, В. М., & Довгань, С. В. (2010). *Моніторинг шкідників сільськогосподарських культур*. Київ: Аграрна освіта.
21. Бахмут, О. О. (2002). *Стійкість сортів і гібридів кукурудзи до кукурудзяного метелика та багаторічний прогноз його чисельності в Лісостепу України*

- [Автореф. дис. канд. с.-г. наук, НУБіП України], URL: <https://uacademic.info/ua/document/0403U000460>.
22. Бахмут, О. О. (2007). Комплексна шкодо чинність фітофагів кукурудзи в умовах південно-західного Лісостепу України. *Захист рослин. Міжвідомчий тематичний науковий збірник*, 53, 22–28.
23. Лебідь, Є. М., Циков, В. С., Матюха, Л. П., & Шевченко, М. С. (2008). *Методика проведення польових дослідів по визначенню забур'яненості та ефективності засобів її контролювання в агрофітоценозах*. Дніпропетровськ: Інститут зернового господарства УААН.

Стаття надійшла до редакції журналу 22.09.2025

ВПЛИВ ГУСТОТИ ПОСІВУ НА РІСТ, РОЗВИТОК ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ ГІБРИДІВ СОНЯШНИКА

І.М. Городиська, Ф.Ф. Мурсюкаєв

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

e-mail: anni0479@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1580-3450

e-mail: philipmursyukaev@gmail.com; ORCID: 0009-0009-7500-2629

У статті представлено результати досліджень щодо впливу густоти посіву на морфологічні ознаки та продуктивність чотирьох гібридів соняшника (Грут, Тор Сумо, Старк, Авалон) в умовах Лівобережного Лісостепу України. Дослідження охопили періоди як зі сприятливими (2023 р.), так і з посушливими (2024 р.) погодними умовами, що дало можливість отримати об'єктивну оцінку адаптивності гібридів до різних агроєкологічних чинників та виявити їхню потенційну продуктивність. Метою є дослідження впливу різних рівнів густоти посіву на ріст, розвиток та продуктивність гібридів соняшника в умовах Лівобережного Лісостепу України. Методи дослідження включали обліки, вимірювання та супутні спостереження, які виконували згідно з методикою проведення польових дослідів та методикою державного сортопробування. Визначено, що оптимізація густоти посіву є основним інструментом управління для повної реалізації генетичного потенціалу гібридів соняшника. Аналіз показав, що гібридоспецифічна реакція на загущення гібридів соняшника Грут, Тор Сумо, Старк та Авалон проявляється у зміні висоти рослин, діаметра кошика та площі листової поверхні. Зокрема, встановлено, що гібриди Грут і Старк є більш адаптованими до інтенсивних технологій та можуть вирощуватися за вищої густоти стояння за збереження високої продуктивності. Натомість гібрид Авалон є чутливим до підвищеної конкуренції, що призводить до різкого зниження його морфометричних показників та кінцевої врожайності. За результатами дослідження виявлено оптимальні діапазони густоти посіву для кожного гібрида соняшника, що є принциповим для практичного застосування. Показано, що оптимальна густина для досягнення максимальної врожайності для гібридів Грут та Авалон становить 60–70 тис. росл./га, а для Тор Сумо і Старк — 70–80 тис. росл./га. Зроблено висновок, що раціональне поєднання генетичних особливостей гібрида з агротехнологічними прийомами дає змогу ефективно керувати продуктивністю гібридів соняшника в умовах нестабільного клімату, забезпечуючи стабільний урожай навіть за умов водного стресу.

Ключові слова: урожайність, густина стояння рослин, діаметр кошика, площа листової поверхні, висота рослин, конкуренція рослин, адаптивність гібридів, фотосинтетичний потенціал.

ВСТУП

Соняшник (*Helianthus annuus* L.) посідає провідне місце серед сільськогосподарських культур як в Україні, так і у світовому аграрному секторі. Це олійна культура, яка має важливе економічне та екологічне значення для сільського господарства. В Україні під олійні культури зайнято близько 70% сільськогосподарських площ [1]. Вирощування соняшника забезпечує виробництво високоякісної олії, а також є важливим елементом сівозміни. Водночас соняшник є відмінним медоносом, який

надає збір бджолами від 40 до 75 кг меду з одного гектара [2].

В Україні найбільше соняшника висівається у Дніпропетровській, Запорізькій, Одеській, Миколаївській, а до повномасштабного вторгнення Росії — у Херсонській обл. [3]. Це зумовлено ефективним використанням біокліматичних ресурсів, а також здатністю соняшника адаптуватися до складних кліматичних умов, зокрема до посух і високих температур [4]. В Україні впродовж останніх десятиліть спостерігається динамічне зростання площ, зайнятих під соняшником, зокрема і через глобальні

зміни клімату, що обумовило розширення ареалу вирощування культури в північних регіонах країни. Так, за даними Державної статистики України, в 2024 р. площа посівів сояшника в Україні становила 5123,9 тис. га, що майже вдвічі більше, ніж у 2000 р. [3]. Це забезпечило приріст валового виробництва сояшника до 12 млн тон. Така динаміка пояснюється підвищеним попитом на товарне насіння, сояшникову олію, продукти переробки, а також активнішим внесенням відходів культури у тваринництві.

Повномасштабна війна, що розпочалася на території України, спричинила зменшення площ сільськогосподарського використання, зокрема й посівних площ сояшника. Зокрема, у 2022 р. на тимчасово окупованих територіях площі під цією культурою скоротилися на 29%, що сягає близько 1,9 млн га [5].

Слід зазначити, що інтенсивне збільшення останніми десятиліттями частки сояшника в структурі посівних площ має як позитивні, так і негативні наслідки. Надмірне насичення сівозмін цією культурою ускладнює дотримання рекомендованих інтервалів перед її повторним висівом, що несе екологічні ризики поширення специфічних хвороб, бур'янів, інтенсивне виснаження ґрунту [6]. Варто зазначити, що зростання посівних площ не супроводжується відповідним збільшенням урожайності, навіть за умов використання гібридів із високим біологічним потенціалом. Це зумовлено складністю формування врожайності, яка залежить від комплексу природних (температурні режими, вологість, кількість опадів тощо) та агротехнічних чинників (зрошення, застосування добрив, густина посіву, вибір гібридів, строки сівби, норма висіву тощо) [4; 7]. Тому актуальним питанням залишається ґрунтовне вивчення та удосконалення кожного агротехнічного елементу вирощування сояшнику.

В умовах посилення антропогенного навантаження, зміни клімату та зростання потреби в продовольчих ресурсах, оптимізація технологій вирощування сояшника набуває особливої актуальності. Одним із

визначальних чинників, що безпосередньо діє на формування врожаю насіння сояшника, є густина стояння рослин [8]. Цей чинник є визначальним у конкуренції рослин за ресурси — світло, вологу та поживні речовини. Наукові дослідження [9] підтверджують, що густина стояння впливає на індивідуальний ріст і розвиток рослин, ефективність фотосинтезу та, як наслідок, на кінцеву продуктивність. Зокрема, за даними А.А. Kandil та ін. [10], надмірна або, навпаки, недостатня густина стояння призводить до зниження врожайності та погіршення якісних показників продукції. Тому за інтенсивного землеробства та використання високопродуктивних гібридів, які здатні до адаптації, важливим є питання підбору оптимальної густоти посіву.

З огляду на це, **метою дослідження** є вивчення впливу різних рівнів густоти стояння (або посіву) на ріст, розвиток та продуктивність гібридів сояшника в умовах Лівобережного Лісостепу України.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Світові тенденції свідчать, що оптимізація густоти посіву сояшника є одним із найважливіших завдань для аграріїв, оскільки вона безпосередньо впливає на врожайність та економічну ефективність вирощування, забезпечує раціональне застосування ресурсів довкілля (світла, води, поживних речовин) та сприяє максимальній реалізації генетичного потенціалу продуктивності гібридів. Зокрема, у роботах європейських дослідників V. Giannini, R.K. Soothar, A. Haj Sghaier із співавт. [11–13] підкреслюється, що оптимальна густина посіву не є статичною величиною, а залежить від генетичних особливостей гібрида, рівня вологозабезпеченості, родючості ґрунту та технології вирощування. Науковці S.A. Muhammed та ін. [14] стверджують, що у посушливих регіонах спостерігається тенденція до зниження рекомендованої густоти посіву для зменшення конкуренції за вологу та підвищення індивідуальної продуктивності рослин. Водночас, на думку S. Dong [15], для високоінтенсивних гібридів

дів, що вирощуються в умовах зрошення або достатнього зволоження, оптимальна густина може бути вищою для оптимізації врожаю з одиниці площі.

Аспектам впливу технологій вирощування, зокрема густоти посіву на специфічні характеристики гібридів, присвячені міжнародні публікації таких авторів, як A. Mijić, T.C. Tomasi, G.F. Nardón, R. Puttha, E. Shahini з колегами [16–20]. Зокрема, у своєму дослідженні впливу оптимізації густоти посіву гібридів соняшника на врожайність зерна, вміст та вихід олії, A. Mijić [16] дійшов висновку, що максимального врожаю в цій технології можна досягти виключно за умов належного ґрунтового живлення. Дослідження G. F. Nardón зі співавт. [18] розширює це розуміння, акцентуючи увагу не лише на густоті, а й на нормі висіву в умовах нульового обробітку ґрунту. Їхні результати свідчать, що просторове розміщення рослин істотно позначається на схожості та, як наслідок, на загальну врожайність. За даними R. Puttha та співавт. [19], генетичний потенціал гібридів має вагоме значення у їхній реакції на густоту посіву. Адже технології виробництва гібридного насіння постійно вдосконалюються, а кожен гібрид має унікальні характеристики, які визначають його адаптивність до умов вирощування. Це пояснюється дослідженням E. Shahini з колегами [20], які за допомогою багатомірного аналізу встановили, що реакція гібридів соняшника на чинники довкілля є варіативною. Їхня робота підкреслює необхідність індивідуального підходу до кожного гібрида під час розробки оптимальних агротехнологій. Отже, аналіз міжнародних наукових джерел свідчить про багатоаспектність проблеми та показує, що для досягнення високої продуктивності соняшника необхідно враховувати взаємодію густоти посіву, генетичних особливостей гібридів та специфічних умов навколишнього середовища.

Крім того, в Україні, вкрай важливи є питання оптимізації густоти посіву соняшника, зважаючи на значні сільськогосподарські площі під цією культурою у посушливих умовах південних та східних

регіонів. Роботами вітчизняних вчених, зокрема Л.В. Пелех та О.М. Онуфрійчук [21], О. Андрієнко [22], В.Д. Паламарчук та В.Ф. Підлубного [23], що вивчають адаптацію нових гібридів до різної густоти посіву в умовах України, підтверджено, що сучасні гібриди соняшника мають вищу пластичність та здатність адаптуватися до ширшого діапазону густоти порівняно з попередніми сортами. Особлива увага у праці В.В. Борисенко зі співавт. [24] приділяється визначенню впливу густоти на елементи структури врожаю (діаметр кошика, маса 1000 насінин, олійність) та їх взаємозв'язок з урожайністю в умовах нестабільного зволоження.

Автори О. Тимчишин та ін. [25] узагальнили вплив елементів технології вирощування, зокрема висоти рослин і діаметра кошиків, на продуктивність різностиглих гібридів соняшника залежно від густоти посіву та ширини міжрядь. Своєю чергою, Г.В. Пінковський і С.П. Танчик [26] зосередились на управлінні продуктивністю соняшника залежно від строків сівби та густоти стояння в посушливих умовах Правобережного Степу України, що безпосередньо відображає проблематику нашого дослідження. Ці аспекти були деталізовані в публікації І.М. Когут з колегами [27], які дослідили продуктивність гібридів соняшника залежно від густоти стояння рослин за різних строків сівби та підкреслили необхідність комплексного підходу до оптимізації технології. Незважаючи на значні обсяги досліджень, недостатньо опрацьованими залишаються питання щодо адаптації гібридів соняшника до екстремальних погодних умов, а також розробки сортів, які поєднують високу потенційну врожайність з підвищеною стресостійкістю до загущення та дефіциту вологи. Тому наші дослідження спрямовані на вивчення фізіологічних та генетичних механізмів, що лежать в основі реакції рослин соняшника на густоту посіву.

МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Польові дослідження проводили в умовах Лівобережного Лісостепу України

на дослідному полі ТОВ «Поле Знань» (с. Циганське Полтавського р-ну Полтавської обл.) впродовж двох вегетаційних періодів: у 2023 р. за сприятливих погодних умов та в 2024 р. в умовах посухи. Ґрунт — чорнозем типовий малогумусний. Аналізували вплив різної густоти посіву на формування висоти рослин, діаметра кошика та продуктивність чотирьох гібридів сояшника: Ґрут (Clearfield) (далі — Ґрут), Тор Сумо 7+ (Sumo) (далі — Тор Сумо), Старк 7+ (Sumo) (далі Старк) та Авалон 7+ (classic) (далі — Авалон). Схему польового дослідження наведено в *табл.*

Обліки, вимірювання та супутні спостереження виконували згідно з методикою проведення польових дослідів та методикою державного сорто випробування. Зокрема, середню площу листків, як важливий індикатор фотосинтетичної ефективності рослини, оцінювали класичним методом вирізання та зважування (методом площин). Середній діаметр кошика сояшника, що є прямим індикатором продуктивності та життєздатності рослини, визначали лінійкою на вибірці з 20–30 повністю дозрілих рослин. Середню висоту рослин сояшника, що слугує індикатором конкуренції за світло та загального розвитку, виявляли прямими вимірюваннями. Для цього на дослідних ділянках відбирали репрезентативну вибірку рослин та за допо-

могою рулетки вимірювали їхню висоту від поверхні ґрунту до верхньої точки кошика. Вимірювання висоти рослин (см) проводилися за різних варіантів густоти посіву, яка варіювалася від 30 до 120 тис. шт./га. Усі вимірювання здійснювали на репрезентативних ділянках з урахуванням трикратної повторності дослідів. Для статистичної обробки отриманих даних застосовували дисперсійний аналіз, що дало змогу встановити достовірність впливу густоти посіву на показники продуктивності.

**РЕЗУЛЬТАТИ
ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ**

Вплив густоти посіву на висоту рослин гібридів сояшника. За результатами дослідження середньої висоти рослин гібридів сояшника (Ґрут, Тор Сумо, Старк, Авалон) залежно від густоти посіву оцінено адаптивність та ростові характеристики гібридів у різних погодних умовах (сприятливі у 2023 р. та посушливі у 2024 р.). Аналіз усереднених даних засвідчив про значну варіабельність висоти рослин серед досліджуваних гібридів сояшника, а також залежність цього показника від густоти посіву (*рис. 1*).

Зокрема, гібрид Ґрут зафіксував стійку тенденцію до збільшення висоти рослини зі зростанням густоти посіву. Мінімальну висоту 167,0 см відмічено за густоти стояння рослин 30 тис. росл./га, а максимальну — 180,0 см за густоти 120 тис. росл./га. Це свідчить про високу пластичність гібрида Ґрут та його здатність ефективно конкурувати за ресурси в умовах підвищеної густоти, що є важливим показником в умовах зміни клімату.

Гібрид Тор Сумо характеризується найменшою висотою серед усіх досліджуваних гібридів. Його висота коливається від 125,5 см (30 тис. росл./га) до 145,5 см (100 тис. росл./га). На відміну від сорту Ґрут, спостерігається інша динаміка: після досягнення максимуму за 100 тис. росл./га, висота дещо знижується з подальшим збільшенням густоти посіву (до 135,0 см за 120 тис. росл./га). Це може вказувати на його схильність до пригнічення або ви-

Схема польового дослідів

Гібрид	Густота посіву, тис. шт./га	Ширина міжряддя, см	Умовний розподіл насіння, шт./м ²
Ґрут Тор Сумо Старк Авалон	30	70	2,1
	40	70	2,8
	50	70	3,5
	60	70	4,2
	70	70	4,9
	80	70	5,6
	90	70	6,3
	100	70	7,0
	110	70	7,7
	120	70	8,4

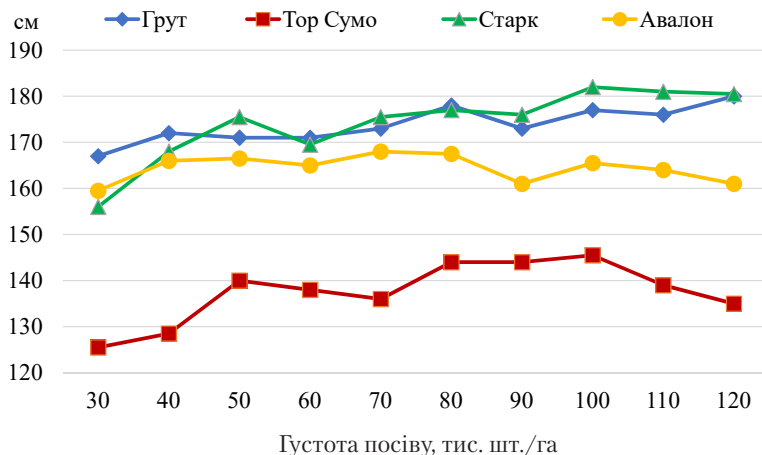


Рис. 1. Середня висота рослин гібридів соняшника залежно від густоти посіву, см (середнє за 2023–2024 рр.)

лягання за дуже високої густоти, особливо в умовах водного стресу.

Гібрид Старк демонструє стабільне збільшення висоти рослин із підвищенням густоти посіву, досягаючи піку в 182,0 см (100 тис. росл./га). Цей гібрид належить до високорослих і характеризується підвищеною реакцією на збільшення густоти, що може бути пов'язано з його високим потенціалом росту та стійкістю до вилягання, навіть за умов дефіциту вологи.

Гібрид Авалон має відносно стабільну висоту рослин у діапазоні від 159,5 см до 168,0 см. Максимальне значення (168,0 см) спостерігається за густоти стояння 70 тис. росл./га. З подальшим посиленням густоти посіву висота дещо зменшується (до 161,0 см за 90 та 120 тис. росл./га), що може свідчити про його меншу толерантність до надмірного загущення порівняно з гібридами Грут та Старк, особливо в умовах стресу (2024 р.).

Загалом, результати підтверджують, що зростання показника густоти посіву переважно призводить до збільшення висоти рослин соняшника через посилення конкуренції за світло. Однак, ця реакція є гібридоспецифічною і може бути модифікована погодними умовами. Гібриди Грут та Старк виявилися більш адаптованими до ущільнених посівів, зберігаючи значну

висоту навіть у посушливих умовах, що є важливою ознакою для сучасного агро-виробництва.

Проведено корелятивний аналіз та визначено, що для більшості гібридів простежується позитивна кореляція між густотою посіву та висотою рослин. Такий аналіз допомагає обґрунтувати адаптивний потенціал гібридів в умовах зміни клімату. Це пояснюється посиленням конкуренції за світло за збільшення кількості рослин на одиницю площі, що стимулює витягування стебла.

Встановлені високі позитивні значення коефіцієнтів кореляції Пірсона (r) для гібридів Грут ($r=0,873$) та Старк ($r=0,855$) підтверджують їхню здатність до витягування стебла соняшника в умовах загущення. Ці показники кореляції свідчать про високу пластичність гібридів. Така властивість є важливою перевагою, оскільки дає можливість гібридам ефективно реалізовувати потенціал урожайності. Вони здатні до цього навіть за умов відхилення від рекомендованої густоти або за вирощування в регіонах із нестабільним зволоженням, де загущення може бути ефективною стратегією для збереження вологи.

Помірна кореляція для гібрида Тор Сумо ($r=0,592$) демонструє не менш виражену реакцію на зміну густоти посіву.

Його висота зростає незначно зі збільшенням густоти, а за дуже високих значень (110–120 тис. росл./га) навіть спостерігається тенденція до її зниження. Така властивість може вказувати на середню пластичність та обмежену здатність цього гібрида до адаптації в умовах загушення, що робить його більш чутливим до відхилень від оптимальної густоти посіву.

Практично відсутня негативна кореляція для Авалона ($r = -0,112$) свідчить про його обмежену реакцію на загушення щодо висоти та низьку пластичність, оскільки він практично не реагує на зміну густоти посіву збільшенням висоти. Це може бути пов'язано з іншими адаптивними механізмами або чутливістю до стресу та потребує більш точного дотримання рекомендованої густоти посіву.

Отже, за даними отриманих результатів дослідження встановлено, що для гібридів Грут та Старк оптимальний діапазон густоти посіву для досягнення максимальної висоти лежить у межах 80–120 тис. росл./га. Це вказує на їхню придатність для інтенсивних технологій вирощування, де висока густота може бути виправданою з точки зору формування врожаю. Для гібрида Авалон оптимальна густота для формування максимальної висоти знаходиться в діа-

пазоні 50–80 тис. росл./га. Подальше збільшення густоти не призводить до значного приросту висоти, а може навіть негативно впливати на інші показники продуктивності. Для гібрида Тор Сумо максимальна висота одержано за густоти 100 тис. росл./га, але загалом його висота є значно меншою порівняно з іншими гібридами. Це може вказувати на необхідність підбору інших агротехнічних прийомів для цього гібрида, або його використання в умовах, де низькорослість є перевагою (наприклад, для уникнення вилягання).

Вплив густоти посіву на діаметр кошика гібридів соняшника. Діаметр кошика є одним з основних елементів структури врожаю, що безпосередньо корелює з кількістю та якістю насіння. Дослідження проведено для виявлення оптимальної густоти посіву, що забезпечує максимальний розвиток кошика для кожного гібрида соняшника в умовах зміни клімату.

Аналіз усереднених даних показника діаметра кошика гібридів соняшника (середні показники за 2023–2024 рр.) засвідчив чітку зворотну залежність між густотою посіву та діаметром кошика для більшості досліджуваних гібридів соняшника (рис. 2).

Так, гібрид Грут за мінімальної густоти посіву (30 тис. росл./га) формує кошик

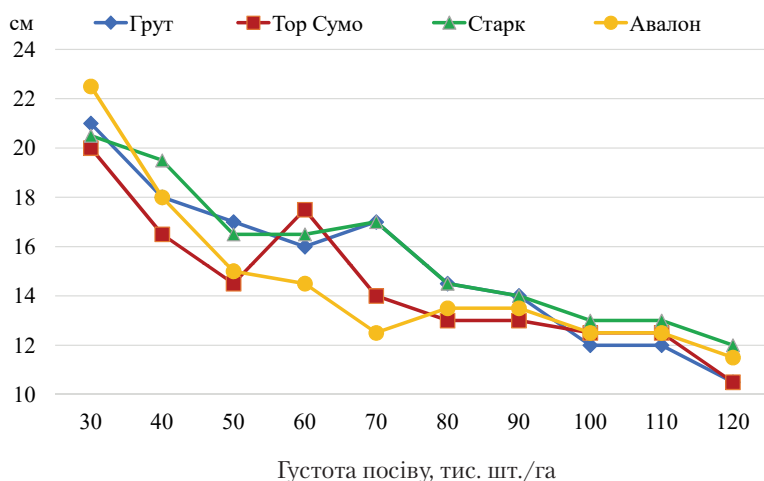


Рис. 2. Середній діаметр кошика гібридів соняшника залежно від густоти посіву, см (середнє за 2023–2024 рр.)

діаметром 21,0 см, що є одним із найбільших показників. Зі збільшенням густоти посіву діаметр кошика поступово зменшується, досягаючи мінімального значення 10,5 см за 120 тис. росл./га. Це свідчить про його високу пластичність та здатність формувати великий кошик за оптимальних умов, але також і про чутливість до загушення.

Гібрид Тор Сумо засвідчив про дещо іншу динаміку. За густини стояння рослин 30 тис. шт./га, його кошик становить 20,0 см. Відмічено, що за густоти 60 тис. росл./га спостерігається невелике збільшення діаметра до 17,5 см, після чого відбувається типове зменшення до 10,5 см (за 120 тис. росл./га). Ця особливість може вказувати на певну толерантність до помірного загушення або на специфічну реакцію на конкуренцію.

Гібрид Старк за густоти 30 тис. росл./га формує кошик діаметром 20,5 см. Його реакція на збільшення густоти є типовою: поступове зменшення діаметра до 12,0 см за 120 тис. росл./га. Цей гібрид показує стабільну, хоча й негативну, кореляцію між густотою посіву та розміром кошика.

Гібрид Авалон виділяється найбільшим діаметром кошика за мінімальної густоти посіву (22,5 см за 30 тис. росл./га). Однак, зі збільшенням густоти, діаметр його кошика зменшується найбільш різко серед усіх гібридів, досягаючи 12,5 см вже за 70 тис. росл./га і далі знижується до 11,5 см за 120 тис. росл./га. Це може свідчити про його високий потенціал за оптимальних умов, а також про високу чутливість до конкуренції, особливо у посушливих умовах.

Усереднення даних за 2023 (сприятливі умови) та 2024 (посушливі умови) роки допомагає оцінити загальну тенденцію. Очевидно, що в посушливих умовах діаметр кошика був меншим через водний стрес. Тому, представлені значення відображають середню реакцію гібридів на густоту посіву в умовах різної вологозабезпеченості. Гібриди, які зберігають відносно більший діаметр кошика за підвищеної густоти навіть за усередненими показниками, можуть

бути більш адаптованими до стресових умов.

Проведений аналіз кореляційної залежності діаметра кошика від густоти посіву засвідчив, що для всіх гібридів спостерігається чітка негативна кореляція між цими показниками (для гібридів Грут — $r = -0,963$; Тор Сумо — $r = -0,898$; Старк — $r = -0,957$; Авалон — $r = -0,958$), що дає можливість обґрунтувати адаптивний потенціал гібридів в умовах зміни клімату. А саме: зі збільшенням кількості рослин на одиницю площі посилюється внутрішньовидова конкуренція за ключові ресурси — світло, вологу та елементи живлення. Це зумовлено тим, що кожна окрема рослина отримує менше ресурсів, що призводить до зменшення її індивідуальних розмірів, включаючи діаметр кошика. Висока обернена кореляційна залежність для гібридів соняшника демонструє його високу чутливість.

Аналіз показує, що найбільший діаметр кошика для всіх гібридів формуються за мінімальної густоти посіву (30–40 тис. росл./га). Це підтверджує, що для реалізації генетичного потенціалу гібридів щодо розміру кошика, необхідно забезпечити рослинам достатній простір та доступ до ресурсів. Однак, із практичної точки зору, надто низька густота може призвести до недобору врожаю з одиниці площі. Тому важливо знайти оптимум між індивідуальним розвитком кошика та загальною продуктивністю агроценозу.

Усереднені дані пояснюють, що гібриди Грут і Старк проявляють найкращу адаптивність та стресостійкість до посушливих умов, підтримуючи відносно стабільний діаметр кошика навіть за підвищення густоти посіву.

Вплив густоти посіву на площу листової поверхні гібридів соняшника. Площа листової поверхні, як основний показник фотосинтетичної активності рослин, безпосередньо впливає на формування врожаю. За результатами аналізу дії густоти посіву на площу листової поверхні гібридів соняшника (середні показники за 2023–2024 рр.) встановлено оптимальні значення цього

чинника для кожного гібрида (Грут, Тор Сумо, Старк, Авалон), що допомагає максимально реалізувати їхній генетичний потенціал за різних погодних умов.

Проведений аналіз засвідчив чітку зворотну залежність між густиною посіву та площею листкової поверхні для всіх досліджуваних гібридів соняшника (рис. 3). Така реакція є очікуваною, оскільки збільшення кількості рослин на одиницю площі посилює конкуренцію за світло, воду та поживні речовини, що призводить до зменшення індивідуальної площі листків кожної рослини.

Встановлено, що гібрид Грут за мінімальної густоти посіву (30 тис. росл./га) формує значну площу листкової поверхні — 54,0 дм². Зі збільшенням густоти посіву площа листкової поверхні поступово зменшується, досягаючи мінімального значення 16,5 дм² за 120 тис. росл./га. Це свідчить про те, що цей гібрид характеризується високим потенціалом формування асиміляційного апарату за оптимальних умов, водночас є чутливим до загущення.

Гібрид Тор Сумо характеризується відносно меншою площею листкової поверхні порівняно з Грутом та Авалоном. Максимальна площа листкової поверхні становить 38,0 дм² за густоти стояння 30 тис. росл./га, а мінімальна — 9,0 дм² за 120 тис. росл./га. Спостерігається стабільне зни-

ження площі листкової поверхні зі зростанням густоти посіву соняшника.

Гібрид Старк за густоти посіву 30 тис. росл./га формує площу листкової поверхні 34,5 дм². Як і для інших гібридів простежується зменшення площі листкової поверхні за збільшення густоти посіву, сягаючи значення 11,5 дм² за 120 тис. росл./га.

Про високий потенціал фотосинтетичної активності за оптимальних умов свідчить площа листкової поверхні гібрида Авалон 54,5 дм² (за 30 тис. росл./га). Однак досить різке зменшення асиміляційної площі до 10,0 дм² зі збільшенням густоти посіву до 120 тис. росл./га вказує на високу чутливість гібрида до конкуренції за ресурси в умовах загущення.

Виявлено обернену кореляційну залежність між густиною посіву та площею листкової поверхні для всіх досліджуваних гібридів соняшника: Грут — $r = -0,983$; Тор Сумо — $r = -0,993$; Старк — $r = -0,980$; Авалон — $r = -0,940$. Такі показники свідчать про посилення внутрішньовидової конкуренції гібридів соняшника за світло, воду та поживні речовини, що призводить до зменшення розмірів індивідуального асиміляційного апарату кожної рослини. Адже пластичність гібридів до зміни густоти посіву визначається його здатністю адаптувати свої морфологічні ознаки, зокрема площу листків, до змін умов вирощування.

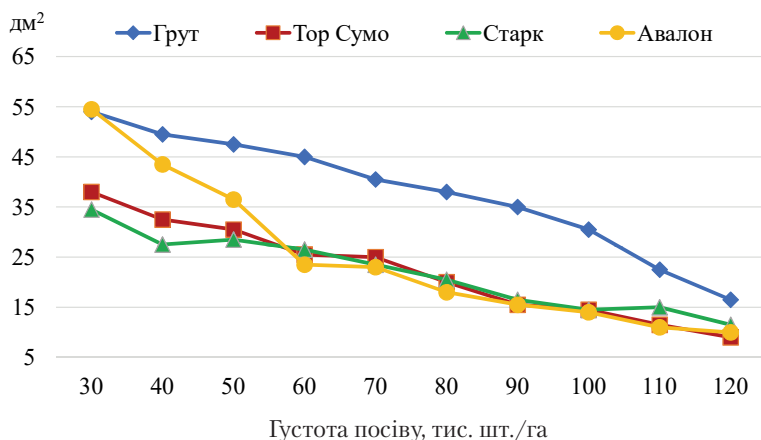


Рис. 3. Середня площа листків гібридів соняшника залежно від густоти посіву, дм² (середнє за 2023–2024 рр.)

Вплив густоти посіву на продуктивність гібридів соняшника. Оскільки врожайність є інтегральним показником, що відображає ефективність вирощування культури та безпосередньо впливає на економічну доцільність виробництва, проведено аналіз, що допомагає виявити найкращу густоту посіву для кожного гібрида для оптимального використання їх генетичного потенціалу за різних погодних умов.

Аналіз урожайності гібридів соняшника залежно від густоти посіву (2023–2024 рр.) засвідчив, що для більшості гібридів спостерігається криволінійна залежність з наявністю оптимальної густоти. Після досягнення піку врожайність починає знижуватися за подальшого загушення рослин соняшника (рис. 4).

Встановлено поступове збільшення врожайності гібрида Грут від 2,7 т/га (30 тис. росл./га) до максимуму 3,3 т/га (70 тис. росл./га). Подальше загушення спричинило зниження врожайності до 2,5 т/га (120 тис. росл./га). Це вказує на оптимальну густоту для Грута в діапазоні 60–70 тис. росл./га. Для гібрида Тор Сумо також відмічено зростання врожайності від 2,5 т/га (30 тис. росл./га) до максимуму 3,1 т/га (70–80 тис. росл./га). Після цього врожайність зменшується до 2,4 т/га (120 тис.

росл./га). Оптимальна густота для гібрида Тор Сумо знаходиться в діапазоні 70–80 тис. росл./га, що дещо вище, ніж для гібрида Грут. Схожа динаміка відмічена для гібрида Старк: урожайність збільшується від 2,6 т/га (30 тис. росл./га) до максимуму 3,2 т/га (70–80 тис. росл./га). Подальше загушення призводить до зниження врожайності до 2,5 т/га (120 тис. росл./га). Для гібрида Авалон найвища врожайність спостерігається за густоти 30 тис. росл./га (2,8 т/га), яка досягає максимуму 3,1 т/га за 60–70 тис. росл./га. Однак, його урожайність зменшується дуже різко за подальшого збільшення густоти, досягаючи мінімального значення 2,3 т/га за 120 тис. росл./га. Це вказує на його більшу чутливість до загушення порівняно з іншими гібридами.

Проведений кореляційний аналіз залежності врожайності соняшника від густоти посіву підтвердив, що для всіх гібридів соняшника простежується помірна або слабка кореляція між цими чинниками, яка відображає криволінійний характер залежності (зростання до оптимуму, потім зниження). Числові показники коефіцієнта кореляції Пірсона (r) між густрою посіву та урожайністю для кожного гібрида є такими: Грут — $r = -0,052$, Тор

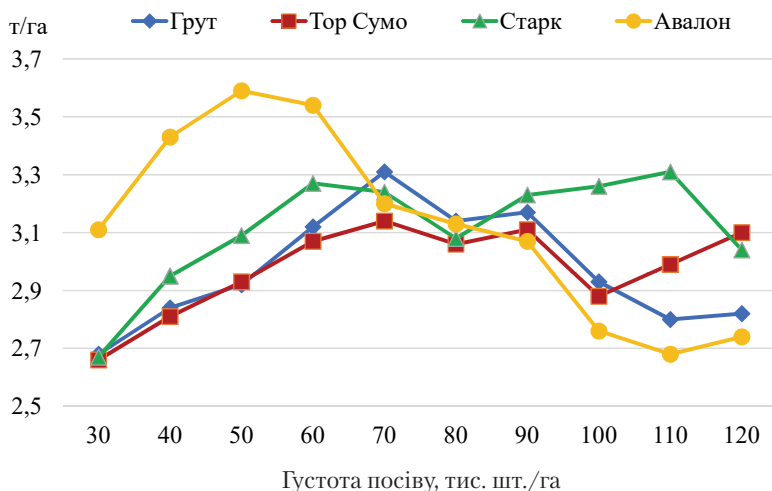


Рис. 4. Урожайність гібридів соняшника залежно від густоти посіву, т/га (середнє за 2023–2024 рр.)

Сумо — $r=0,053$, Старк — $r=0,053$, Авалон — $r=-0,292$. Низькі значення коефіцієнтів кореляції (близькі до нуля) свідчать, що лінійна модель не повністю описує взаємозв'язок між густотою посіву та врожайністю соняшника. Це пояснює наше припущення, що врожайність гібридів не просто зростає або знижується з густотою посіву, а проходить через оптимальне значення кількості висіву рослин на гектар, за якої врожайність буде максимальною. Від'ємна кореляція для Грута та Авалона свідчить про переважання ефекту зниження урожайності після оптимуму.

На основі отриманих результатів виділено оптимальні діапазони густоти посіву, які є важливими для практичного застосування. А саме: для гібрида Грут оптимальна густина для максимальної врожайності становить 60–70 тис. росл./га; для гібридів Тор Сумо та Старк цей діапазон сягає 70–80 тис. росл./га; для гібрида Авалон — 60–70 тис. росл./га, але з більш вираженим зниженням за подальшого загущення. Одержані показники фіксують гібридоспецифічність оптимальної густоти посіву соняшника, що необхідно враховувати під час планування сівби.

Отже, взаємозв'язок урожайності гібридів соняшника з іншими морфологічними показниками (діаметр кошика та площа листків) підтверджує, що ці морфологічні ознаки є елементами структури врожаю, і їх сукупна реакція на густоту посіву визначає кінцеву продуктивність. Оптимальна густина обумовлюється балансом між кількістю рослин на одиницю площі та індивідуальним розвитком кожної рослини. Отримані результати дослідження відображають реакцію гібридів на густоту посіву в умовах різної вологозабезпеченості (сприятливі у 2023 р. та посушливі у 2024 р.) через водний стрес. Гібриди соняшника, які зберігають відносно вищу врожайність за підвищеної густоти посіву, можуть бути більш адаптованими до стресових умов.

ВИСНОВКИ

Оптимальна густина посіву соняшника для досягнення максимальної висоти рос-

лин значно варіює залежно від гібрида. Для гібридів Грут та Старк найбільш сприятливим є діапазон густоти 80–120 тис. росл./га, що підкреслює їх пристосованість до інтенсивних агротехнологій. Для чутливого до загущення гібрида Авалон максимальна висота формується за густоти 50–80 тис. росл./га, а для низькорослого гібрида Тор густина стояння рослин 100 тис. росл./га є перевагою, що забезпечує уникнення вилягання.

Найбільший діаметр кошика соняшника, як важливий індикатор реакції гібридів на густоту посіву та рівень вологозабезпеченості, для всіх гібридів утворюється за мінімальної густоти посіву (30–40 тис. росл./га). Це пояснює про необхідність надання рослинам достатнього простору для повного розкриття їхнього генетичного потенціалу. Гібриди Грут і Старк засвідчили кращу адаптивність та стійкість до стресових умов порівняно з гібридами Тор Сумо і Авалон. Вони зберігають відносно більший діаметр кошика навіть за підвищеної густоти, що доводить їхню придатність для вирощування в умовах інтенсивних технологій та нестабільної вологозабезпеченості.

Зменшення площі листової поверхні, як індикатора фотосинтетичної активності та чутливості гібридів соняшника Грут, Тор Сумо, Старк та Авалон, обернено корелює зі збільшенням густоти посіву (коефіцієнт Пірсона коливається в межах $r=-0,940\dots-0,993$). Це обумовлено посиленням внутрішньовидової конкуренції за ресурси. Найбільш чутливим до загущення виявився гібрид Авалон з найбільшою площею листової поверхні за мінімальної густоти (54,5 дм²/росл. за 30 тис. росл./га), що свідчить про його високий потенціал та обмежену пластичність до загущення. Вищою адаптивністю і стресостійкістю характеризуються гібриди Грут, Тор Сумо та Старк, які зберігають відносно більшу площу листової поверхні за підвищеної густоти.

Максимальну врожайність гібридів соняшника Грут та Авалон забезпечує діапазон густоти посіву 60–70 тис. росл./га, тоді як для Тор Сумо і Старк він сягає 70–80 тис. росл./га.

Гібриди соняшника, які зберігають відносно високу продуктивність за підвищеної густоти, є більш адаптованими до стресових умов. Для одержання максимально-го врожаю необхідно враховувати не лише оптимальну кількість рослин на гектар,

а й їхню здатність формувати елементи структури врожаю (діаметр кошика, площа листків, висоту рослин) в умовах інтенсивної конкуренції, зміни клімату та вологозабезпечення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Польовий, А. М., Божко, Л. Ю., & Барсукова, О. А. (2022). Агрокліматичні аспекти продуктивності соняшника Одещині в умовах потепління клімату. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*, 5(44), 249–254. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.38>.
2. Kozina, T., Ovcharuk, O., Trach, I., Levytska, V., Ovcharuk, O., Hutsol, T., ... Dziedzic, K. (2018). Spread mustard and prospects for biofuels. In *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation: ICORES 2017* (pp. 791–799). Cham: Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_77.
3. Рослинництво України 2021. Статистичний збірник (2022). Київ: Державна статистика України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>.
4. Yeremenko, O. A., Kalytko, V. V., Kalenska, S. M., & Malkina, V. M. (2018). Assessment of ecological plasticity and stability of sunflower hybrids (*Helianthus annuus* L.) in Ukrainian Steppe. *Ukrainian Journal of Ecology*, (1), 289–296. DOI: https://doi.org/10.15421/2018_214.
5. Костюкевич, Т. К., Данілова, Н.В., Колосовська, В. В., & Корень, В. В. (2023). Сучасний стан та перспективи виробництва основних олійних культур в Україні. In: *Creative approaches in modern scientific and practical activities: collective monograph* (pp. 9–15). GS publishing service, California, USA. DOI: <https://doi.org/10.51587/9798-9866-95990-2023-013>.
6. Abas, S. A., Abdulhamed, Z. A., & Abood, N. M. (2025). Impact of climate change on the growth, yield, and sunflower cultivar performance under the influence of plant density. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 56(Special), 10–19. DOI: <https://doi.org/10.36103/9z5web62>.
7. Melnyk, A., Akuaku, J., & Makarchuk, A. (2017). State and prospects of sunflower production in Ukraine. *Agrofor International Journal*, 2(3), 116–123. DOI: <https://doi.org/10.7251/AGRENG1703116M>.
8. Поляков, О. І., Нікітенко, О. В., & Сорока, А. І. (2022). Продуктивність гібридів соняшнику залежно від густоти стояння рослин за різних строків сівби. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 32, 99–111. DOI: <https://doi.org/10.36710/IOC-2022-32-10>.
9. Каламбет, В. В. (2025). Формування продуктивності соняшнику (*Helianthus annuus* L.) залежно від агротехнічних прийомів. *Scientific Progress & Innovations*, 28(2), 81–86. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2025.28.02.13>.
10. Kandil, A. A., Sharief, A. E., & Odam, A. M. A. (2017). Response of some sunflower hybrids (*Helianthus annuus* L.) to different nitrogen fertilizer rates and plant densities. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(6), 238990. DOI: <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/2.6.26>.
11. Giannini, V., Mula, L., Carta, M., Patteri, G., & Roggero, P. P. (2022). Interplay of irrigation strategies and sowing dates on sunflower yield in semi-arid Mediterranean areas. *Agricultural Water Management*, 260, 107287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107287>.
12. Soothar, R. K., Singha, A., Soomro, S. A., Chachar, A. U. D., Kalhor, F., & Rahaman, M. A. (2021). Effect of different soil moisture regimes on plant growth and water use efficiency of Sunflower: experimental study and modeling. *Bulletin of the National Research Centre*, 45(1), 121. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00580-4>.
13. Haj Sghaier, A., Khaeim, H., Tarnawa, A., Kovács, G. P., Gyuricza, C., & Kende, Z. (2023). Germination and seedling development responses of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds to temperature and different levels of water availability. *Agriculture*, 13(3), 608. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030608>.
14. Muhammed, S. A., Ahmed, S. M., Mustafa, K. M., Ahmed, R. M., Mustafa, K. F., & Ibrahim, D. M. (2025). Influence of plant densities and sowing conditions on Sunflower cultivars yield under semi-arid conditions. *Journal of Kerbala for Agricultural Sciences*, 12(1), 175–195. DOI: <https://doi.org/10.59658/jkas.v12i1.3280>.
15. Dong, S., Wang, G., Li, X., & Kang, Y. (2023). A Trade-Off between the Growing Performance and Sowing Density of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) under Fertigation in an Arid Saline Area. *Agronomy*, 13(1), 179. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010179>.
16. Mijić, A., Liović, I., Sudarić, A., Gadžo, D., Duvnjak, T., Šimić, B., ... Markulj Kulundžić, A. (2021). Influence of plant density and hybrid on grain yield, oil content and oil yield of sunflower. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 86(1), 27–33. URL: <https://hrca.srce.hr/255025>.
17. Tomasi, T. C., Reis, L. C., Taira, T. L., Soares, J. S., Tomiozzo, R., Uhlmann, L. O., ... Sorgato, J. C. (2024). Plant density and location: optimization of growth and quality of cut sunflower in tropical and subtropical environments. *Plants*, 13(19), 2810. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13192810>.
18. Nardón, G. F., Botta, G. F., Aikins, K. A., Rivero, D., Bienvenido, F., & Antille, D. L. (2021). Seeding

- system configuration effects on sunflower seedling emergence and yield under no-tillage. *Soil Systems*, 5(4), 72. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems5040072>.
19. Puttha, R., Venkatachalam, K., Hanpakdeesakul, S., Wongsu, J., Paramethanuwat, T., Srean, P., ... Charoenphun, N. (2023). Exploring the potential of sunflowers: agronomy, applications, and opportunities within bio-circular-green economy. *Horticulturae*, 9(10), 1079. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101079>.
 20. Shahini, E., Myalkovsky, R., Nebaba, K., Ivanyshyn, O., & Liubytka, D. (2023). Economic and biological characteristics and productivity analysis of sunflower hybrids. *Scientific Horizons*, 26(8), 83–95. DOI: <https://doi.org/10.48077/scihor8.2023.83>.
 21. Пелех, Л. В., & Онуфрійчук, О. М. (2025). Особливості густоти стояння рослин соняшнику. *Аграрні інновації*, (29), 107–112. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.29.18>.
 22. Andriienko, O., Vasylovskaya, K., Andriienko, A., Vasylovskiy, O., Mostipan, M., & Salo, L. (2020). Response of sunflower hybrids to crop density in the steppe of Ukraine. *Helia*, 43(72), 99–111. DOI: <https://doi.org/10.1515/helia-2020-0011>.
 23. Паламарчук, В. Д., & Підлубний, В. Ф. (2021). Продуктивність гібридів соняшнику залежно від елементів технології вирощування. *Сільське господарство та лісівництво*, 3(22), 29–44. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2021-3-3>.
 24. Борисенко, В. В., Карнаух, О. Б., Накльока, Ю. І., Новак, А. В., Усик, С. В., & Коваль, Г. В. (2020). Вплив висоти рослин і діаметру кошиків на продуктивність соняшника залежно від густоти посіву та ширини міжрядь. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.113.4>.
 25. Tymchyshyn, O., Rudavska, N., & Behen, L. L. (2021). Prospects of sunflower growing and the influence of plant density on productivity. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*, 70(2), 73–83. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2021-\(70\)-2-6](https://doi.org/10.32636/01308521.2021-(70)-2-6).
 26. Pinkovskyi, H., & Tanchyk, S. (2021). Management of productivity of sunflower plants depending on terms of sowing and density of standing in arid conditions of the Right-bank Steppe of Ukraine. *Agronomy science*, 76(1), 21–38. DOI: <https://doi.org/10.24326/as.2021.1.2>.
 27. Когут, І. М., Валентюк, Н. О., & Шетінікова, Л. А. (2020). Формування продуктивності соняшнику залежно від густоти стояння рослин в умовах Південного Степу України. *Таврійський науковий вісник*, (112), 93–98. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.112.13>.

Стаття надійшла до редакції журналу 21.08.2025

РТУТЬ У НАДЗЕМНИХ ЧАСТИНАХ *TRIFOLIUM REPENS* L. ТА *TRIFOLIUM PRATENSE* L.: НАКОПИЧЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ФІТОЕКСТРАКЦІЇ

А.М. Гапоненко¹, А.М. Гнатюк², М.В. Кулик³,
В.І. Бондарь¹, О.Б. Блюм²

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)
e-mail: andrreygaпоненко@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4215-2216

e-mail: lera_bond@email.ua; ORCID: 0000-0002-8737-3568

² Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України (м. Київ, Україна)
e-mail: gnatiukalla@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5001-971X

e-mail: oleg_blum@ukr.net; ORCID: 0000-0002-0765-9866

³ ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів»

e-mail: maksymkulyk@ukr.net; ORCID: 0009-0001-8206-9735

Ртуть (Hg) є одним із найнебезпечніших забруднювачів довкілля через високу токсичність та мобільність. Вона становить значну загрозу для екосистем та здоров'я людини, особливо в районах, що зазнали впливу промислової та техногенної діяльності. Техногенні території, зокрема зони впливу підприємств, несуть значну небезпеку для населення та біорізноманіття. Фіторе mediaція є екологічно безпечною та економічно вигідною технологією для очищення забруднених ґрунтів. У цьому контексті дослідження було спрямовано на оцінку та порівняння фіторе mediaційного потенціалу двох поширених видів місцевої флори — конюшини повзучої (*Trifolium repens* L.) та конюшини лучної (*Trifolium pratense* L.). Дослідження проводили *in situ* на ділянках із різним рівнем техногенного забруднення ґрунтів ртуттю (в діапазоні 0,04–5,26 мг/кг). Концентрацію Hg у зразках ґрунту та висушеній надземній масі рослин визначали методом атомної абсорбції за допомогою аналізатора ртуті DMA-80 evo (Milestone, Італія). Для оцінки здатності рослин до накопичення токсиканта розраховували біо-концентраційний фактор (BF) — співвідношення концентрації ртуті у надземній масі рослин до її концентрації у ґрунті. Встановлено, що вміст Hg у надземній масі обох видів конюшини зростає разом зі ступенем забруднення ґрунту. Максимальні зафіксовані концентрації становили $0,25 \pm 0,01$ мг/кг для *T. repens* та $0,45 \pm 0,01$ мг/кг для *T. pratense*. Важливо, що на ділянці з найменшою концентрацією ртуті (0,04 мг/кг) обидва види продемонстрували $BF > 1$, що вказує на їхній потенціал як гіперакумуляторів у цих умовах. Результати підтверджують, що обидва види конюшини можуть бути ефективно інтегровані в системи фіторе mediaції ртуті. *Trifolium pratense* виявилася перспективнішим видом для фітоекстракції завдяки більшій надземній біомасі та здатності до накопичення більшої кількості цього металу на забруднених ґрунтах. Подальші дослідження мають бути спрямовані на визначення порогів фітотоксичності, вивчення механізмів біоаккумуляції та розробку безпечних шляхів утилізації забрудненої біомаси.

Ключові слова: фіторе mediaція, важкі метали, Hg, забруднення, коефіцієнт біо-аккумуляції, фітотоксичність, *Fabaceae*, стійкість рослин, забруднення ґрунтів.

ВСТУП

Забруднення довкілля важкими металами, зокрема ртуттю (Hg), є актуальною глобальною екологічною проблемою. Цей

елемент належить до найтоксичніших і не виконує жодних біологічних функцій у рослин. Висока мобільність ртуті в атмосфері сприяє її транспортуванню та випадінню навіть на віддалених від джерел забруднення територіях [1]. За даними Агентства

з охорони навколишнього середовища США (EPA) та Агентства з реєстру токсичних речовин та захворювань (ATSDR), Hg посідає третє місце у пріоритетному списку небезпечних речовин після миш'яку та свинцю [2; 3].

Основними джерелами Hg-контамінації є гірничо-металургійні підприємства, хімічна промисловість, звалища промислових і побутових відходів. Значний внесок у забруднення здійснюють також викиди теплоелектростанцій, що спалюють вугілля, а в минулому — використання ртутних пестицидів у сільському господарстві [4; 5]. Додатковим джерелом надходження ртуті у довкілля є воєнно-техногенні процеси, що супроводжують бойові дії [6].

Вміст ртуті в ґрунтах фонових територій України варіює залежно від природних та антропогенних чинників. Поблизу промислових зон і полігонів відходів концентрація елементу у ґрунтах і рослинних угрупованнях істотно перевищує природний рівень. За даними літератури, підвищений вміст Hg може спостерігатися на відстані до 7 км від джерела забруднення [7]. Гранично допустима концентрація ртуті у ґрунтах України встановлена на рівні 2,1 мг/кг [8].

Одним із найзабрудненіших ртуттю об'єктів в Україні є територія колишнього ВАТ Завод «Радикал» у Києві, який до 1996 р. спеціалізувався на виробництві пінополіуретану, бертолетової солі, гермобутилу та засобів захисту рослин [7]. Ремедіація ґрунтів цієї території та систематичний моніторинг стану довкілля залишаються актуальними завданнями.

Роль рослин у процесах очищення природного середовища є беззаперечною, однак дані щодо впливу Hg на конкретні види, а також механізми накопичення та біоутилізації цього металу залишаються обмеженими.

Для формування ефективних стратегій фіторемердіації важливим є дослідження потенціалу біоаккумуляції ртуті місцевими видами, стійкими до забруднення. Поєднання автохтонних рослин та сучасних агротехнологій може стати перспективним

підходом до відновлення екосистем, забруднених ртуттю.

Метою цього дослідження було визначити рівні накопичення ртуті у надземних органах рослин видів роду *Trifolium* L. (*Fabaceae*), виявлених в зоні антропогенного забруднення, та порівняти їх із показниками контрольних рослин, відібраних на незабруднених територіях, щоб оцінити фіторемердіаційний потенціал цих видів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання забруднення ґрунтів важкими металами, зокрема і ртуттю, та можливості їх ремедіації за допомогою рослин широко висвітлюється у закордонних і вітчизняних публікаціях. За даними, які наводяться у статті В. Ковальчук [7], у забруднених ґрунтах Києва вміст ртуті коливається від 0,5 до 2 мг/кг, однак у локальних ділянках може сягати 10 мг/кг і більше. А. Самчук та ін. [9] зазначають, що найбільша частка важких металів у ґрунтах зосереджена в органічній формі (34–44%, подекуди до 52%), до того ж максимальні концентрації спостерігаються у верхньому гумусовому горизонті. Ртуть здебільшого утворює з гуміновими кислотами розчинні та малорухомі в кислому середовищі комплекси. Е. Tiodar та ін. [10] вказують, що зниження рН ґрунтового розчину сприяє підвищенню мобільності Hg.

Попри високу токсичність, ртуть (Hg) належить до найменш досліджених елементів у контексті фіторемердіації. Це пояснюється її хімічними властивостями та низькою мобільністю в ґрунтовому середовищі. Дані Е. Tiodar та ін. [10] засвідчують, що низка видів рослин здатні ефективно акумулювати або стабілізувати Hg у своїх тканинах, знижуючи її біодоступність для інших організмів. Значні концентрації цього елементу можуть акумулювати деякі сільськогосподарські культури, зокрема бобові, картопля, салат і морква [7].

Ж. Sharma та ін. [11] зазначають, що механізми ремедіації ртуті за участю рослин включають фітоекстракцію (перенесення Hg у надземні органи), фітостабілізацію

(фіксацію Hg у кореневій зоні) та фітоволатилізацію (перетворення Hg на леткі форми). Важливу роль у цих процесах відіграють антиоксидантні ферменти, метал-зв'язуючі білки (фітохелатини, глутатіон) та специфічні транспортні системи.

Серед рослин, що демонструють потенціал фітоекстракції ртуті, найчастіше згадуються *Brassica juncea* (L.) Czern., *Helianthus annuus* L., *Pennisetum purpureum* Schumach. та *Typha latifolia* L. [10; 12; 13]. А. Monroy-Licht та ін., вказують, що водяний гіацинт (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) також характеризується здатністю інтенсивно акумулювати Hg у кореневій системі, що робить його перспективним видом для очищення водойм [14]. Е. Siwik та ін. зазначають, що серед деревних рослин, адаптованих до техногенних умов, ефективними акумуляторами Hg є *Salix* spp. та *Populus* spp. [15].

Дослідження J. Ssenku та ін. [16] в Уганді засвідчили підвищений вміст Hg у більшості представників культурної та дикорослої флори на забруднених територіях, водночас листки виявляли вищі рівні акумуляції, ніж підземні органи. Подібну закономірність було відмічено й у лікарських рослинах на території Польщі М. Ordak та ін. [17].

Фіторе mediaція ртуті вимагає використання видів, які можуть витримувати токсичний вплив протягом тривалого періоду та видаляти забруднювач із субстрату до рівня безпечних концентрацій. У своїй публікації С. Kalinhoff та N. Calderon до Hg-стійких культур відносять *Lactuca sativa* L. (*Asteraceae*), *Bidens pilosa* L., *Taraxacum officinale* (L.) Weber ex F.H.Wigg. (*Asteraceae*), *Heliocarpus americanus* L. (*Malvaceae*) та ін. [18].

Перспективним для фіторе mediaції ґрунтів є використання бобово-ризобійних асоціацій, пов'язаних із місцевими видами рослин, властивих забрудненим територіям [10]. Асоційовані з бобовими ризобії виявляють стійкість до ртуті, підтримують ріст рослин і підвищують їх толерантність до стресу. Дослідження, проведені F. Nonnoi та ін. у шахтарських районах Іспанії, за-

бруднених Hg, показали, що місцеві рослини *Trifolium* spp. і *Medicago* spp. утворюють специфічні симбіози з *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* та *Sinorhizobium* (Ensifer) *medicae* відповідно на ґрунтах із високим рівнем забруднення (37,6–273,0 мг/кг Hg) [19]. Багато дослідників, зокрема Е. Snyder, D. Hofer, M. Rigoletto ін. [20–22] відзначають, що бобові культури є важливим інструментом підвищення родючості ґрунтів та поліпшення їх структури, стабільності врожайності лук під час посухи, що робить їх важливими у рекультивації порушених земель.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктами дослідження були два види конюшини:

Конюшина повзуча (*Trifolium repens* L.) — багаторічна трав'яниста рослина зі сланкими пагонами, що здатні укорінюватися. Має висхідні стебла заввишки 10–30 см, трійчасті листки та білі (іноді рожеваті або жовтуваті) квітки у головчастих суцвіттях. Вид поширений в помірній кліматичній зоні Євразії. Використовується як кормова, сидеральна та ґрунтопокривна культура, характеризується високою адаптивністю до різних ґрунтових умов, зокрема техногенно порушених. У Києві звичайна рослина, зростає на відкритих ділянках, уздовж доріг, у парках і скверах (рис. 1, а).

Конюшина лучна (*Trifolium pratense* L.) — багаторічна трав'яниста рослина з прямостоячими або висхідними стеблами заввишки 30–80 см. Листки трійчасті, суцвіття головчасті, пурпурово-рожеві. Вид поширений у природних і агрокультурних екосистемах Європи та Азії, натуралізований на інших континентах. Завдяки глибокій кореневій системі відзначається посухостійкістю і здатністю до відновлення після покосу, що робить його стійким у міських умовах. Застосовується як кормова й лікарська культура. У флорі України та м. Києва звичайна рослина, зростає на луках, пасовищах, узбіччях, у парках і на газонах (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Досліджувані види конюшини: а — *Trifolium repens* L.; б — *Trifolium pratense* L.

Дослідження проведено в межах м. Київ у зоні екологічного ризику: навколо колишнього підприємства хімічної промисловості ВАТ Завод «Радикал», який працював до 2000 р. та на території Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка Національної академії наук України (рис. 2).

На кожній досліджуваній ділянці збирали надземні частини *T. repens* L. та *T. pratense* L. з усіх виявлених особин, відбираючи матеріал у рівних частках від кожної рослини. Потім зібрані зразки подрібнювали та об'єднували в змішані проби, окремо для кожної ділянки та кожного виду. Зразки

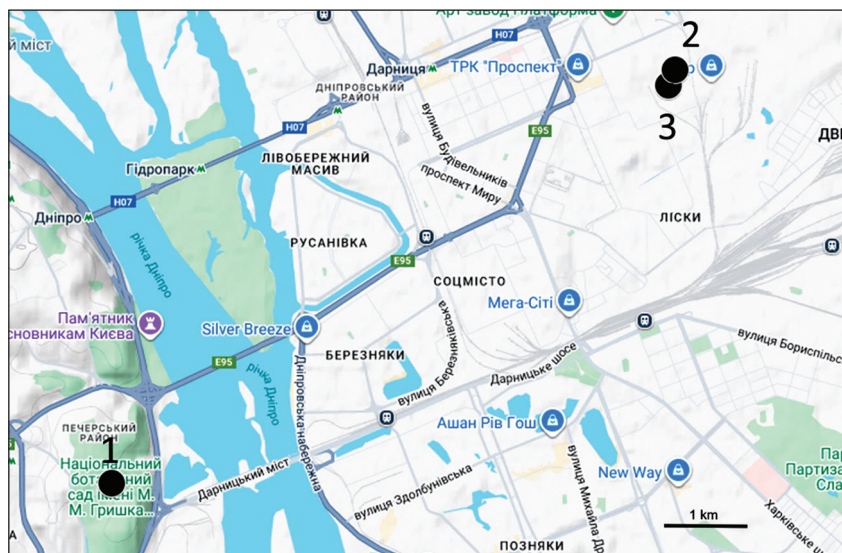


Рис. 2. Карта-схема розташування ділянок, з яких взяті зразки для аналізу

Примітки: 1 — Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України; 2, 3 — територія колишнього ВАТ Завод «Радикал».

грунту відбирали з верхньої частини гумусового горизонту (0–10 см) методом конверта та у місцях зростання конюшини згідно з ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб» з кожної точки. Для формування узагальненої проби вагою до 0,2 кг з кожної ділянки окремо зібраний ґрунт ретельно перемішували.

Відібрані зразки рослин та ґрунту висушували до постійної маси (абсолютно сухого стану за температури $102 \pm 2^\circ\text{C}$) та просіювали через лабораторне сито з отворами 2 мм. На аналітичних вагах Sartorius BP 210 S (Німеччина) з точністю 0,0001 г для аналізу формували наважку вагою 100 мг для рослин та 80 мг для ґрунту.

Аналіз відібраних зразків рослин та ґрунту проводили за допомогою аналізатора ртуті DMA-80 evo (Milestone, Італія), який допомагає вимірювати в них вміст загальної ртуті (органічної та неорганічної) методом прямого визначення Hg шляхом термічного розкладання зразка з подальшим атомно-абсорбційним аналізом. Всі аналізи виконувалися відповідно з методиками Агентства з охорони навколишнього середовища США (US EPA Method 7473 та ASTM D-6722 Method).

Якості вимірювань загального вмісту ртуті була забезпечена завдяки сертифікованому еталонному матеріалу ASTM D6722 (кам'яне вугілля). Межа виявлення ртуті у парах становила до 0,0015 нг Hg. Межі відносної невизначеності результатів вимірювань (U) масових часток Hg у зразках не перевищували 20% (за $k=2$, $P=0,95$).

Можливість накопичення металу у тканинах рослин оцінювали за допомогою біоконцентраційного фактора (BF), визначеного як:

$$BF = K_p / K_{rp},$$

де K_p — концентрація металу в рослині; K_{rp} — концентрація металу в ґрунті [22].

BF важливий показник для скринінгу рослин гіперакумуляторів, якщо оцінювати потенціал певного виду як перспективного кандидата для фіторе mediaції. Гіперакумулятори мають BF більше 1, іноді досягаючи 50–100 [23]. Вважається, що види рослин, у яких BF більше 1, можуть успішно ви-

користовуватися для фітоекстракції. Для графічного представлення результатів досліджень та розрахунку статистичних показників використали Microsoft Excel 2016.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Ділянка 1 (див. *рис. 2*) — знаходиться на території Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України. Рослини обох видів конюшини зібрані на ділянці «Рідкісні рослини флори України». Тут вони є компонентом сталого фітоценозу, який сформувався в умовах помірного догляду на території, що періодично 1–2 рази скошується у складі різнотрав'я на терасованому схилі на малогумусному ґрунті супіщаного гранулометричного складу. На прилеглих територіях колишнього Заводу «Радикал» було виявлено два представники роду *Trifolium*: *T. repens* L. та *T. pratense* L. лише у двох локаціях. В обох локаціях рослини виглядали здоровими, без явних ознак пригнічення росту чи ушкоджень. Зразки рослин були відібрані у фазі початку плодоношення (з поодинокими квітками та чисельними плодами на генеративних пагонах), яка відповідає максимальному розвитку біомаси надземних органів.

На ділянці 2 рослини конюшини зростали на насипному малогумусному ґрунті легкого суглинистого гранулометричного складу з включенням дрібного щебню. Вочевидь цю територію вирівнювали під будівництво виробничих приміщень 2–3 роки тому, шляхом насипання. Трав'яний покрив зріджений, 60–70% переважає зі самосівом тополі чорної, поряд із *T. repens* L. та *T. pratense* L. були виявлені також інші представники родини *Fabaceae*: *Melilotus albus* Medik., *Medicago sativa* L. та *M. falcata* L.

Ділянка 3 представлена штучним злаковим газоном низької якості під берегами, що висаджені під парканом уздовж асфальтної дороги. По всій площі *T. repens* L. та *T. pratense* L. трапляються розсіяно. Ґрунт тут також насипний, супіщаного гранулометричного складу з невеликим 1–2 см

шаром компосту чи чорнозему, який був насипаний перед посівом газонної трави.

На усіх досліджуваних ділянках рН ґрунтового розчину був у межах 6,7–7. Аналіз умісту ртуті на ділянках встановив істотні відмінності: $0,82 \pm 0,16$ мг/кг та $5,26 \pm 1,05$ мг/кг на другій та третій ділянці відповідно, на третій ділянці він значно перевищує ГДК (2,1 мг/кг). На ділянці 1 вміст ртуті виявився значно меншим і склав $0,04 \pm 0,01$ мг/кг. Окрім того, масова частка ртуті на найменш забрудненому ґрунті ділянки 1 у надземних органах обох видів конюшини була майже однаковою і обидва види за показником *BF* були гіпернакопичувачами в цих умовах ($1 < BF$). У той самий час більше забруднення ґрунту спричинило гальмування процесів накопичення та зменшення значень *BF* (рис. 3, 4). За вмісту в ґрунті ртуті 0,82 мг/кг конюшина повзуча накопичила її майже вдвічі більше за конюшину лучну, проте в умовах значного забруднення конюшина лучна зберегла здатність до накопичення і майже втричі перевищила конюшину повзучу за вмістом цього елемента.

Конюшина повзуча може успішно розвиватися на ґрунтах, забруднених важкими металами, та стати домінантним видом у

таких умовах [24]. *T. repens* L. демонструвала здатність до накопичення багатьох важких металів, зокрема ртуті (Hg), переважно в кореневій системі, що свідчить про потенціал цього виду для використання його в біоочищенні забруднених ґрунтів. На цьому виді досліджувався вплив хелатних агентів на фітоекстракцію Hg [25].

T. repens L. надзвичайно ефективно поглинала ртуть зі 100% розчину Хогланда та накопичувала її. За вирощування *T. repens* L. у розчині Хоагланда з додаванням 10 мкг/л ртуті, рослини у своїй надземній частині (стебла та листки) накопичили Hg у концентрації $0,038 \pm 0,002$ мг/л [26]. Ці дані цілком зіставні з отриманими у наших дослідженнях: на ґрунті із концентрацією 0,04 мг/кг вміст ртуті у надземній частині сягав $0,05 \pm 0,001$ мг/кг.

Оцінювання масової концентрації ртуті у рослинах конюшини, у зв'язку із її концентрацією у ґрунтах (рис. 5), виявило різні тенденції щодо її накопичення і максимальних рівнів у рослинах цих двох видів, що може свідчити про дещо різні механізми захисту рослин від надмірних концентрацій Hg.

Аналіз залежності концентрації ртуті у рослинах *T. repens* L. від її концентрації

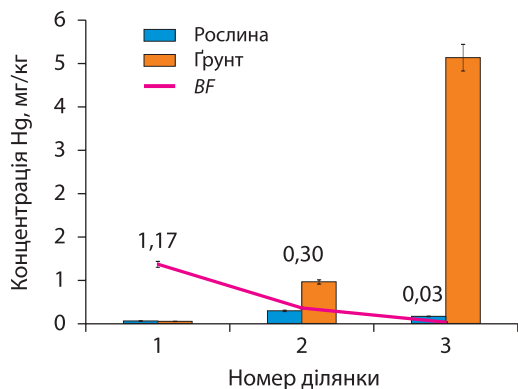


Рис. 3. Масова концентрація ртуті (мг/кг) у надземній частині *Trifolium repens* L. на різних ділянках та значення біоконцентраційного чинника (*BF*)

Примітки: 1 — Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України; 2, 3 — територія колишнього БАТ Завод «Радикал».

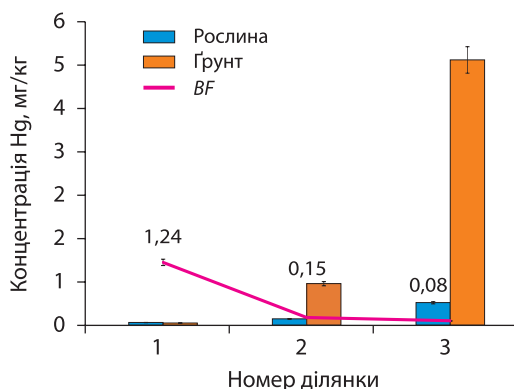


Рис. 4. Масова концентрація ртуті (мг/кг) у надземній частині *Trifolium pratense* L. на різних ділянках та значення біоконцентраційного чинника (*BF*)

Примітки: 1 — Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України; 2, 3 — територія колишнього БАТ Завод «Радикал».

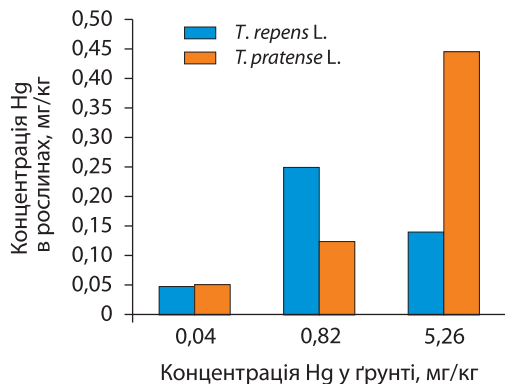


Рис. 5. Масова концентрація ртуті у рослинах конюшини залежно від її концентрації у ґрунтах (мг/кг)

у ґрунтах демонструє нелінійну залежність: на низьких рівнях Hg (ймовірно до ~2,5 мг/кг) рослина активно накопичує ртуть, а після пікового вмісту (~2,5 мг/кг) спостерігається зниження концентрації Hg у рослині. Рослини *T. repens* L. показали специфічну у реакцію на зміну рівня забруднення, що робить цей вид потенційно більш стійким.

Trifolium pratense L. також проявляє здатність до акумуляції інших важких металів, зокрема кадмію (Cd), свинцю (Pb) та цинку (Zn), переважно в надземних органах, що дає можливість розглядати цю рослину як потенційний фітоекстрактор [27]. *T. pratense* L. може бути ефективним компонентом мультифункціональних фітореMediaційних систем. Дані накопичення Hg цим видом, що свідчать про стабільне, пропорційне накопичення ртуті з підвищенням її концентрації в ґрунті. Отже, *T. pratense* L. може бути хорошим біогеохімічним індикаторним видом для моніторингу забруднення ґрунту ртуттю та його ремедіації.

Наші дослідження свідчать про успішне зростання та розвиток обох видів конюшини в умовах забруднення ґрунту ртуттю на рівні $5,26 \pm 1,05$ мг/кг. За таких умов обидва види здатні до росту та багаторічного розвитку, утворення квітів, плодів, насіння та самостійного поширення. Аналіз отрима-

них даних виявив у обох видів тенденцію до зменшення здатності до накопичення ртуті у надземних органах рослин за збільшення її концентрації у ґрунті за показником *BF*. Це може свідчити про розвинені механізми, які забезпечують стійкість рослин на забруднених територіях. У наших дослідженнях максимальний вміст ртуті у *T. repens* L. становив $0,25 \pm 0,01$ мг/кг на ділянці із середнім рівнем забруднення ґрунту, а у *T. pratense* L. — $0,45 \pm 0,01$ мг/кг — із максимальним вмістом Hg, що загалом нижче за максимальні значення ГДК для харчових продуктів і кормів для тварин [28; 29].

Для встановлення порогових концентрацій фітотоксичності ртуті для кожного з видів конюшини за інших концентрацій у ґрунтах потрібні додаткові дослідження.

ВИСНОВКИ

Завдяки поєднанню екологічної пластичності, швидкого формування біомаси та здатності до симбіотичної азотфіксації, конюшина є перспективним об'єктом для досліджень у сфері фітореMediaції важких металів, зокрема ртуті. Обидва досліджені види конюшини *T. repens* L. та *T. pratense* L. накопичують ртуть у своїх надземних органах, що необхідно враховувати за вирощування цих рослин як кормових, харчових культур або для збору лікарської сировини, щоб уникнути накопичення токсиканта в харчовому ланцюгу.

Конюшина лучна виявила здатність до накопичення більшої кількості ртуті на забруднених ґрунтах. Зважаючи на її більшу надземну масу, використання *T. pratense* L. для фітоекстракції Hg може бути успішним. Дослідження динаміки накопичення, встановлення порогових рівнів фітотоксичності ртуті для різних видів конюшини, механізмів біоакумуляції Hg та можливостей утилізації забруднених рослинних решток дасть можливість підібрати оптимальні рішення для розробки технологій очищення та покращання якості забруднених ґрунтів.

ЛІТЕРАТУРА

- Kumari, S., Jamwal, R., Mishra, N., & Singh, D. K. (2020). Recent developments in environmental mercury bioremediation and its toxicity: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 13, 100283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100283>.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2024, November 12). Substance priority list. Centers for Disease Control and Prevention. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/programs/substance-priority-list.html>.
- Clemens, S. (2013). Mercury in plants. In *Encyclopedia of metalloproteins* (pp. 1352–1356). Springer, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1533-6_313.
- Смоляр, В. І., & Петрашенко, Г. І. (2008). Ртуть в харчових продуктах і раціонах та її токсичність. *Проблеми харчування*, 3–4(18), 23–31. URL: http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/nutrition/2008/3-4_08/str23.pdf.
- Дмитруха, Т. І. (2014). Забруднення довкілля ртуттю — найгостріша екологічна проблема сучасності. *Екологічна безпека та природокористування*, (15), 46–52.
- Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., & Сорокіна, Л. (2023). Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України. *ГО Центр екологічних ініціатив «Екодія»*. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii.pdf>.
- Ковальчук, В. (2011). Ртуть в ґрунтах та фітоценозах Київщини, механізм накопичення та форми поширення. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія*, (59), 43–45. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_geograf_2011_59_14.
- Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин. Постанова Кабінету Міністрів України № 898 (2024). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/898-2024-%D0%BF>.
- Самчук, А. І., Вовк, К. В., & Акімова, О. Р. (2015). Форми знаходження важких металів у ґрунтах зон екологічного ризику м. Київ. *Геохімія та рудотворення*, (35), 63–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/gof.2015.35.063>.
- Tiodar, E. D., Văcar, C. L., & Podar, D. (2021). Phytoremediation and microorganisms-assisted phytoremediation of mercury-contaminated soils: challenges and perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2435. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18052435>.
- Sharma, J. K., Kumar, N., Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1076876. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>.
- Feng, X., & Wang, J. (2018). Phytoextraction of Mercury-Contaminated Soil. In *Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China* (pp. 499–507). Singapore: Springer Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6029-8_30.
- dos Santos Soares, C., Santos Lopes, V. J., de Freitas, F., Córdova, M. O., Cavalheiro, L., Battirola, L. D., & de Andrade, R. L. T. (2025). Characterizing pioneer plants for phytoremediation of mercury-contaminated urban soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06303-2>.
- Monroy-Licht, A., Méndez-Cuadro, D., & Olivero-Verbel, J. (2023). Elemental mercury accumulation in *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 9898–9913. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22521-y>.
- Siwik, E. I., Campbell, L. M., & Mierle, G. (2010). Distribution and trends of mercury in deciduous tree cores. *Environmental Pollution*, 158(6), 2067–2073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.03.002>.
- Ssenku, J. E., Naziriwo, B., Kutesakwe, J., Mustafa, A. S., Kayeera, D., & Tebandeke, E. (2023). Mercury accumulation in food crops and phytoremediation potential of wild plants thriving in artisanal and small-scale gold mining areas in Uganda. *Pollutants*, 3(2), 181–196. DOI: <https://doi.org/10.3390/pollutants3020014>.
- Ordak, M., Wesolowski, M., Radecka, I., Muszynska, E., & Bujalska-Zazdrozny, M. (2016). Seasonal variations of mercury levels in selected medicinal plants originating from Poland. *Biological trace element research*, 173(2), 514–524. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-016-0645-z>.
- Kalinhoff, C., & Calderón, N. T. (2022). Mercury phytotoxicity and tolerance in three wild plants during germination and seedling development. *Plants*, 11(15), 2046. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11152046>.
- Nonnoi, F., Chinnaswamy, A., de la Torre, V. S. G., de la Peña, T. C., Lucas, M. M., & Pueyo, J. J. (2012). Metal tolerance of rhizobial strains isolated from nodules of herbaceous legumes (*Medicago* spp. and *Trifolium* spp.) growing in mercury-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 61, 49–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.06.004>.
- Snyder, E. M., Karsten, H. D., Curran, W. S., Malcolm, G. M., & Hyde, J. A. (2016). Green manure comparison between winter wheat and corn: weeds, yields, and economics. *Agronomy Journal*, 108(5), 2015–2025. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0084>.
- Hofer, D., Suter, M., Buchmann, N., & Lüscher, A. (2017). Nitrogen status of functionally different forage species explains resistance to severe drought and post-drought overcompensation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 312–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.022>.

22. Rigoletto, M., Calza, P., Gaggero, E., Malandrino, M., & Fabbri, D. (2020). Bioremediation methods for the recovery of lead-contaminated soils: a review. *Applied Sciences*, 10(10), 3528. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10103528>.
23. Козак, Н. (2024). Продуктивність травостою коношини лучної залежно від системи удобрення у короткоротаційній сівоzmіні. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*, 76(1), 26–35. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2024-\(76\)-1-3](https://doi.org/10.32636/01308521.2024-(76)-1-3).
24. Liu, Z., Chen, B., Wang, L. A., Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020). A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 400, 123138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123138>.
25. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>.
26. Liu, Z., & Wang, L. A. (2014). A plant species (*Trifolium repens*) with strong enrichment ability for mercury. *Ecological Engineering*, 70, 349–350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.029>.
27. Malizia, D., Giuliano, A., Ortaggi, G., & Masotti, A. (2012). Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chemistry Central Journal*, 6(2), S6. DOI: <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-S2-S6>.
28. Про затвердження Державних гігієнічних правил і норм «Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах». Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 368. (2013). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0774-13>.
29. Про затвердження Переліку речовин, наявність яких у кормах є обмеженою або забороненою. Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України. № 708 (2012). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2091-12>.

Стаття надійшла до редакції журналу 17.10.2025

ВПЛИВ СИДЕРАЛЬНИХ КУЛЬТУР НА ЧИСЕЛЬНІСТЬ ҐРУНТОВИХ МІКРООРГАНІЗМІВ В АГРОЦЕНОЗАХ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ

Ю.А. Кравчук, І.В. Безноско

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

e-mail: doslidna_skvira@meta.ua; ORCID: 0009-0003-6878-7700

e-mail: beznoskoirina@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2217-5165

Використання сидеральних культур у агроценозах пшениці озимої сприяє активізації мікробіологічних процесів у ґрунті, підвищенню його біологічної активності, поліпшенню структурно-агрономічних властивостей і формуванню екологічно стійкої агроєкосистеми. Тому метою роботи було дослідження структури та складу комплексу ґрунтових мікроорганізмів під сидеральними культурами, що є необхідним для розуміння впливу чинників навколишнього середовища, властивостей ґрунту, агротехнічних заходів і систем удобрення на перебіг біологічних процесів у ньому. Для сидерації використовували вику яру (*Vicia sativa* L.), редьку олійну (*Raphanus sativum* d. var. *oleifera* Metrg.), гірчицю жовту (*Brassica juncea* L.) та розторопшу плямисту (*Silybum marianum* L.). Такий вибір сидеральних культур обґрунтовано належністю їх до різних біологічних груп із відповідно різним впливом на поживний режим та вологість ґрунту, а отже, і врожайність цих культур. У статті наведено результати дослідження впливу різних сидеральних культур на мікробіологічну активність ґрунту на різних етапах онтогенезу рослин. Встановлено, що застосування бобових сидератів (гороху на зерно, гороху сидерату та вики ярої) спричиняє посилення мінералізаційних процесів, активізацію ґрунтової мікробіоти та підвищення біологічної стійкості агроєкосистеми. У варіантах із гірчицею жовтою, редькою олійною та розторопшою спостерігалася покращання живлення рослин, однак інтенсивність мікробіологічних процесів була нижчою, ніж за використання бобових культур. Найменшу біологічну активність ґрунту зафіксовано на контролі (пару). Біомаса сидератів є природним джерелом вуглецю, азоту та інших поживних елементів, які після розкладання стають доступними для основних культур, сприяючи поліпшенню їх живлення. Крім того, завдяки різноманітності біологічних груп сидеральних культур (бобові, хрестоцвітні, айстрові тощо) формується різноспрямований вплив на ґрунтову мікробіоту, структуру ґрунту та його вологоутримувальну здатність. Отримані результати допомагають глибшому розумінню біологічних процесів у ґрунті, оптимізації систем удобрення, підвищенню родючості та екологічної стійкості агроєкосистем, а також забезпеченню стабільного виробництва високоякісної рослинницької продукції.

Ключові слова: агроєкосистема, мікроміцети, екологічна рівновага, родючість ґрунту, мікробіологічна активність, трансформація органічної речовини, показники педотрофності, оліготрофності, мінералізації — іммобілізації.

ВСТУП

Сучасне землеробство дедалі більше орієнтується на екологічно безпечні технології вирощування сільськогосподарських культур, що забезпечують стабільну продуктивність агроєкосистем без надмірного використання хімічних засобів захисту рослин. Одним із важливих напрямів такого підходу є застосування сидеральних культур, які виконують роль природного добрива, покращують структуру ґрунту,

збагачують його органічною речовиною та активізують біологічну активність мікроорганізмів.

Ґрунтові мікроорганізми беруть участь у процесах ґрунтоутворення, трансформації органічної речовини, мобілізації елементів живлення та формування фітосанітарного стану агроценозів. За даними численних досліджень (Gao; Liu; Панько та ін.), використання сидеральних культур сприяє зростанню чисельності бактерій, актиноміцетів і мікроскопічних грибів, підвищує

ферментативну активність ґрунту та стабілізує мікробіологічну рівновагу.

Особливе значення такі процеси мають в агроценозах пшениці озимої, де збереження родючості ґрунту й біологічної рівноваги є запорукою високої урожайності та якості зерна [1]. Водночас, питання впливу сидеральних культур в агроценозах пшениці озимої на чисельність ґрунтових мікроорганізмів залишається недостатньо дослідженим в Україні, що зумовлює актуальність даної тематики.

Водночас досить загострилася проблема збереження та підвищення родючості ґрунтів. Існуюча система землеробства не забезпечує збереження родючості ґрунту: мікробна біомаса нижче у 4 рази, дихання удвічі, вміст гумусу — удвічі порівняно із незадіяними у сільськогосподарське виробництво земельними угіддями. За вирощування багаторічних культур у агроценозі формуються бідні по видовому різноманіттю комплекси мікроорганізмів менш стійкі проти несприятливих чинників середовища [2; 3].

Тому **метою нашої роботи** було дослідження структури та складу комплексу ґрунтових мікроорганізмів під сидеральними культурами, що є необхідним для розуміння впливу чинників навколишнього середовища, властивостей ґрунту, агротехнічних заходів і систем удобрення на перебіг біологічних процесів у ґрунті.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В останні десятиліття у розвинених країнах значно зростає інтерес до виробництва органічної сільськогосподарської продукції [4]. Інтенсивно використовуються біологічні чинники у системі землеробства: чергування культур на принципах плодозміни, внесення нетоварної частини урожаю на добриво, розміщення по найефективніших попередниках та ін. Актуальним завданням сьогодення є активізація агрономічно корисних процесів, що пов'язані із участю рослин в утворенні ґрунту [5].

Біологічна система землеробства передбачає, з одного боку, повну відсутність або

різке скорочення застосування мінеральних добрив, пестицидів, регуляторів росту, а з іншого боку, впровадження сівозмін, максимальне використання органічних добрив, раціональний обробіток ґрунту, застосування ґрунтових структуроутворювачів, біологічні методи боротьби із хворобами, шкідниками та бур'янами. Проміжні культури сприяють кращому використанню сонячної енергії, очищенню ґрунту від нітратів, збагаченню його гумусом. Окрім того, хрестоцвіті мають велику фітосанітарну дію. Велике значення багаторічних трав та інших кормових культур у одержанні екологічно чистої продукції.

Зелене добриво — найдешевший та найефективніший спосіб комплексного відродження екосистеми. Зелені добрива відносяться до таких, що легко мінералізуються, тому їх значення в підвищенні біогенності ґрунтів є надзвичайно важливим [6–8].

На відміну від природних рослинних угруповань, де взаємовідносини між ґрунтовим та рослинним покривом мають гармонічний характер, дія агрофітоценозів на ґрунтове середовище неоднозначна. До позитивних наслідків впливу культурних рослин необхідно віднести: постачання до ґрунту свіжої органічної речовини у вигляді біомаси різних рослин; симбіотичну фіксацію атмосферного азоту бульбочковими бактеріями, що поселяються на коренях бобових рослин; збагачення поживними речовинами верхнього шару ґрунту за рахунок підґрунтя; зростання ступеня засвоєності деяких елементів мінерального живлення рослин під впливом корневих виділень, продуктів мінералізації рослинних залишків та ін. [9; 10].

Дослідженнями іноземних учених Zhang, Kusch-Brandt, Salter, Heaven [11], а також українських науковців Волкогон [12], Бурикіної, Ужєвської та Куліджанова вивчено вплив сидеральних культур на мікробіологічні процеси в агроценозах, динаміку чисельності основних фізіологічних груп ґрунтових мікроорганізмів, а також особливості трансформації органічної речовини під дією різних біологічних

груп рослин. Виявлено, що використання в короткоротаційній сівозміні як сидеральні культури вико-вівсяної сумішки, гірчиці білої і гороху є ефективним заходом покращання поживного режиму ґрунту, збільшення врожайності культур та її продуктивності. Втім залишення рослинних залишків призводить до концентрації мікробної біомаси у шарі від 5 до 15 см, і це у такий спосіб сприяє розповсюдженню не лише корисних ґрунтоутворних мікроміцетів, але і патогенних мікроорганізмів [11; 12].

Для життя рослин важливе значення має не тільки мікробіота ґрунту загалом, але особливо мікроорганізми зони кореневої системи рослин. Корені змінюють структуру ґрунту, виділяють значну кількість вуглекислоти, яка досить різко впливає на розчинність деяких мінеральних сполук, енергетичні речовини (цукри, органічні кислоти, амінокислоти, спирти та ін.), вітаміни, стимулятори росту, що обумовлюють розмноження тут багатой сапрофітної мікрофлори. Органічна речовина, яка синтезується автотрофними організмами, включається в біологічний колообіг, де споживається консументами [13; 14].

Загальновідомим є той факт, що чисельність мікроорганізмів у ґрунті постійно змінюється. Крім того, у всякому ґрунтовому покриві є певний природний рівень чисельності мікробіоти, що можна розглядати як запаси мікроорганізмів ґрунту, який не забезпечується енергетичною речовиною, необхідною для безперервного розмноження, але знаходиться у стані підтримання [15]. В ризосфері рослин за дії мікроорганізмів відбувається як деструкція, так і синтез органічної речовини.

Дослідженнями вчених Francesca Cotrufo та Smith із колегами відомо, що за сприятливих умов розкладання рослинної маси відбувається вже у перші дні після заорювання її у ґрунт і супроводжується бурхливим виділенням CO₂. Через 4–11 діб активно виділяється аміак внаслідок діяльності амоніфікувальних бактерій, що змінюються на нітрофікатори. Також за дослідженнями О. Демиденка [16] вста-

новлено, що чисельність мікроорганізмів (автотрофних, олігонітрофільних та ендотрофних) зростає у перші 90 діб за внесення на зрошуваних землях сидеральних культур. Родючість ґрунтів формується за дії складного комплексу природних і антропогенних чинників, серед яких головна роль належить діяльності ґрунтових мікроорганізмів [17; 18]. За аналізом наукових праць вчених С.П. Танчик і С.В. Рєзнік із співавт. [19; 20] визначено, що кількісний та якісний склад ґрунтової мікробіоти, як чутливий індикатор стану агроєкосистеми, відображає ступінь антропогенного навантаження, тому використовується як діагностичний показник за оцінювання екологічного стану ґрунту, що дає можливість виявити певні зміни екосистеми ще на ранніх стадіях.

Отже, визначення впливу сидеральних культур на чисельність ґрунтових мікроорганізмів в агроценозах пшениці озимої сприятиме глибшому розумінню біологічних процесів у ґрунті, оптимізації систем удобрення, підвищенню родючості та екологічної стійкості агроєкосистем, а також забезпеченню стабільного виробництва високоякісної рослинницької продукції.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили впродовж 2023–2025 рр. на базі тимчасових польових дослідів, які розташовані у Сквирській дослідній станції органічного виробництва НААН. Для сидерації використовували вику яру (*Vicia sativa* L.), редьку олійну (*Raphanus sativum* d. var. *oleifera* Metrg.), гірчицю жовту (*Brassica juncea* L.) та розторошшу плямисту (*Silybum marianum* L.). Такий вибір сидеральних культур обґрунтовано належністю їх до різних біологічних груп із відповідно різним впливом на поживний режим та вологість ґрунту, а отже, і врожайність цих культур. Сидерати також дають можливість розширити сівозміну, збільшити її біорізноманіття та розірвати за необхідності зернову ланку.

Зразки ґрунту (12–14 індивідуальних проб) відбирали тростинним буром із гли-

бини 0–20 см із подальшою підготовкою до аналізів згідно з ДСТУ 7847:2015 [21].

Лабораторні дослідження виконували в лабораторії біоконтролю агроєкосистем та органічного виробництва НААН. Чисельність мікроорганізмів здійснювали методом висівання ґрунтової суспензії на стандартні поживні середовища [22–24].

Для визначення у пробі ґрунту чисельності мікроміцетів застосовували метод глибинного посіву, де 1 см³ суспензії, певного розведення стерильною піпеткою переносять у чашку Петрі, заливають розплавленим та охолодженим до 45–50°C поживним середовищем і обережно круговими рухами змішують посівний матеріал із суспензією клітин. Чашки залишають на горизонтальній поверхні, поки середовище не застигне, після чого ставлять у термостат перевернутими догори дном. Чашки інкубують за температури 28°C упродовж 3–7 діб залежно від швидкості росту мікроорганізмів.

Кількість колоній, які виросли, підраховують за допомогою автоматичного лічильника SCAN4000 (Interscience, France). За більшої кількості колоній і їхнього рівномірного розташування дно чашки Петрі умовно ділять на 4 або більше однакових секторів, рахують кількість колоній у двох–трьох секторах (але не менше, ніж на 1/3 поверхні чашки), знаходять середнє арифметичне число колоній і множать на загальну кількість секторів на одній чашці.

Чисельність мікроорганізмів в розрахунку на 1 г сухого ґрунту (X) в КУО обчислювали за формулою [24]:

$$X = (a \times b \times 10^n) / V, \quad (1)$$

де X — кількість клітин в 1 г сухого ґрунту; a — середня кількість підрахованих колоній, од.; b — коефіцієнт вологості, розрахований згідно з ДСТУ ISO 11465-2001; 10^n — коефіцієнт розведення; V — об'єм суспензії, що взяли для посіву, см³.

Чисельність целюлозолітичних мікроорганізмів визначали шляхом розрахунку найбільш вірогідної кількості (НБК) клітин в одиниці об'єму вихідного субстрату за таблицею Мак-Креді.

Чисельність целюлозолітичних мікроорганізмів обчислювали за формулою:

$$X = \text{НБК} \times b, \quad (2)$$

де X — кількість клітин у 1 г сухого ґрунту; НБК — найбільш вірогідна кількість клітин мікроорганізмів у 1 г субстрату, од.; b — коефіцієнт вологості, розрахований.

Спрямованість мікробіологічних процесів у ґрунті визначали за відповідними коефіцієнтами [25; 26].

Коефіцієнт мінералізації–імобілізації ($K_{\text{м-і}}$) розраховували за відношенням кількості мікроорганізмів, що імобілізують мінеральні форми нітрогену, до чисельності амоніфікаторів за формулою:

$$K_{\text{м-і}} = \text{КАА} / \text{МПА}, \quad (3)$$

де КАА, МПА — кількість мікроорганізмів, що виросли, відповідно, на крохмально-аміачному та м'ясопептонному агарі.

Коефіцієнт оліготрофності ($K_{\text{ол.}}$) розраховували за відношенням чисельності мікроорганізмів, що здатні засвоювати елементи живлення з дуже розріджених розчинів до загальної чисельності евтрофних мікроорганізмів за формулою:

$$K_{\text{ол.}} = \text{ГА} / (\text{КАА} + \text{МПА}), \quad (4)$$

де ГА — кількість мікроорганізмів, що виросли на голодному агарі.

Коефіцієнт педотрофності ($K_{\text{пед.}}$) розраховували за відношеннями кількості мікроорганізмів на ґрунтовому агарі (ГрА) до кількості мікроорганізмів, що виросли на м'ясопептонному агарі (МПА):

$$K_{\text{пед.}} = \text{ГрА} / \text{МПА}. \quad (5)$$

Статистичну обробку експериментальних даних проводили за загальноприйнятими в мікробіології методиками з використанням комп'ютерних програм Microsoft Excel та здійснено однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA, тест Тьюкі). Різниця між контрольними і експериментальними показниками вважали значними, коли ймовірність різниці становила $P < 0,05$.

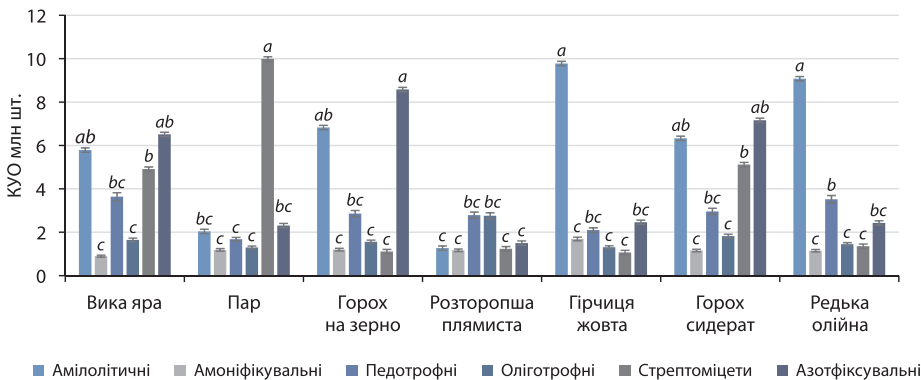
РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Досліджено вплив різних сидеральних культур на чисельність мікроорганізмів еколого-трофічних груп у мікробіомі ґрунту. На початку вегетаційного періоду вста-

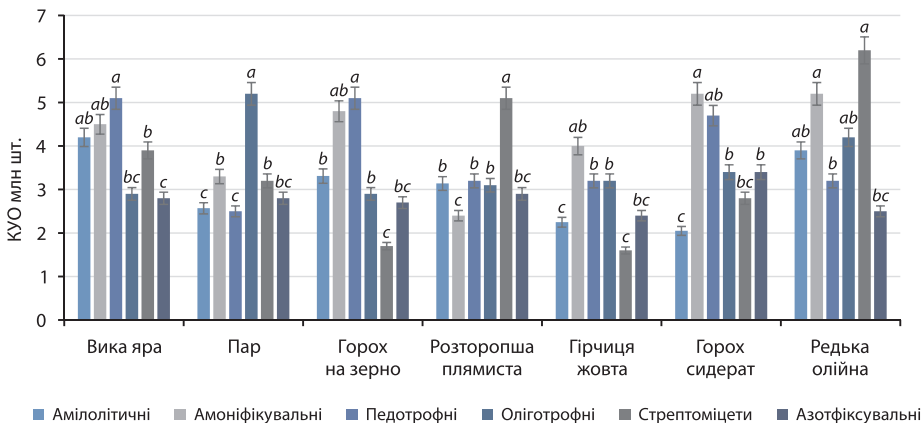
новлено, що у мікробіомі ґрунту бобових культур (вика яра, горох сидерат та горох на зерно) підвищується чисельність азотфіксувальних мікроорганізмів на 20% порівняно із іншими сидератами, що підтверджує їхню ґрунтополіпшувальну роль. У мікробіомі ґрунту хрестоцвітих культур (гірчиця жовта, редька олійна) виявлено стимульований розвиток мікроорганізмів амілолітичних та амоніфікувальних груп їх чисельність зростала на 5% вище за інші сидерати. Це означає, що вони сприяють мінералізації органічних решток і швидшому кругообігу поживних речовин у ґрунті.

У мікробіомі ґрунту розторопші плямистої спостерігалася висока чисельність оліготрофів на 40% вища, ніж у інших культур, що свідчить, що вона виділяє менше доступних органічних речовин у ризосферу, і мікроорганізми змушені розвиватися за дефіциту поживних субстратів. Мікробіом ґрунту під паром характеризувався високою чисельністю стрептоміцетів, що вказує на перевагу мікроорганізмів-деструкторів у відсутності культурних рослин (рис. 1, а).

За даними представленими на рис. 1, б встановлено, що після заорювання сидератів бобових культур (горох на сидерат



а



б

Рис. 1. Чисельність мікроорганізмів еколого-трофічних груп:
а – вегетація; б – після заорювання сидератів

Примітки: $\bar{x} \pm SD$, Тьюкі тест, $n = 5$ повторів; а, b, c – статистично значущі відмінності кількості речовин ($P < 0,05$).

та зерно, вика яра) у мікробіомі ґрунту переважають амоніфікатори та педотрофи, де їхня чисельність була у 1,5 раза вища, ніж у інших сидератів, що зумовлено відмиранням бульбочок. За використання хрестоцвітних сидератів (гірчиця жовта, редька олійна) майже у 2 рази зростає чисельність амоніфікаторів й стрептоміцетів, які швидко активізують процеси мінералізації. Натомість за заорювання сидерату розторопші плямистої у мікробіомі ґрунту різко збільшується чисельність актиноміцетів, що пояснює розвиток деградаційних процесів і зниження біологічної стійкості ґрунту. Мікробіом ґрунту під паром вирізняється високою часткою оліготрофів, що вказує на виснаження легкодоступної органіки в ґрунті без надходження ексудатів від культур.

Наведені дані у *табл. 1* підтверджують істотний вплив видів сидеральних культур на мікробіологічну активність ґрунту в агроценозах пшениці озимої як на ранніх етапах вегетації, так і після заорювання сидератів.

На початкових етапах онтогенезу сидератів активність мікроорганізмів була

відносно низькою. Високі показники педотрофності та трансформації органічної речовини спостерігалися під розторопшею плямистою (1,03; 2,24) і гірчицею жовтою (0,48; 1,98), що свідчить про активне мікробіологічне розкладання органічних сполук і підвищену біологічну активність цих варіантів. Особливо вирізняється сидерат — горох на зерно (1,1; 3,3; 1,3), де фіксували найвищий рівень процесів мінералізації—імобілізації, що пов'язано з високим вмістом азоту у кореневих рештках. Водночас, вика яра та горох-сидерат мали нижчі показники, що характерно для культур із меншою біомасою та повільнішим розкладанням.

Отже, найсприятливіший вплив на мікробіологічні процеси ґрунту виявлено за використання сидератів: редьки олійної, гороху-сидерата та гірчиці жовтої, які стимулюють процеси мінералізації та трансформації органічної речовини. Це вказує на їхню високу ефективність у підвищенні біологічної активності та родючості ґрунту в агроценозах пшениці озимої.

Досліджено зміни у чисельності мікроорганізмів еколого-трофічних груп за впли-

Таблиця 1. Вплив сидеральних культур на мікробіологічні процеси та трансформацію органічної речовини в ґрунті

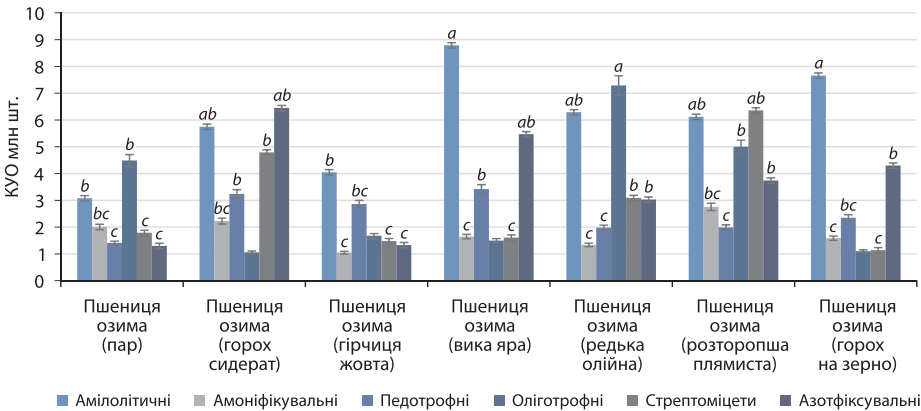
Веgetаційний період	Сидерат	Оліготрофності	Педотрофності	Мінералізації — імобілізації	Трансформація органічної речовини
Веgetація на ранніх етапах онтогенезу	Вика яра	0,10	0,38	0,61	1,03
	Пар	0,24	0,52	0,63	1,88
	Горох на зерно	0,13	1,1	3,3	1,3
	Розторопша плямиста	0,69	1,03	0,47	2,24
	Гірчиця жовта	0,09	0,48	2,27	1,98
	Горох-сидерат	0,10	0,28	0,60	1,37
	Редька олійна	0,11	0,86	2,22	1,29
Після заорювання сидератів	Вика яра	0,30	0,94	0,77	9,32
	Пар	0,74	0,56	0,58	7,53
	Горох на зерно	0,32	0,92	0,60	11,7
	Розторопша плямиста	0,49	1,03	1,01	4,23
	Гірчиця жовта	0,46	0,69	0,48	11,1
	Горох-сидерат	0,40	0,74	0,32	18,3
	Редька олійна	0,42	0,54	0,66	12,1

ву різних сидератів у агроценозах пшениці озимої на ранніх етапах онтогенезу (рис. 2).

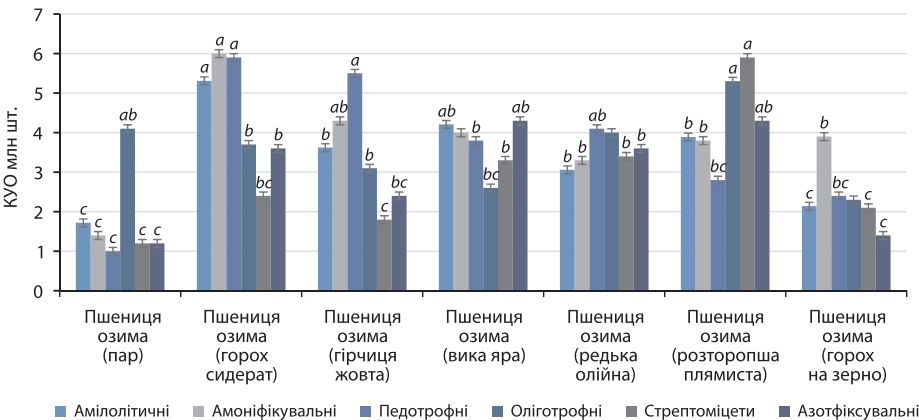
За даними поданими на рис. 2 встановлено, що на ранніх етапах онтогенезу рослин найвищу біологічну активність ґрунтового мікробіому забезпечують сидерати бобових культур, особливо сидерат — вика яра, що сприяють інтенсивному розвитку амоніфікаторів та амілолітичних мікроорганізмів, чисельність яких на 25% вища ніж, у інших сидератів. Хрестоцвіті (гір-

чиця жовта, редька олійна) стимулюють чисельність амілолітичних мікроорганізмів і процеси мінералізації. Натомість сидерат із розторопші зумовлює різке зростання чисельності актиноміцетів на 50% вище, ніж у інших варіантах, що свідчить про ознаки деградаційних процесів у ґрунті та зниження його біологічної стійкості (див. рис. 2, а).

Наприкінці вегетації пшениці озимої виявлено, що у ризосфері ґрунту пшениці озимої найвищу чисельність мікроорга-



а



б

Рис. 2. Чисельність мікроорганізмів еколого-трофічних груп в агроценозах пшениці: а — на ранніх етапах онтогенезу; б — на пізніх етапах онтогенезу

Примітки: $x \pm SD$, Тьюкі тест, $n = 5$ повторів; а, б, с — статистично значущі відмінності кількості речовин ($P < 0,05$).

нізмів забезпечує горох як сидерат, де переважають амоніфікатори та педотрофи, що на 12% вище, ніж у інших сидеральних культур. Це сприяє активній трансформації органічної речовини в ґрунті. Гірчиця жовта та вика яра стимулюють розвиток амілолітичних і амоніфікувальних форм, підвищуючи мікробіологічну активність. У ризосфері після редьки олійної спостерігається більш збалансований розподіл між основними групами мікроорганізмів. Натомість використання розторопші плямистої

як сидерат зумовлює різке зростання чисельності актиноміцетів (стрептоміцетів), що на 50% вище за інші варіанти та пояснює дисбаланс мікробіому і зменшення його екологічної стійкості.

За даними у *табл. 2* представлено, що на ранніх етапах онтогенезу пшениці озимої найвищі показники оліготрофності (0,75) спостерігалися у варіанті з редькою олійною, що свідчить про активне розмноження мікроорганізмів, здатних засвоювати малодоступні сполуки вуглецю. Високу

Таблиця 2. Вплив сидеральних культур на мікробіологічні процеси та трансформацію органічної речовини в ризосфері пшениці озимої

Вегетаційний період	Сидерат	Оліготрофності	Педотрофності	Мінералізації — іммобілізації	Трансформація органічної речовини
На ранніх етапах онтогенезу рослин	Пшениця озима (пар)	0,34	0,14	0,30	3,32
	Пшениця озима (горох-сидерат)	0,10	0,72	1,28	3,09
	Пшениця озима (гірчиця жовта)	0,27	1,32	1,87	1,32
	Пшениця озима (вика яра)	0,12	1,19	3,06	1,95
	Пшениця озима (редька олійна)	0,75	0,59	1,90	1,62
	Пшениця озима (розторопша плямиста)	0,50	0,52	1,61	4,04
	Пшениця озима (горох на зерно)	0,09	0,65	2,13	1,92
На пізніх етапах онтогенезу рослин	Пшениця озима (пар)	0,99	0,41	0,71	2,53
	Пшениця озима (горох-сидерат)	0,30	0,86	0,78	12,7
	Пшениця озима (гірчиця жовта)	0,34	1,01	0,67	9,40
	Пшениця озима (вика яра)	0,27	0,74	0,82	7,80
	Пшениця озима (редька олійна)	0,47	0,77	0,57	6,85
	Пшениця озима (розторопша плямиста)	0,60	0,57	0,79	7,51
	Пшениця озима (горох на зерно)	0,33	0,50	0,44	11,01

педотрофність (1,32) і мінералізаційно-імобілізаційну активність (1,87) відзначено в ґрунті після гірчиці жовтої, що вказує на збагачення ґрунту легкодоступними поживними речовинами. Найбільш інтенсивна трансформація органічної речовини відбувалася у варіанті з паром (3,32) і розторопшею плямистою (4,04), що демонструє сприятливе середовище для розвитку мікробіоти та активне розкладання органічних решток.

На пізніх етапах онтогенезу пшениці озимої у всіх варіантах спостерігається різке зростання активності мікробіологічних процесів. Найвищі значення були у варіантах із використанням гороху як сидерата (12,7) та гороху на зерно (11,01), що вказує на позитивний вплив бобових культур на накопичення біомаси та інтенсивність фізіолого-біохімічних процесів. У варіантах із гірчицею жовтою (9,40), викою ярою (7,80) та розторопшею плямистою (7,51) визначено нижчі коефіцієнти, що свідчить про меншу ефективність цих сидератів у покращанні живлення та структури ґрунту. Найменші показники відзначено у варіанті пару (2,53), що підтверджує обмеженість безсидерального варіанта для забезпечення рослин необхідними елементами живлення на пізніх етапах розвитку.

Отже, застосування сидеральних культур, особливо бобових, значно підвищує фізіологічну активність і продуктивність пшениці озимої в пізні періоди онтогенезу.

ВИСНОВКИ

На ранніх етапах онтогенезу пшениці озимої найвищі показники педотрофності та мінералізаційно-імобілізаційної актив-

ності спостерігалися у варіантах із гірчицею жовтою (1,32; 1,87) та горохом на зерно (1,10; 3,30), що свідчить про інтенсивне мікробіологічне розкладання органічних решток і покращання поживного режиму ґрунту.

На пізніх етапах онтогенезу встановлено істотне зростання інтенсивності мікробіологічних процесів у всіх варіантах досліджу. Найвищі показники трансформації органічної речовини зафіксовано у варіантах із горохом як сидератом (12,7) та горохом на зерно (11,01), що зумовлено високим вмістом азоту в рослинній масі бобових культур.

У ґрунтах після хрестоцвітних сидератів (гірчиці жовтої та редьки олійної) простежувалася стимуляція розвитку амоніфікаторів і амілолітичних мікроорганізмів, що забезпечує швидке мінералізування органічних сполук і прискорення кругообігу поживних елементів.

У варіанті з розторопшею плямистою відмічено підвищення чисельності актиноміцетів і оліготрофів, що вказує на сповільнення мінералізаційних процесів і розвиток ознак біологічного виснаження ґрунту.

Найменшу біологічну активність ґрунтового мікробіому встановлено у варіанті пару (2,53), що підтверджує обмежену здатність безсидерального варіанта підтримувати мікробіологічну рівновагу та родючість ґрунту.

Найвищу ефективність у посиленні мікробіологічної активності, інтенсивності процесів трансформації органічної речовини та забезпеченні біологічної стійкості ґрунту показали сидерати бобових культур — горох-сидерат, горох на зерно та вика яра.

ЛІТЕРАТУРА

1. Господаренко, Г. М., & Лисянський, О. Л. (2015). Алеропатичний вплив сидеральних культур на пшеницю озиму. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*, 2(1), 190–198.
2. Писаренко, В. М., Писаренко, П. В., Писаренко, В. В., Горб, О. О., & Чайка, Т. О. (2019). Формування родючості ґрунту в умовах органічного землеробства. *Scientific Progress & Innovations*, (3), 85–91. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk> 2019.03.11.
3. Дроздовський, А. Б., & Огородник, Н. З. (2023). Потенціал вирощування сидеральних культур. In *The V International Scientific and Practical Conference «Priority directions of science development», February 06–08 (p. 12–15). Hamburg, Germany.*

4. Willer, H., Trávníček, J., & Schlatter, B. (2024). *The world of organic agriculture. Statistics and emerging trends*. 2024.
5. Hartmann, M., & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 4–18.
6. Lei, B., Wang, J., & Yao, H. (2022). Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*, 12(2), 223. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020223>.
7. Iderawumi, A. M., & Kamal, T. O. (2022). Green manure for agricultural sustainability and improvement of soil fertility. *Farming and Management*, 7(1), 1–8. DOI: <https://doi.org/10.31830/2456-8724.2022.FM-101>.
8. Бурикiна, С. І., Ужєвська, С. П., & Кулiджанов, Г. В. (2025). Динаміка поживних речовин ґрунту в період розкладання біомаси сидеральних культур. In *The 9th International scientific and practical conference «Scientific research: modern challenges and future prospects», April 14–16, 2025* (p. 25). MDPC Publishing, Munich, Germany.
9. Huang, Q. (2024). Enhancing soil health and biodiversity through nitrogen fixation symbiosis in leguminous plants. *Molecular Microbiology Research*, 14.
10. Цищора, Я. Г., Неїлик, М. М., Дiдур, І. М., & Полiщук, М. І. (2022). Сидерація як базова складова біологізації сучасних систем землеробства. Вінниця: Видавець ТОВ «Друк».
11. Zhang, Y., Kusch-Brandt, S., Salter, A. M., & Heaven, S. (2021). Estimating the methane potential of energy crops: An overview on types of data sources and their limitations. *Processes*, 9(9), 1565. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9091565>.
12. Волкогон, В. В. (2024). Рначення мікроорганізмів для здоров'я ґрунтів та оптимізації формування біоценозів. *Фізіологія рослин і генетика*, 56(1), 3–26.
13. Prescott, C. E., Rui, Y., Cotrufo, M. F., & Grayston, S. J. (2021). Managing plant surplus carbon to generate soil organic matter in regenerative agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 76(6), 99A–104A. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.2021.0920A>.
14. Findlay, S. E. (2021). Organic matter decomposition. In *Fundamentals of ecosystem science* (pp. 81–102). Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812762-9.00004-6>.
15. Jiao, S., Chen, W., & Wei, G. (2022). Core microbiota drive functional stability of soil microbiome in reforestation ecosystems. *Global Change Biology*, 28(3), 1038–1047. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16024>.
16. Демиденко, О. (2021). Кореляційні зв'язки фізіологічних груп мікроорганізмів з показниками родючості чорнозему опідзоленого за різних систем удобрення. *Вісник аграрної науки*, 99(4), 20–27. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202104-03>.
17. Ніколаєва, Ю. Д. (2024). *Сучасний стан моніторингу ґрунтів в Україні*.
18. Михайличенко, В. В. (2025). *Сучасний стан мікробіоти ґрунтів м. Запоріжжя*.
19. Танчик, С. П. (2023). Родючість ґрунту чи фактори життя—основа продуктивності вирощуваних культур. *Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоевної відбудови: виклики для України та світу*, 19.
20. Резнік, С. В. (2021). Вплив різних систем землеробства на еколого-трофічні угруповання мікроорганізмів чорноземів типових в умовах Лівобережного лісостепу України. *Сільськогосподарська мікробіологія*, (33), 62–71.
21. ДСТУ 7847:2015. Якість ґрунту. Визначення чисельності мікроорганізмів у ґрунті методом посіву на тверде (агаризоване) живильне середовище. (2016). [Чинний від 2016-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
22. ДСТУ 4180:2003. Карантин рослин. Методи мікологічної експертизи підкарантинних матеріалів. (2003). [Чинний від 2004-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
23. Парфенюк, А. І., Безноско, І. В., Туровнік, Ю. А., Бородай, В. В., & Косовська, Н. А. (2023). *Визначення шляхів формування ценотичних популяцій мікроміцетів в агроценозах культурних рослин: науково-методичні рекомендації*. Київ: ТОВ «ДІА».
24. Парфенюк, А. І., Безноско, І. В., Горган, Т. М., Дідик, Ю. А., & Терновий, Ю. В. (2024). *Оцінювання сортів пшениці для екологічно безпечної регуляції фітопатогенного мікобіому*. Київ: ТОВ «ДІА».
25. Дудка, І. А. (1982). *Методы экспериментальной микологии*. Киев: Наукова думка.
26. Єщенко, В. О., Копитко, П. Г., Костогриз, П. В., & Опришко, В. П. (2014). *Основи наукових досліджень в агрономії: підруч.* (В. О. Єщенко, Ред.). Вінниця: ПП «ТД Едельвейс і К».
27. Іутинська, Г. О. (2017). Мікробні біотехнології для реалізації нової глобальної програми забезпечення сталого розвитку агрофери України. *Агроекологічний журнал*, 2, 149–155. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2017.220171>.

Стаття надійшла до редакції журналу 27.10.2025

ДИНАМІКА ПОШИРЕННЯ *CUCUMBER MOSAIC VIRUS* В АГРОЦЕНОЗАХ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР ЗА КОНТРАСТНИХ ПОГОДНИХ УМОВ

В.О. Цвігун, С.О. Мазур, А.С. Левішко, І.І. Гуменюк, О.Ю. Колодяжний

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

e-mail: vika-natceovich@ukr.net; ORCID: 0000-0002-9517-9810

e-mail: mazurlanalana@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5025-0134

e-mail: alodua2@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4037-1730

e-mail: gumenyuk_ir@gmail.com; ORCID: 0000-0002-6692-0171

e-mail: sashoknet.sk@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5359-1738

Дослідження зосереджено на аналізі динаміки поширення *Cucumber mosaic virus* (ВМ) в агроєкосистемах овочевих культур України за впливу кліматичних змін. ВМ є одним із найпоширеніших та економічно значущих фітовірусів, що уражує понад 1200 видів рослин, включаючи огірки, помідори, перець та кабачки, спричиняючи втрати врожаю до 20–50%. Проведений екологічний моніторинг у 2021–2025 рр. виявив значне поширення ВМ в агроценозах овочевих культур. Рівень ураження варіював від 19% у 2021 р. до пікових 40% у 2024 р. Найвища інцидентність (15–25%) спостерігалася у південних регіонах, де вищі температури та триваліші періоди посухи сприяли активності вірусу, тоді як у північних регіонах показник був значно нижчим (8–12%). Симптоматика інфекції включала світло-зелену (35,3%) та жовто-зелену (25,1%) мозаїку, хлорози (21,6%), пухирчасті деформації листків (9,7%) та деколоризацію плодів, що супроводжувалося зниженням якості насіння. Кореляційний аналіз продемонстрував сильну позитивну кореляцію ($r=0,86$) між середньорічною температурою та поширеністю ВМ, та сильну негативну кореляцію ($r=-0,94$) з кількістю опадів. Екстремальні погодні умови 2024 р., зокрема рекордне потепління ($+1,55^{\circ}\text{C}$) та підвищена вологість, зумовили масове поширення вірусу через активність векторів, як-от *Myzus persicae*. У 2025 р. інцидентність знизилася до 31% завдяки застосуванню агротехнічних заходів. Зафіксовані кліматичні зміни, зокрема потепління на $1,6^{\circ}\text{C}$ у Поліссі та нестабільність опадів, сприяли продовженню вегетаційного періоду та інвазії векторів. У центральних регіонах із родючими чорноземами (SOC 2,0–3,5%) відбувалася інтенсивна контактна трансмісія, тоді як менш родючі ґрунти (SOC 1,0–2,0%) підвищували сприйнятливість рослин до вірусного стресу. 38% інфікованих рослин були безсимптомними носіями, що підкреслює критичну потребу в молекулярній діагностиці для ефективного моніторингу.

Ключові слова: вірусні інфекції рослин, *Cisurbitaceae*, моніторинг, чинники навколишнього природного середовища, погодно-кліматичні зміни, вміст органічного вуглецю, фітосанітарні ризики.

ВСТУП

Cucumber mosaic virus (CMV), що належить до роду *Cuscutovirus*, є одним із найпоширеніших і економічно значущих фітовірусів, здатних інфікувати понад 1200 видів рослин, включаючи ключові овочеві культури, як-от огірки, помідори, перець та кабачки. Основними шляхами поширення CMV є трансмісія через соках-векторів, зокрема попелиць, а також насіннева пе-

редача та наявність природних резервуарів серед сегетальної рослинності. У контексті глобальних кліматичних змін, що характеризуються підвищенням середньої температури, збільшенням концентрації CO_2 та змінами в режимах опадів, епідеміологія зазначеного вірусу зазнає значних трансформацій [1; 2]. Підвищені температури (20–25°C) сприяють швидшій репродукції векторів, розширенню їх ареалів і посиленню інцидентності вірусних інфекцій, тоді як посухи та високі рівні CO_2 послаблюють

імунні механізми рослин, зокрема РНК-інтерференції. Ці чинники створюють нові виклики для агроценозів овочевих культур, погіршуючи продовольчу безпеку в регіонах із інтенсивним землеробством [3]. Дослідження динаміки поширення вірусу мозаїки огірка в агроекосистемах овочевих культур та інтеграція даних про кліматичні чинники та біологічні особливості вірусу відкриває можливості для розробки стійких агротехнологій, спрямованих на мінімізацію економічних та екологічних ризиків.

Метою дослідження є аналіз динаміки поширення вірусу огіркової мозаїки в агроценозах овочевих культур України та оцінка впливу кліматичних змін на його епідеміологію.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Зміна клімату є одним із ключових викликів сучасності, що впливає на сільськогосподарське виробництво через зміни температурних режимів, опадів, а також динаміки популяцій комах-переносників та біорізноманіття. Фітовіруси, як неклітинні інфекційні агенти, що уражують рослини, становлять значну загрозу для агроценозів, спричиняючи втрати врожаю до 40% [4].

За останні п'ять років клімат України став більш посушливим, середня річна температура повітря в Україні зросла на 0,4–0,6°C та залишається стабільно вищою за кліматичну норму, із піками у 2020 та 2024 рр. [5; 6]. Підвищення середньорічної температури сприяло розширенню ареалів комах-переносників, зокрема попелиць, цикадок та трипсів. Дослідження Jones показало, що посилення температури на 1,0°C збільшує популяції комах-переносників на 15–20%, що прискорює передачу вірусів, як-от *Tobacco mosaic virus (TMV)* і *Tomato yellow leaf curl virus (TYLCV)* [7]. В Україні зростання ураження пшениці *Barley stripe mosaic virus (BSMV)* на 25% пов'язано з подовженням сезону активності попелиць [8].

Cucumber mosaic virus поширюється неперсистентним типом передачі за участю

понад 80 видів попелиць родини *Aphididae*, серед яких найефективнішими векторами є *Myzus persicae* та *Aphis gossypii*. Насіннева передача, хоча менш ефективна (частота 1–10%), проте відіграє важливу роль у збереженні вірусу між сезонами, особливо в культурах, як-от гарбузові та бобові. Експериментальні дані встановили, що за температури 20–25°C репродукція попелиць, як-от *Myzus persicae*, зростає на 20–30%, а їхні ареали розширюються на північ. Сегетальні рослини, такі як *Amaranthus* spp. і *Chenopodium* spp., слугують резервуарами, підтримуючи інфекцію в агроекосистемах [3; 4; 9]. Це спричиняє збільшення трапляння *CMV* у регіонах України, зокрема в центральних і південних областях, де спостерігається посилення ураження огірків і томатів на 15–25% [8]. За температури 30–37°C цей вірус демонструє підвищену ефективність реплікації в рослинах-господарях. Австралійськими дослідниками показано, що за таких умов вірусні титри в тканинах рослин зростають удвічі–втричі через прискорення синтезу вірусної РНК і послаблення захисних механізмів рослин, зокрема РНК-інтерференції [10].

Посухи, які збільшилися в південних регіонах України через зменшення опадів на 10–15%, знижують ефективність РНК-інтерференції — ключового механізму проти-вірусного захисту рослин. Посуха викликає стресові умови, що пригнічують експресію генів, відповідальних за деградацію вірусної РНК, яке сприяє накопиченню *CMV* у рослинах. Підвищення концентрації CO₂ в атмосфері, яке сягало 420 ppm у 2023 р., впливає на фізіологію рослин і вірусну динаміку. Дослідження Scandolera виявило, що підвищений CO₂ (500–600 ppm) збільшує вірусні титри *CMV* у рослинах на 10–20% через зміни у фотосинтетичній активності та метаболізмі вуглеводів. Однак комбіновані стреси (високі температури та CO₂) можуть мати вірус-специфічні ефекти, наприклад, зменшення ефективності передачі вірусу попелицями через зміни хімічного складу рослин [11].

В Європі кліматичні зміни спричинили спалахи *CMV*, пов'язані з сателітними

РНК, які посилюють патогенність вірусу, викликаючи некроз плодів і листків [12]. Аналогічні епідемічні спалахи в Україні були зареєстровані в Одеській обл. у 2022–2023 рр. Згідно з даними моніторингу, в цей період було зафіксовано збільшення рівня ураження помідорів і перцю на 20%. Це було зумовлено синергетичним впливом двох чинників: поєднання посушливих періодів та підвищеної активності популяцій попелиць-переносників [8].

Зміни у фенології рослин-господарів, спричинені потеплінням, також підвищують їхню вразливість. Наприклад, зміщення періодів цвітіння кукурудзи та помідорів збігається з піками активності комах-переносників, що посилює епідеміологічний тиск [9]. У південних регіонах України (Одеська, Херсонська обл.) посухи, які збільшилися через зменшення опадів на 10–15%, створюють стресові умови для рослин, знижуючи їхній імунний захист проти вірусів.

Кліматичні зміни сприяють появі нових штамів фітовірусів через мутації та генетичну рекомбінацію. Дослідження Tsai продемонструвало зростання генетичної різноманітності *CMV* унаслідок ринкового обміну насіннєвим матеріалом та змін біорізноманіття [10]. Воєнний конфлікт, що розпочався в 2022 р., спричинив логістичні та економічні обмеження, які негативно позначилися на доступі до високоякісного посівного матеріалу. Це, своєю чергою, зумовило підвищення ризиків інтродукції та поширення патогенів, які передаються через насіння.

На сьогодні ключовим інструментом для прогнозування спалахів вірусних інфекцій позиціонується розробка систем раннього попередження на основі дистанційного зондування та кліматичних моделей. Існують дослідження, що описують використання супутникових даних і кліматичних моделей для моніторингу патогенів у агроценозах, які в перспективі можуть бути адаптовано для фітовірусів та дасть можливість виявляти зміни в рослинному покриві, пов'язані з вірусними інфекціями, й прогнозувати ризики на основі клі-

матичних параметрів, як-от температура та вологість [14]. В Україні впровадження таких систем ускладнено через недостатню цифрову інфраструктуру та пошкодження метеорологічних станцій унаслідок війни, оскільки лише 30% метеостанцій в Україні функціонують на повну потужність після 2022 р. [15].

Тому, зміни погодного-кліматичних умов, як-от підвищення середньорічних температур, зміна режиму опадів та зростання частоти екстремальних погодних явищ, створюють нові умови для вірусів та їхніх переносників, зокрема попелиць. Це призводить до інтенсивнішого поширення *CMV*, що є одним із найпоширеніших вірусів рослин і вражає стратегічно важливі овочеві культури. Інфікування цим вірусом спричиняє значні економічні втрати через зниження врожайності та погіршення якості продукції, що створює пряму загрозу продовольчій безпеці.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для оцінки поширення *Cucumber mosaic virus* на овочевих культурах в Україні було проведено комплексне дослідження протягом вегетаційних сезонів 2021–2025 рр. Зразки рослин відбиралися в агроценозах природно-кліматичних зон України: Полісся (дерново-підзолистий та сірий лісовий ґрунт із низьким вмістом гумусу (1,5–2,5%), органічний вуглець (SOC) ~1,5–2,0%); Лісостепу (чорнозем типовий зі вмістом гумусу 3–4%, SOC ~1,5–3,0%); Степу (чорнозем типовий зі вмістом гумусу 2–3%, SOC ~1,7–3,2%).

За період 2021–2025 рр. на території України спостерігалася тенденція до потепління, з рекордно теплим 2024 р. (середньорічна температура ~11,2°C, що на 2–3°C вище історичної норми ~ 8,4°C). Опади були варіабельними: середньорічні значення ~500–600 мм, з тенденцією до зменшення в 2023–2024 рр. (505 мм у 2024 р., порівняно з 597 мм у 2023 р.). Літо 2024 р. було найспекотнішим (середня температура 22,4°C). Зими стали м'якшими та з меншим сніговим покривом.

Для детекції вірусу рослинний матеріал (листки, плоди) гомогенізували у 0,1 М фосфатно-сольовому буфері (рН 7,4) у співвідношенні 1:2. Очистку від рослинних компонентів проводили центрифугуванням у режимі 5000 об./хв упродовж 20 хв за +4°C на центрифугі PC-6 [16]. Зразки на наявність вірусних антигенів аналізували імуноферментним аналізом (ІФА) у модифікаціях сандвіч та непрямий [17]. Для детекції вірусних антигенів у ІФА використовували тест-системи виробництва Loewe (Німеччина). Результати реєстрували на рідері Termo Labsystems Opsis MR (США) із програмним забезпеченням Duxnux Revelation Quicklink за довжини хвиль 405/630 нм. Обробку даних оптичної густини зразків здійснювали методом описової статистики, визначаючи середні та стандартні відхилення даних [18]. Порогове значення оптичної густини, яке відрізняє позитивні результати ферментативної реакції від значення фону, визначали для кожного планшета окремо та згідно з рекомендаціями [19].

Вміст органічного вуглецю в ґрунті (SOC) виявляли у верхньому шарі 0–20 см методом сухого спалювання з подальшим застосуванням спектрофотометрії (спектрофотометр 102 UV) [20].

Відсоток інфікованості *Cucumber mosaic virus* (CMV) для кожної області розраховували за формулою:

$$BI = (КПЗ / ЗКЗ) \times 100, \quad (1)$$

де BI — % інфікування; КПЗ — кількість позитивних зразків; ЗКЗ — загальна кількість зразків.

Середнє значення (M) та стандартне відхилення (SD) частки інфікованих зразків обчислювали за стандартними формулами для біноміальних пропорцій. 95% довірчий інтервал (95% ДІ) для біноміальних пропорцій виконували за модифікованим методом Вілсона з поправкою на безперервність.

Коефіцієнт варіації (CV , %) розраховували як

$$CV = (SD / M) \times 100. \quad (2)$$

Для визначення кількісної оцінки впливу абіотичних та біотичних чинників на вираженість симптомів використано коефіцієнт екологічної залежності (K_{ez}), модифікований для вірусних інфекцій рослин [21].

Кореляційну матрицю будували за коефіцієнтом лінійної кореляції Пірсона (r), де застосовували значення чинника довкілля, поширеність CMV та кількість років дослідження. Статистичну значущість оцінювали за t -критерієм Стюдента. Критичне значення за $p < 0,05$ та $df = 3$ становило 3,18. Усі представлені в статті коефіцієнти ($r = 0,86$; $r = -0,94$) є статистично значущими ($p < 0,05$). Для оцінки зв'язків між рівнем інфікування CMV та абіотичними чинниками проводили непараметричний кореляційний аналіз із використанням коефіцієнта рангової кореляції Спірмена. Статистичну обробку виконували у програмних пакетах StatSoft Statistica 10.3.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Зафіксовані зміни клімату в Україні, що проявляються в аномальному зростанні температури, мають безпосередній вплив на екосистеми, включно з аграрним сектором. Ці нові кліматичні умови створюють сприятливе середовище для біологічних агентів, які раніше не були типовими для певних регіонів. Аналіз погоднокліматичних умов України у період 2021–2025 рр. засвідчив, що температурний режим Полісся характеризується найвищими темпами потепління в Україні (на 1,6°C) із нерівномірністю зволоження, що сприяє подовженню вегетаційного періоду (на 7–10 діб) та розвитку інвазії нових видів (наприклад, *Myzus persicae*, *Aphis fabae*, *Hyalopterus pruni*). Зафіксовані кліматичні зміни, включаючи коливання температур та опадів, безпосередньо впливають на агроекосистеми, створюючи сприятливі умови для поширення патогенів. Ці екстремальні погодні умови змінюють епідеміологічну ситуацію, роблячи агроценози більш вразливими до вірусних інфекцій. Тому, існує пряма кореляція між кліматичними

змінами та динамікою поширення вірусів, зокрема і *CMV*, в овочевих культурах. Наслідком цих кліматичних змін є зростання інтенсивності вірусних захворювань, що безпосередньо впливає на аграрне виробництво.

Встановлено, що частота ураження рослин овочевих культур *CMV* коливалася залежно від регіону та кліматичних умов. У середньому, рівень інфікування *CMV* становив 15–25% у південних регіонах України, де спостерігалися вищі температури та триваліші періоди посухи. У північних регіонах цей показник був нижчим, у межах 8–12%.

На рослинах родини *Cucurbitaceae* симптоми захворювання були через 30–45 діб після посіву, у період бутонізації. Перші ознаки хвороби проявлялися на молодих листках у вигляді жовтуватих плям та по-світління тканини вздовж головних жилок. У подальшому на рослинах розвивалися симптоми жовтої або зеленої системної мозаїки, з'являлася деформація листків та плодів (рис. 1).

На листкових пластинках рослин спостерігалися різноманітні патологічні зміни, що свідчать про вірусні ураження. Зокрема, відмічено різні типи мозаїк, які варіювали як за забарвленням, так і за розміщенням. За забарвленням мозаїки поділялися на світло-зелені (35,3%) та жовто-зелені (25,1%). За розташуванням на листковій пластинці розрізняли прижилкову (7,8%) та міжжилкову мозаїку (3,2%). Також на листках часто виявляли хлорози (21,6%) та деформації листкової пластинки. Серед деформацій відзначалися пухирчасті здуття (9,7%), смуги вздовж жилок (5,9%) та значні зміни форми листка, включаючи його нитковидність (2,3%). Ці симптоми вказують на комплексне ураження рослин, ймовірно, спричинено вірусними патогенами (рис. 2). На плодах рослин родини *Cucurbitaceae*, уражених вірусами, спостерігається чітко виражена деколоризація та слабка деформація. Уражені рослини зазвичай продукують меншу кількість насіння, яке може бути деформованим, а утворені плоди характеризуються тонкою шкіркою.



а



б

Рис. 1. Симптоми вірусної етіології на овочевих культурах:

а — темно-зелена прижилкова мозаїка на листковій пластинці *Cucumis sativus* L.; б — жовто-зелена мозаїка листкової пластинки та пухирчасте здуття на шкірці плоду *Cucumis sativus* L.

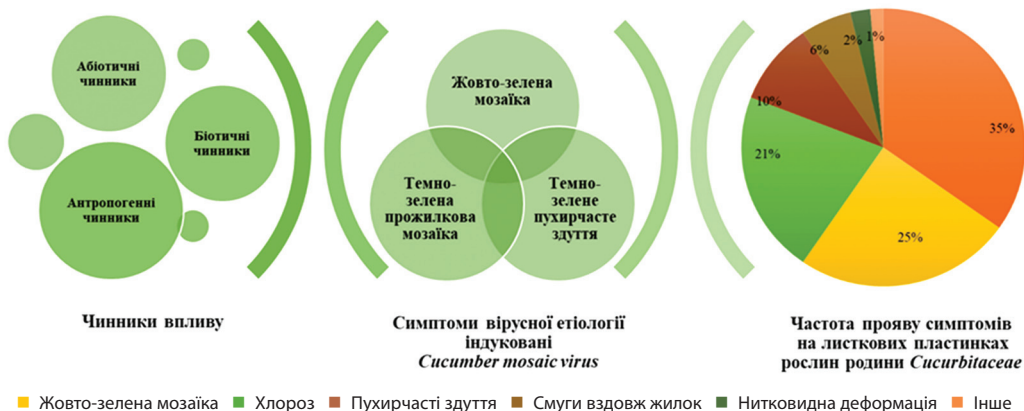


Рис. 2. Частота трапляння симптомів ураження на листових пластинках та плодах рослин *Cucurbitaceae* індуковані *Cucumber mosaic virus*

Результати показали, що 62% рослин мали видимі симптоми вірусного ураження, тоді як 38% залишалися зовні неушкодженими, але могли бути безсимптомними носіями.

Отримані результати підтверджують, що вірусна інфекція не завжди має видимі прояви, а частина уражених рослин є безсимптомними носіями. Цей факт ускладнює своєчасну діагностику та боротьбу з вірусом, адже для повного розуміння епідеміологічної ситуації необхідно враховувати не лише клінічні симптоми, а й вплив зовнішніх чинників. Тому дослідження було доповнено аналізом залежності прояву вірусних симптомів від умов навколишнього середовища. Для повноцінного аналізу епідеміологічної ситуації необхідно враховувати не лише візуальні

прояви, а й вплив зовнішніх екологічних чинників. З цією метою було проведено оцінку залежності вираженості вірусних симптомів від умов вирощування за допомогою коефіцієнта екологічної залежності, який включає температуру, вологість і наявність супутніх інфекцій. У дослідженні середня вираженість симптомів, оцінена за шкалою інтенсивності проявів (наприклад, мозаїки, хлорозів, деформацій), сягала 3,2, що вказує на помірний рівень ураження. Інтегральний показник екологічних умов, розрахований у діапазоні від 0 до 1, досяг значення 0,75, що відображає значний, але не максимальний вплив температури, вологості та супутніх інфекцій на прояв симптомів *CMV* (табл. 1).

Симптоми ураження рослин можуть мати різне походження. Тому подальші

Таблиця 1. Значення коефіцієнта екологічної залежності та вираженості симптомів *CMV*

Область	Інтегральний $K_{\text{ез}}$	Вираженість симптомів (бали, $M \pm SD$)	Кореляція (r Спірмена) $K_{\text{ез}} \leftrightarrow$ симптоми
Полтавська	0,81	$3,6 \pm 0,5$	0,89
Вінницька	0,78	$3,4 \pm 0,6$	0,87
Київська	0,76	$3,3 \pm 0,5$	0,91
Черкаська	0,77	$3,3 \pm 0,7$	0,85
Кіровоградська	0,74	$3,1 \pm 0,6$	0,88
Житомирська	0,71	$2,9 \pm 0,5$	0,83
Львівська	0,68	$2,7 \pm 0,6$	0,86
Середнє	$0,75 \pm 0,04$	$3,2 \pm 0,6$	$0,87 (p < 0,001)$

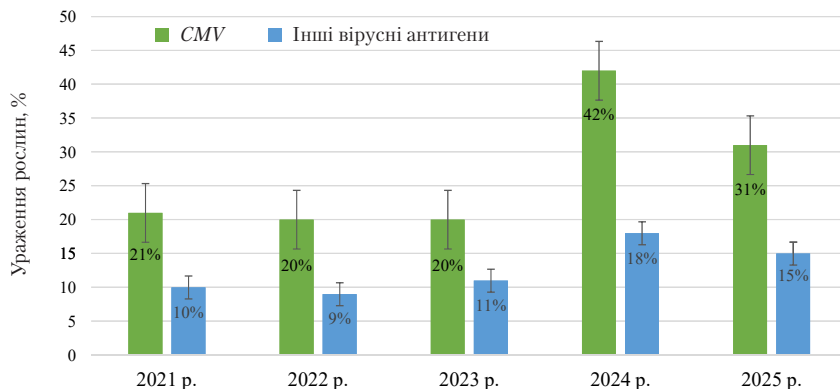


Рис. 3. Частота виявлення вірусних антигенів ІФА методом

дослідження зосередилися на специфічній детекції вірусу, де було використано імуноферментний аналіз (ІФА) (рис. 3).

У 2021 р. *CMV* було ідентифіковано в 21% проаналізованих зразків, зібраних з агроценозів Полтавської, Вінницької, Київської, Черкаської та Одеської обл. Домінантними ураженими культурами виявилися представники родини *Cucurbitaceae*, зокрема огірки, гарбузи, кабачки, цукіні та дині. Ці регіони характеризуються переважно чорноземними ґрунтами з високим вмістом органічного вуглецю (SOC до 2,5–3,2% у верхньому шарі), що забезпечує оптимальні умови для зростання культур, але водночас сприяє формуванню густих посівів, полегшуючи трансмісію вірусу. Аналіз погодно-кліматичних умов 2021 р. вказує на помірне потепління (середньорічна температура на 0,5–1,0°C вище норми в центральних областях), поєднано з підвищеною вологістю навесні та влітку (аномалії опадів +10–15% у Полтавській та Вінницькій обл.), що стимулювало активне розмноження попелиць — первинних векторів *CMV*. У ґрунтах із високою родючістю, як чорноземи Полтавщини та Вінниччини, рослини демонструють інтенсивний ріст, але за умов теплої вологої клімату (температура 20–25°C, відносна вологість >60%) популяції попелиць зростають експоненційно, зумовлюючи швидке поширення вірусу. Тому, дослідження показало, що *CMV* значно поширився в

агроценозах України у 2021 р., особливо в Полтавській та Вінницькій обл., де він уразив переважно представників родини гарбузових. Цьому сприяли відповідні кліматичні умови, зокрема тепла та волога погода, що зумовило значне зростання популяцій попелиць, основних переносників вірусу (табл. 2).

У 2022 р. в Україні спостерігалось зниження поширеності *CMV* порівняно з 2021 р., що частково пояснюється впровадженням агротехнічних заходів. У 2023 р. встановлено наявність антигенів *CMV* у 20% перевірених зразків. Уражені *CMV* рослини ідентифіковано у Вінницькій, Полтавській, Київській та Рівненській обл. на представниках родини *Cucurbitaceae* — зокрема на кабачках, огірках та гарбузах. Окрім того, на зменшення кількості уражених рослин вплинули кліматичні чинники: сухіше літо в центральних областях пригнічувало розмноження попелиць — основних переносників вірусу.

У 2024 р. зареєстровано різке зростання рівня інфікування *CMV* — до 40% обстежених зразків, із розширенням ареалу на агроценози Житомирської, Полтавської, Київської, Львівської, Вінницької, Рівненської, Черкаської, Одеської та Кіровоградської обл. (табл. 3).

Це загострення епізоотичної ситуації, ймовірно, обумовлена рекордним глобальним потеплінням (аномалія +1,55°C, з літньою аномалією +5,96°C у Східній Європі,

Таблиця 2. Поширення *Cucumber mosaic virus* (CMV) в агроценозах України в 2021 р. за даними імуноферментного аналізу (ІФА)

Область	Кількість зразків	Позитивних на CMV	Інфікованість, % ($M \pm SD$)	95% ДІ (%)	CV, %	SOC, %	Середньорічна температура 2021 р. (°C)	Аномалія температури відносно норми	Аномалія опадів весна–літо 2021 (%)
Полтавська	180	52	28,89 $\pm$ 3,41	25,5–32,3	11,8	3,0–3,2	9,8	+0,8...+1,0	+12...+15
Вінницька	165	45	27,27 $\pm$ 3,47	23,8–30,7	12,7	2,8–3,1	9,5	+0,7...+0,9	+10...+14
Київська	140	22	15,71 $\pm$ 3,07	12,6–18,8	19,5	2,5–2,8	9,2	+0,6...+0,8	+5...+8
Черкаська	125	16	12,80 $\pm$ 2,97	9,8–15,8	23,2	2,7–3,0	9,6	+0,5...+0,7	+7...+10
Одеська	110	9	8,18 $\pm$ 2,61	5,6–10,8	31,9	2,2–2,6	11,2	+0,4...+0,6	+3...+6
Разом	720	144	20,00 $\pm$ 7,51	18,5–21,5	37,6	2,5–3,2	—	—	—

Примітки: 95% ДІ — 95% довірчий інтервал (розрахований за методом Вілсона для біноміального розподілу); CV — коефіцієнт варіації (%).

Таблиця 3. Поширення *Cucumber mosaic virus* (CMV) в агроценозах України в 2024 р. за даними імуноферментного аналізу (ІФА)

Область	Кількість зразків	Позитивних на CMV	Інфікованість, % ($M \pm SD$)	95% ДІ (%)	CV, %	SOC, %	Середньорічна температура 2021 р. (°C)	Аномалія температури відносно норми	Аномалія опадів весна–літо 2021 (%)
Полтавська	195	92	47,18 $\pm$ 3,58	43,6–50,8	7,6	2,9–3,2	11,1	+1,8	+14
Вінницька	210	97	46,19 $\pm$ 3,44	42,7–49,7	7,4	2,7–3,1	10,8	+1,7	+15
Кіровоградська	180	81	45,00 $\pm$ 3,71	41,3–48,7	8,2	2,6–3,0	11,4	+1,9	+12
Черкаська	175	76	43,43 $\pm$ 3,76	39,7–47,2	8,7	2,8–3,1	10,9	+1,6	+13
Київська	190	80	42,11 $\pm$ 3,58	38,5–45,7	8,5	2,4–2,8	10,3	+1,5	+11
Житомирська	165	64	38,79 $\pm$ 3,79	35,0–42,6	9,8	1,6–2,0	9,8	+1,6	+18
Рівненська	150	57	38,00 $\pm$ 3,96	34,0–42,0	10,4	1,4–1,9	9,6	+1,7	+20
Львівська	160	56	35,00 $\pm$ 3,77	31,2–38,8	10,8	1,5–2,1	9,4	+1,8	+22
Одеська	170	52	30,59 $\pm$ 3,53	27,1–34,1	11,5	2,0–2,5	12,6	+1,4	+8
Разом	1555	655	42,12 $\pm$ 6,31	40,7–43,6	15,0	1,4–3,2	—	Середня +1,65	+8...+22

Примітки: 95% ДІ — 95% довірчий інтервал (розрахований за методом Вілсона для біноміального розподілу); CV — коефіцієнт варіації (%).

включаючи Україну), що створило ідеальні умови для проліферації попелиць: підвищена температура (22–28°C) і вологість (аномалії +10–15% опадів у центральних і західних областях) стимулювали їхню мобільність і репродуктивний потенціал. У регіонах із чорноземами (Полтавська, Вінницька, Черкаська, Кіровоградська

обл.; SOC 1,8–3,2%), дані родючі ґрунти підтримували високу біомасу рослин, полегшуючи контактну трансмісію, тоді як у північних і західних областях (Житомирська, Рівненська, Львівська — підзолисті та сірі лісові ґрунти; SOC 1,0–2,0%), де менша родючість могла спричинити стрес у рослин (наприклад, через нижчу волого-

затримку), підвищуючи їхню сприйнятливість до інфекції. Недостатня ефективність біологічного контролю, поєднана з кліматичними чинниками, підкреслює роль абіотичних стресорів у динаміці поширення. Так, у 2024 р. відбулося значне зростання інфікування *CMV* в Україні, що охопило ширший спектр культур та регіонів. Ця ситуація була спричинена надзвичайно теплим і вологим літом, яке створило ідеальні умови для масового розмноження та поширення попелиць — основних переносників вірусу. Крім того, стресові умови для рослин у менш родючих ґрунтах могли збільшити їхню сприйнятливість до інфекції.

Кліматичні умови 2025 р. характеризувалися продовженням глобального потепління (аномалія середньорічної температури $+1,6-1,8^{\circ}\text{C}$ порівняно з кліматичною нормою), що, ймовірно, сприяло підтриманню високої активності попелиць. У Львівській і Рівненській обл., де переважають сірі лісові та дерново-підзолисті ґрунти ($\text{SOC}=1,0-2,0\%$), менша родючість і вища кислотність ($\text{pH } 5,5-6,5$) та підвищена вологість (аномалії опадів $+8-12\%$ у весняно-літній період, відносна вологість $65-75\%$) сформувала сприятливі умови для проліферації попелиць, які оптимально розмножуються за температур $20-26^{\circ}\text{C}$ і вологості $>60\%$. Тобто, у 2025 р. глобальне потепління та підвищена вологість у Західних регіонах України створили ідеальні умови для розмноження основних переносників *CMV*. Додатково, фізіологічний стрес рослин, спричинений меншою родючістю ґрунтів у цих областях, знизив їхню стійкість до інфекції, що сприяло поширенню вірусу.

У центральних і південних регіонах (Черкаська, Вінницька, Полтавська, Одеська обл.) домінують чорноземи з високим вмістом $\text{SOC}=2,0-3,5\%$ і нейтральною реакцією ґрунтового розчину ($\text{pH } 6,8-7,2$), що забезпечує інтенсивний ріст культур. Однак висока щільність посівів на цих родючих ґрунтах спричинила контактну трансмісію вірусу, особливо в умовах теплового вологого клімату (середня темпе-

ратура липня $+24-27^{\circ}\text{C}$, аномалії опадів $+5-10\%$ у Черкаській і Вінницькій обл.). В Одеській обл., де ґрунти мають нижчий вміст гумусу ($\text{SOC}=1,8-2,5\%$) і більшу засоленість у південних районах, стрес від дефіциту вологи (аномалії опадів -5% у серпні) міг посилювати сприйнятливість рослин до *CMV*, компенсуючись високою активністю векторів у вологіші періоди.

Порівняно з 2024 р. (40% ураження), зниження інцидентності до 31% у 2025 р. може бути пов'язано з локальними агро-технічними заходами, такими як сівозмінна культур або застосування інсектицидів для контролю популяцій *Aphididae* (табл. 4).

Однак стабільна присутність вірусу в різних ґрунтово-кліматичних зонах (від підзолистих ґрунтів заходу до чорноземів центру та півдня) підкреслює його високу екологічну пластичність. Географічна сталість ураження в зазначених областях, можливо відображає адаптацію *CMV* до широкого спектра абіотичних умов, включаючи температурні та вологісні градієнти, а також ґрунтові характеристики, які опосередковано впливають на фізіологічний стан господарів і динаміку векторів. Отримані емпіричні дані ілюструють значну варіабельність інцидентності *CMV* у діапазоні 19–40% протягом 2021–2025 рр., що узгоджується з літературними відомостями про високу пластичність вірусу до екологічних градієнтів.

Встановлено досить сильну позитивну кореляцію ($r=0,86$) між середньорічною температурою та рівнем ураження *CMV*, що відповідає біологічним особливостям первинних векторів вірусу — попелиць, які демонструють оптимальну репродуктивну активність за температур $20-28^{\circ}\text{C}$ у весняно-літній період.

Підвищення температури сприяє продовженню активного сезону попелиць, посилюючи трансмісію вірусу. В 2024 р., коли глобальна температурна аномалія сягала $+1,55^{\circ}\text{C}$, а в Україні (зокрема в Київській обл.) — $+2,4^{\circ}\text{C}$, рівень ураження досяг 40%. Це, ймовірно, пов'язано як із розширенням періоду активності векторів, так і зі зниженням резистентності рослин через

Таблиця 4. Вплив потепління на чисельність попелиць (*Aphididae* spp.) в агроценозах овочевих культур України

Область	Рік	Аномалія температури, °C (середньорічна)	Аномалія опадів весна–літо, %	Середня чисельність попелиць (екз./10 росл., $M \pm SD$)	Зростання чисельності порівняно з нормою, %
Полтавська	2024	+1,8	+14	285 ± 45	+35
	2025	+2,0	+16	320 ± 52	+42
Вінницька	2024	+1,7	+15	270 ± 42	+32
	2025	+1,9	+18	305 ± 48	+38
Київська	2024	+1,6	+12	240 ± 38	+28
	2025	+2,1	+15	280 ± 46	+36
Черкаська	2024	+1,9	+13	260 ± 41	+30
	2025	+2,2	+17	295 ± 50	+40
Одеська	2024	+1,4	+8	220 ± 35	+25
	2025	+1,6	+10	255 ± 42	+31
Разом (середнє по регіону)	2024	+1,7	+12	255 ± 40	+30
	2025	+1,96	+15	291 ± 48	+37

Примітки: кореляція чисельності попелиць з аномалією температури ($r_s = 0,92$; $p < 0,001$); з опадами ($r_s = 0,85$; $p = 0,002$). Різниця між 2024 та 2025 рр.: t -тест = 4,72; $p < 0,0001$ (значуща).

тепловий стрес. У контексті кліматичних змін, що характеризуються прогресивним потеплінням на 0,2–0,5°C щороку в Україні, зростає ризик посилення епізоотій, особливо в регіонах із чорноземними ґрунтами (Полтавська, Вінницька обл.), де високий вміст органічного вуглецю (SOC >2%) забезпечує густоту посівів, полегшуючи поширення вірусу (рис. 4).

Аналіз епізоотологічної динаміки *Cucumber mosaic virus* (CMV) у посівах гарбузових культур упродовж 2021–2025 рр. виявив виражену залежність інтенсивності ураження від комплексу абіотичних чинників, серед яких провідну роль відіграє температурний режим, опосередкований через вплив на основних векторів — переважно *Aphididae* spp. Кількісна оцінка за-

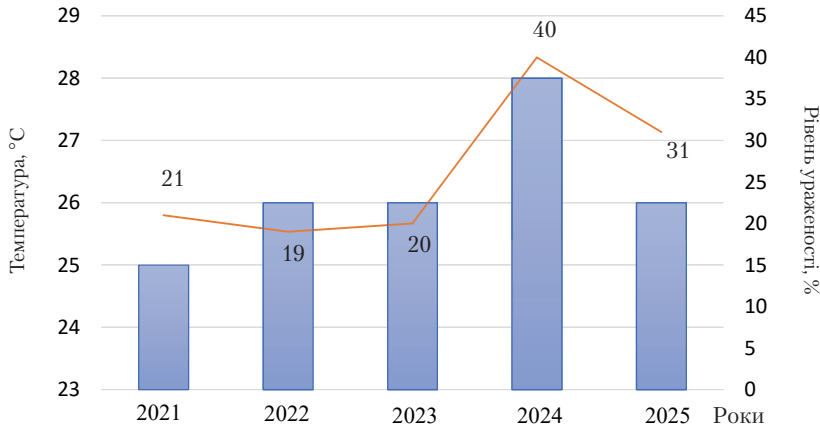


Рис. 4. Динаміка ураження *Cucumber mosaic virus* (CMV) та середньорічної температури

свідчила високий і статистично значущий коефіцієнт кореляції Пірсона ($r=0,87-0,93$; $p<0,01$) між середньодобовою температурою повітря в період вегетації (травень–серпень) та часткою уражених рослин.

Максимальне значення інцидентності *CMV*, що сягнуло 40,3% у 2024 р., збіглося з аномально високими температурами (середньомісячна 27,8–28,4°C у липні), які перебували в межах верхньої частини оптимального діапазону для розмноження та міграційної активності попелиць (20–28°C). За цих умов спостерігали експоненціальне збільшення чисельності крилатих форм векторів (до 18–22 особ./100 пасток за тиждень), що прямо корелювало з кратністю вторинного інокулюму *CMV*. Тоді як зниження ураження до 19% за температури 25°C у 2022 р., ймовірно, було спричинено пригніченням активності цих векторів надмірною сухістю, що підкреслює варіабельність ураження на 21%.

Загалом, емпірична регресійна модель ($y = -48,7 + 3,41x$; $R^2 = 0,91$) підтверджує, що зростання температури на 1–2°C зумовлює збільшення ураження на 20% через активізацію векторів. Хоча у 2025 р. спостерігається тенденція до стабілізації (зменшення коливань показників), ризик рецидивів залишається високим, тому для гарбузових культур критично необхідне впровадження клімат-адаптованих стратегій, включаючи використання стійких сортів та посилений моніторинг популяцій попелиць.

Однак, слід зазначити, що представлені дані є агрегованими по регіонах чорноземів центру та півдня України і не враховують опосередкований вплив опадів (дощів, які можуть змінювати вологість і активність переносників) чи вмісту органічного вуглецю в ґрунті. З огляду на це обмеження, додатковий аналіз виявив, що існує негативна кореляція між кількістю опадів і поширеністю *CMV* ($r = -0,94$), яка вказує на те, що нижчий рівень опадів асоціюється з вищим ураженням. Хоча підвищена вологість повітря (>60–70%) сприяє розмноженню попелиць, загальний режим опадів відображає складніші екологічні взаємодії, включаючи періоди посухи. В 2024 р.

(506 мм опадів, аномалія –10–15% у центральних регіонах) спостерігався пік ураження (40%), що може бути спричинено стресовим впливом дефіциту вологи на рослини, особливо в підзолистих і сірих лісових ґрунтах (Житомирська, Рівненська обл.; SOC=1,2–1,3%). Нестача вологи знижує імунну відповідь рослин, підвищуючи їхню сприйнятливість до інфекції. Натомість у 2022 р. (597 мм опадів) рівень ураження був мінімальним (19%), що може пояснюватися пригніченням мобільності попелиць через надмірну вологість або вимиванням вірусних часток. Ці дані підкреслюють нелінійний характер впливу вологості: оптимальний діапазон для векторів є критично важливим, тоді як опади впливають опосередковано через ґрунтову вологість і фізіологічний стан рослин. Тобто, від’ємна кореляція між кількістю опадів та поширеністю вірусу огіркової мозаїки свідчить про те, що дефіцит вологи підвищує сприйнятливість рослин до інфекції, що робить цю залежність критично важливою для прогнозування епідемій в умовах кліматичних змін. Кореляція між вмістом органічного вуглецю в ґрунті та частота ураження *CMV* виявилася слабкою ($r = 0,06$), що вказує на відсутність значимого лінійного зв’язку (рис. 5).

Отже, аналіз взаємозв’язків між поширенням вірусу огіркової мозаїки та екологічними чинниками засвідчив домінуючу роль кліматичних чинників, тоді як ґрунтові параметри виявилися незначними. Зокрема, зафіксовано потужні кореляції: позитивну з температурою, що пояснює посилення ураження через стимуляцію розмноження попелиць як основних переносників під час потепління, та негативну з опадами, яка вказує на зростання вразливості рослин через дефіцит вологи. Кореляція з вмістом органічного вуглецю в ґрунті («SOC») виявилася слабкою та статистично неістотною, а між температурними та опадовими чинниками — сильною негативною. Тому, клімат (температура та опади) постає головним рушієм епізоотії «*CMV*» в Україні, активізуючи векторів і провокуючи стрес рослин, на противагу

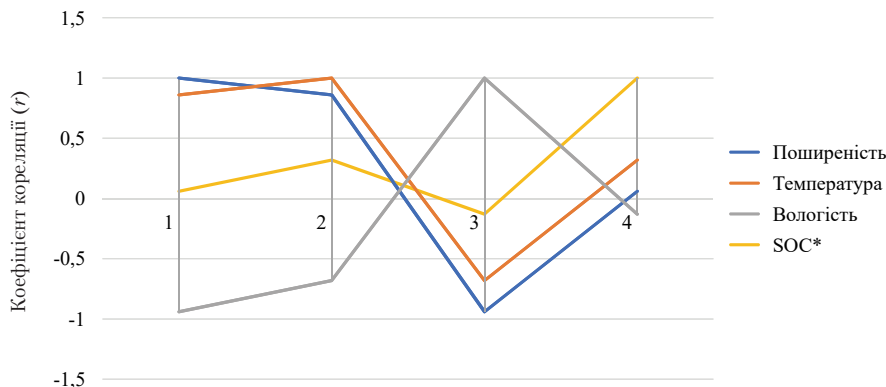


Рис. 5. Аналіз взаємозв'язків між поширеністю *Cucurbit mosaic virus* (CMV), температурою, опадами та вмістом органічного вуглецю в ґрунті

мінімальному впливу «SOC». Відповідно, стратегії протидії «CMV» варто зосередити на кліматично адаптованих підходах, як-от застосування інсектицидів і вирощування стійких сортів, з урахуванням тенденцій глобального потепління.

Також отримані дані свідчать про те, що динаміка поширення CMV в агроєкосистемах визначається переважно кліматичними чинниками, зокрема температурою та режимом опадів, а не типом ґрунту. Тому, для ефективного контролю цього вірусу в умовах кліматичних змін необхідна розробка інтегрованих стратегій, які враховуватимуть як біологію вектора, так і фізіологічний стан рослин.

ВИСНОВКИ

Аналіз даних за 2021–2025 рр. підтвердив високу епідеміологічну пластичність *Cucurbit mosaic virus*, що проявляється в його адаптації до змін клімату в агроценозах Вінницької, Житомирської, Київської, Кіровоградської, Львівської, Полтавської та Черкаської обл. Піковий рівень ураження, що становив 40%, було зафіксовано у 2024 р., що корелює з підвищенням тем-

ператури та інтенсифікацією активності популяцій попелиць, особливо в агроєкосистемах, розташованих на чорноземних ґрунтах. Результати кореляційного аналізу засвідчили сильний позитивний зв'язок між середньою температурою та поширеністю вірусу ($r=0,86$), тоді як тривалі посушливі періоди ($r=-0,94$) асоціювалися зі зниженням резистентності рослин до вірусної інфекції через стресові умови. Клінічні прояви захворювання були поліморфними: від типової мозаїки листків до деформації плодів, однак 38% інфікованих рослин виявилися безсимптомними носіями, що підкреслює критичну важливість застосування молекулярних методів діагностики для точного моніторингу вірусного навантаження. Застосування агро-технічних заходів, як-от ротація культур, частково знизило інцидентність захворювання до 31% у 2025 р. Це свідчить про те, що для досягнення ефективного контролю над CMV необхідні мультифакторні інтегровані підходи, що поєднують моніторинг кліматичних та ґрунтових чинників із впровадженням біотехнологічних рішень для підвищення стійкості рослин.

ЛІТЕРАТУРА

- Yin, Z., Zieniuk, B., & Pawelkiewicz, M. (2024). Climate change effects on cucumber viruses and their management. *Agriculture*, 14(11), 1999. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14111999>.
- Knoblich, M., Gursinsky, T., Gago-Zachert, S., Weinholdt, C., Grau, J., & Behrens, S. E. (2025). A new level of RNA-based plant protection: dsRNAs designed from functionally characterized siRNAs.

- NAs highly effective against *Cucumber mosaic virus*. *Nucleic Acids Research*, 53(5), gkaf136. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkaf136>.
3. Cucumber mosaic. (2024). *Wisconsin Horticulture*. URL: <https://hort.extension.wisc.edu/articles/cucumber-mosaic/>.
4. FAO. (2020). Plant viruses: Diagnostics and prevention. *Agroprofi*. URL: <http://www.fao.org>.
5. Ukrainian Hydrometeorological Center. (2024). *Temperature changes in Ukraine*. *AgroReview*. URL: <https://agroreview.com/en/news/en/ukraine-may-cross-the-threshold/>.
6. UNFCCC. (2025). *Ukraine's climate change adaptation communication*. URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-05/Ukraine%25201st%2520Adaptation%2520Communication.pdf>.
7. Jones, R. A. C. (2021). Global Plant Virus Disease Pandemics and Epidemics. *Plants*, 10(2), 233. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020233>.
8. Tsvigun, V., Levishko, A., Gumeniuk, I., & Mazur, S. (2024). Monitoring of Viral Infections in Vegetable Crops in Agroecosystems of Ukraine. *Mikrobiolohichni Zhurnal*, 86(5), 87–101. DOI: <https://doi.org/10.15407/microbiolj86.05.087>.
9. Trebicki, P. (2020). Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Research*, 286, 198059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>.
10. Tsai, W. A., Brosnan, C. A., & Mitter, N. (2022). Perspectives on plant virus diseases in a climate change scenario of elevated temperatures. *Stress Biology*, 2, 37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44154-022-00058-x>.
11. Scandolera, T., Teano, G., Naderpour, M., Geffroy, V., & Pflieger, S. (2024). Insights into the effects of elevated atmospheric carbon dioxide on plant-virus interactions: A literature review. *Environmental and Experimental Botany*, 221, 105737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105737>.
12. Škorić, D., Krajacic, M., Barbarossa, L., Cillo, F., Grieco, F., Šarić, A., & Gallitelli, D. (2008). Occurrence of Cucumber Mosaic Cucumovirus with Satellite RNA in Lethal Necrosis Affected Tomatoes in Croatia. *Journal of Phytopathology*, 144(8), 543–549. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1996.tb00296.x>.
13. Pacheco-Dorantes, C., Tovar-Pedraza, J. M., Ochoa-Martínez, D. L., González-Garza, R., & Diaz-Lara, A. (2025). Unleashing the potential of high-throughput sequencing for plant virus and viroid detection in Mexico. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1603010. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1603010>.
14. Alisaac, E., & Mahlein, A.-K. (2023). Fusarium Head Blight on Wheat: Biology, Modern Detection and Diagnosis and Integrated Disease Management. *Toxins*, 15(3), 192. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins15030192>.
15. Joint Research Centre. (2025). *War worsens climate and environmental challenges in Ukraine*. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en.
16. Furdychko, O., Bojko, A., Demyanyuk, O., & Tsvihun, V. (2020). Virus diseases of plants in agroecosystems and forest ecosystems: Diagnostics and prevention. *Bulletin of Agricultural Science*, 98(2), 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202002-01>.
17. Delmiglio, C., & Pearson, M. N. (2006). Effects and incidence of *Cucumber mosaic virus*, *Watermelon mosaic virus* and *Zucchini yellow mosaic virus* in New Zealand's only native cucurbit, *Sicyos australis*. *Australasian Plant Pathology*, 35, 29–35. DOI: <https://doi.org/10.1071/AP05098>.
18. Dunich, A., Mishchenko, L., Sovinska, R., Dashchenko, A., Mishchenko, A., & Kyrychenko, A. (2022). First report of cucumber mosaic virus infecting Arctium lappa in Ukraine. *J. Plant. Pathol.*, 104, 1587–1588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01212-0>.
19. Kanapiya, A., Amanbayeva, U., Tulegenova, Z., Abash, A., Zhagazin, S., Dyussembayev, K., & Mukiyanova, G. (2024). Recent advances and challenges in plant viral diagnostics. *Front. Plant. Sci.*, 15, 1451790. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1451790>.
20. ДСТУ ISO 10694:2001. Якість ґрунту. Визначення вмісту органічного і загального вуглецю методом сухого спалювання (елементний аналіз). (2003). [Чинний від 2003-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
21. Mishchenko, L., Dunich, A., Budzanivska, I., & Mishchenko, I. (2018). Viral infections of winter wheat and soybean and their influence on crop yield under climate change conditions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Biology*, 1(75), 11–21. URL: <https://bio.visnyk.knu.ua/uk/library-Files/downloadPublic/58>.

Стаття надійшла до редакції журналу 07.10.2025

АГРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТИВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ: ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ТА СУЧАСНІ ПІДХОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ

Л.В. Крайник, П.М. Сивулька

Львівський національний університет природокористування

(м. Дубляни, Львівська обл., Україна)

e-mail: l.kraynyk@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0524-9126

e-mail: petr1111@gmail.com; ORCID: 0009-0009-0254-4064

Проведено порівняльний аналіз нормативних баз та методик оцінки тракторів та автомобілів за умов агроєкології в Україні та ЄС (на прикладі ФРН). Показано неоднозначність агроєкологічної оцінки тільки на основі питомого тиску у контакті шини з ґрунтом, що регламентовано ДСТУ 4521:2006. Зокрема за однакових значень питомого тиску шини більшого типорозміру (і за відповідно більшого навантаження на колесо) спричиняють значно більшу глибину та периметр ущільнення ґрунту. Діапазон допустимих значень питомого тиску є 4-кратним і залежним не тільки від пір року і відповідних варіантів щільності ґрунту, але також і від 5 рівнів вмісту вологи. Нормативний інструментарій визначення щільності та вмісту вологи (ін. ДСТУ) передбачає тривалі лабораторні оцінки і не враховує розвиток засобів оперативної оцінки, що набули розповсюдження впродовж останніх 30–40 років. Проблемною є і оцінка колісних тракторів класу тяги 3 і вище з різними типорозмірами шин передньої та задньої осей та різним навантаженням на осі, що набувають дедалі більшого розповсюдження. Розглянуто питання використання твердості ґрунту, що пов'язана з щільністю та вмістом вологи, як оперативного показника стану ґрунту та уточнення розрахунку площі плями контакту шин з опорною поверхнею. В основу інструментарію оцінки запропоновано застосування п'єзоелектричних пенетрометрів, однак зі стандартизованим конусним наконечником під визначення т. зв. «конусного індексу CI» (cone index) та прийняття відповідного стандарту ISO як національного ДСТУ, що актуально і для інших сфер діяльності. Опрацьовано пропозиції щодо розвитку і осучаснення відповідної нормативної бази агроєкологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів зі врахуванням розвитку інструментарію оперативного оцінювання стану ґрунту та зміни площі плями контакту шин залежно від твердості ґрунту та тиску повітря в шинах і навантаження на осі.

Ключові слова: трактори, автомобілі, ущільнення ґрунту, нормативна база, інструментарій оцінки, питомий тиск, оновлення.

ВСТУП

Проблема переущільнення сільськогосподарських угідь із ростом продуктивності, а, відповідно, і ваги машинно-тракторних агрегатів та збільшення навантаження у контакті шин зі ґрунтом особливо загострилась із початком масового використання колісних тракторів класу 3,0–6,0 та належного причіпного і навісного обладнання. З появою за часів СРСР важких тракторів Т 150К та К 700/701 класів 3–5 у 1980-х роках та завдяки участі українських вчених

(акад. В.В. Медведєв та ін.) було прийнято три державні стандарти (ГОСТ), що визначали нормативну базу щодо вимог та агроєкологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів (МТА), що у 2005–2008 рр. лягли в основу національних стандартів ДСТУ [1–3]. Розвиток вимірювальної техніки й оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту та досліджень у цій сфері за останні практично 40 років з моменту формування цих ГОСТ/ДСТУ, а також відповідна нормативна практика у країнах ЄС і США обумовлює необхідність і еквівалентного

оновлення і вітчизняної нормативної бази, актуальність якої є очевидною [4; 5].

Метою цього дослідження — обґрунтувати та проаналізувати сучасні методики агроекологічної оцінки МТА в ЄС і США, а також опрацювати пропозиції щодо оперативного оцінювання оновлення вітчизняної нормативної бази.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Реалії розвитку зумовлюють необхідність оновлення нормативної бази щодо декількох аспектів. Насамперед це стосується виключного використання питомого тиску у контакті шини з ґрунтом, як єдиного показника агроекологічності конструкцій. Дослідження в Європі ще з початку 1950-х років (проф. W. Soehne) засвідчили, що за однакового значення питомого тиску в контакті — глибина і ширина розповсюдження деформації ґрунту (т. зв. «груші») істотно різняться залежно від навантаження на колесо та відповідного типорозміру шини (рис. 1) [6]. За сучасного збільшення

навантаження на колесо до 3-х і більше тонн глибина деформації ґрунту перевищує 1 м, ширина «груші» — понад 0,7 м (Dr. I.H. Volting) [7]. Відповідно за однакового значення питомого тиску у контакті з ґрунтом, але різних навантаженнях і відповідно різних типорозмірах коліс, об'єм деформації — ущільнення ґрунту буде істотно відрізнятися, що не дає підстави трактувати величину питомого тиску у контакті як єдиного і комплексного показника ущільнення ґрунту. Це підтверджується й існуючою практикою агроекологічної оцінки МТА в ЄС (J. Brunotte, R. Brandhuber) [8; 9 та ін.]. Окрім того, вона базується на оперативній оцінці фізико-механічних характеристик ґрунту за допомогою сучасних приладів вимірювання, у той час як вітчизняна нормативна база [1–3] для двох пір року (весна, осінь/літо) і відповідно різних значень щільності ґрунту визначає допустимі значення питомого тиску у досить широкому діапазоні від 40 до 210 кПа для 5 рівнів вмісту вологи і 4 рівнів щільності ґрунту, оцінка чого ґрунтується нормативно

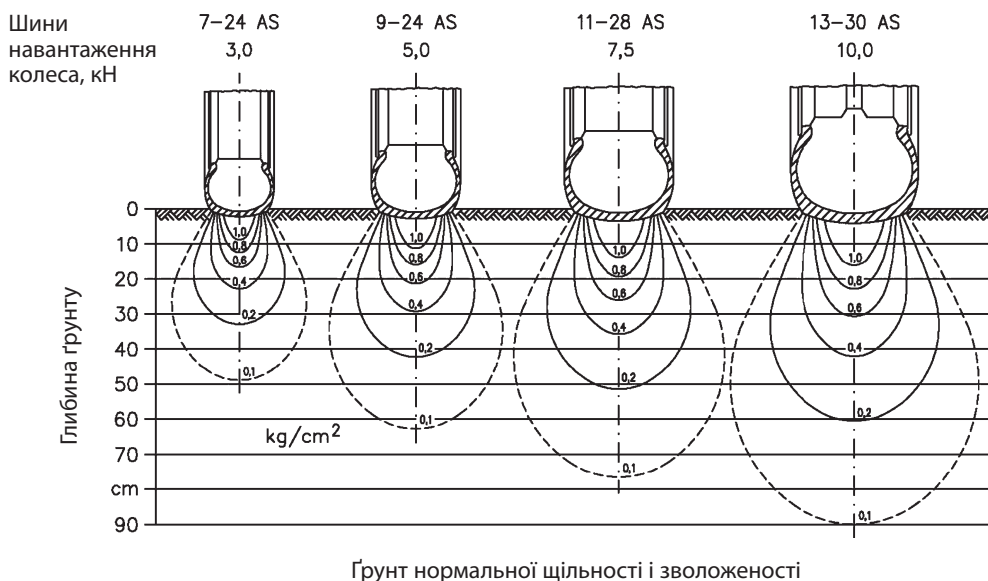


Рис. 1. Залежність навантаження на ґрунт (kg/cm^2) за однакового тиску у контакті шини з ОП від розмірності шин (7-24S ...13-30S) та відповідного навантаження на шину (3,0...10,0 kN) згідно з [6]

(згідно інших ДСТУ) на засобах і методах великою мірою трудомістких і тривалих.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В основу покладено аналіз розвитку агроєкологічної оцінки техніки в Україні та країнах ЄС, а також оцінювання можливості використання твердості ґрунту як базового показника стану ґрунту з умов оперативності експертизи та сучасного розвитку засобів вимірювальної техніки.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Сучасний розвиток засобів оперативної оцінки характеристик ґрунту докорінно змінює трудомісткість і тривалість процесу, де домінували лабораторні методи, складні для застосування у конкретних господарствах. Нормативна оцінка щільності (метод Качинського, ДСТУ 4745:2007) чи твердості ґрунту (твердомір Ревякіна, ДСТУ 5096:2008) зазвичай не використовується в ЄС і США, де віддавна, спочатку у військовій сфері [10; 11 та ін.], а наразі вже і у вітчизняних дослідженнях та на практиці в аграріїв [12] домінують пенетрометри з конусними чи циліндричними наконечниками згідно зі стандартом ISO [13] (до речі, нещодавно ухваленого і в РФ як ГОСТ-Р). Власне виробництво пенетрометрів налагоджено вже і в Україні, хоча деякі виробники визначають їх як щільномір (одиниці виміру однак у $\text{кг}/\text{см}^2$), а фактично це твердоміри. Крім того, з механіки ґрунтів очевидний кореляційний зв'язок обох параметрів (рис. 2) [14; 15].

Актуальність використання твердості ґрунту, як оперативного оціночного показника фізико-механічного стану, що практично пов'язаний зі вмістом вологи, визначено ще в 2010 р. акад. УААН В.В. Медведєвим, одним з основоположників сучасного вітчизняного ґрунтознавства [16]. До того ж звернуто увагу і на недоречність використання для оцінки твердості твердоміра Ревякіна, закладеного і у вітчизняну нормативну базу [17], через невідповідність просторової геометрії і, відповідно, опору деформації ґрунту

реаліям взаємодії з колесами/гусеницями МТА, та доцільність сучасних пенетрометрів з конусним наконечником. Останні уже набули розповсюдження у вітчизняних дослідженнях [18]. Оперативна оцінка щільності ґрунту є значно складнішою і, як правило, не є прив'язаною до емпіричних залежностей опору руху та інших характеристик взаємодії колісних машин із бездоріжжям. Враховуючи, що власне у військовій сфері значно краще (порівняно з аграрним чи лісгосподарським секторами) опрацьовано теорію руху колісних і гусеничних машин бездоріжжям — т. зв. WES — методику інженерного корпусу армії США, що бере свій початок з 1940-х років і покладена в основу відповідних методик та стандартів не тільки в НАТО, але й у багатьох зарубіжних арміях [10; 11]. Логічно і в основу аналітичних досліджень агроєкологічності МТА адаптувати відповідні напрацювання. Оцінка твердості ґрунту у цій методиці чітко регламентована — геометрія конусного наконечника, що близька до комбінації вертикальної деформації та зсуву ґрунту, характерної для взаємодії колеса з опорною поверхнею — та відповідного показника твердості, т. зв. конусного індексу CI (cone index), на базі якого і опрацьовано комплекс емпіричних залежностей, необхідних для розрахунку та імітаційного моделювання руху та взаємодії колеса з бездоріжжям (що загалом

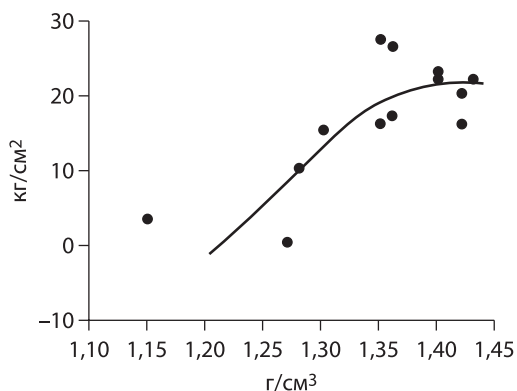


Рис. 2. Залежність між щільністю ($\text{г}/\text{см}^3$) та твердістю ($\text{кг}/\text{см}^2$) ґрунту [14; 15]

не проаналізовано так детально в аграрній сфері).

Для практичного використання і оцінки деформації/ущільнення ґрунту першочерговим є визначення площі (плями) контакту шини з ОП. У нормативній базі [3] передбачено експериментальне встановлення площі контакту шини з твердою (бетонною) опорною поверхнею зі збільшенням у 1,6–1,1 рази залежно від статичного діаметру шин (у зворотній пропорції до величини колеса) та донавантаженням маси трактора відповідно до максимальної вантажопідймальності механізму навіски або розрахункової маси імітування тягового зусилля, якщо вона є більшою. Звично, що у реаліях аграрних господарств складно уявити усю цю досить трудомістку процедуру, зокрема з розміщенням додаткового баласту по осі задніх шарнірів нижніх тяг механізму навіски. Водночас недостатньо враховується вагомий чинник впливу на формування площі контакту — зміна тиску повітря в шинах (необхідна додаткова серія замірів), різних співвідношень ширини і висоти профілю шин (різний об'єм стиснутого повітря), зрештою твердість/вміст вологи конкретного типу ґрунту. Крім того, задня вісь колісного трактора, що переважно має більше навантаження і більший діаметр коліс (зокрема у зарубіжних тракторах класів 3–6), часто є в одній колії з передньою віссю, що формує додаткове ущільнення ґрунту, яке не враховано у [3].

У наших дослідженнях найбільш досконалою і деталізованою розрахунковою залежністю визначення площі плями контакту (розвиток класичної простішої схеми) є методика НТУ «ХП» [19]:

$$F_k = \frac{\pi}{4} a_k b_k, \quad (1)$$

де a_k — велика напіввісь еліпса — довжина плями контакту; b_k — мала піввісь — ширина на плями контакту.

Передусім (за статистичними даними шин) останні можуть бути визначені як:

$$\begin{aligned} a_k &= c_3 \sqrt{D f_t - f_t^2}; \\ b_k &= 2 \sqrt{2 R_{pr} f_t - f_t^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де D — статичний діаметр колеса (без навантаження); f_t — прогин шини під дією радіального навантаження на колесо, внутрішнього тиску повітря в шині та врахування ще 3-х постійних для даної шини коефіцієнтів; R_{pr} — шини; c_3 — коефіцієнт, що залежить від розміру шини та норми шаруватості, ще додатково 4 емпіричні формули [19].

Однак слід зазначити складність використання даної залежності у практиці аграріїв, зокрема і пошуку значень 3-х емпіричних коефіцієнтів щодо різних типорозмірів шин, що не надаються виробниками і вимагають окремої оцінки.

В європейській практиці домінують менш складні розрахункові методи визначення площі плями контакту шин, зокрема на ґрунтових поверхнях, що деформуються. Істотною відмінністю є насамперед акцент на радіальні шини, що мало досліджувались на пострадянських теренах і характерні дещо іншою формою і площею контакту порівняно з ще донедавна звичними діагональними. Втім на базі розширених польових досліджень опрацьовані кореляційні залежності, що враховують вплив на площу плями контакту шини з ґрунтом типорозміру шин, навантаження на колесо, а також зміну тиску повітря в шині. Найпоширенішою (і ухваленою у певних нормативних рекомендаціях) є формула Dr. E. Diserens [20], що систематизована як для діагональних (тут т. зв. ґрунтові), так і для радіальних шин, що наразі превалюють в автомобілях і тракторах, та враховує вищезгадані чинники впливу на основі емпірично визначених коефіцієнтів регресії:

$$F_k = (aBD) + (bp_k) + (cG_k), \quad (3)$$

де G_k — навантаження на шину (Н); p_k — тиск повітря у шині (кПа, бар); a , b , c — ширина шини (мм); емпіричні коефіцієнти оцінки взаємозв'язку площі та, відповідно, типорозміру шин, тиску повітря у шинах та навантаження на колесо (табл. 1).

Загалом формула (3) домінує як у наукових дослідженнях з агроекології [21; 22 та ін.], так і в офіційних нормативних рекомендаціях [23].

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів типорозміру шин щодо площі контакту [20]

Тип шини	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Повнопрофільні	0,260	–205,944	0,566
Низькопрофільні	0,416	–457,670	0,186
Грунтові	0,420	–1120,680	0,370
Інші, невизначені	0,428	–650,215	0,221

Крім того, у низці досліджень починають використовувати і безпосередній замір площі контакту цифровими фотокамерами з розрахунком площі у вбудованому програмному забезпеченні Software Adobe Photoshop (7.0) [24].

Однак ця процедура досить трудомістка (заїзд трактора/автомобіля на поле і виважування та опускання коліс над цільним ґрунтом, застосування контрастного барвника на шині, дублювання дослідів), утім фактично тривимірну, об'ємну площу плями контакту за утворення колії фотоапарат фіксує у двомірній площині та відповідну площу.

Розрахунок середнього ефективного тиску у контакті шини з ґрунтом, як показника впливу МТА з умов агроєкології, також відрізняється від ухваленого з часів СРСР у вітчизняній практиці [3] і базується на формулі Newmark-Sohne [25; 26]:

$$\delta_k = \delta_o \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r}{z} \right)^2 + 1}} \right]^{vk}, \quad (4)$$

де δ_o – тиск безпосередньо у контакті шини з ОП, кПа; r – еквівалентний радіус площі контакту шини з ОП, см; z – глибина колії; vk – чинник концентрації. Значення останнього коливається у діапазоні від 2 до 9 залежно від типу ґрунту і вмісту вологи зі зростанням значення для м'яких ґрунтів зі зменшенням розповсюдження тиску в глибину (т. зв. ґрушні деформації ґрунту під зоною контакту шини з ОП). Переважно $vk = 5$ для м'яких ґрунтів інтенсивного землеробства, $vk = 4$ для твердішого ґрунту з меншою інтенсивністю обробітку. Очевидно, що досить суб'єктивна оцінка

vk та необхідність додаткового розрахунку глибини колії z і еквівалентного радіуса плями контакту r (що відрізняється від статичного радіуса колеса) не є сприятливими чинниками для практичного використання аграріями.

Крім того, можна констатувати, що власне вирази (3, 4) покладені в основу найбільш розповсюдженої в ЄС методики оперативної агроєкологічної оцінки використання МТА в аграрному секторі безпроблемним доступом до відповідної комп'ютеризованої програми TASC [25; 26] в Інтернет-мережі та посиланням на неї у багатьох офіційних рекомендаціях відомчих органів державної влади [8 та ін.]. Глибина колії, що необхідно заміряти для агроєкологічної оцінки, у даному випадку є найпростішою процедурою (порівняно з визначенням щільності, вологості згідно з [1] чи твердості, як у WES-методиці [10; 11]). Щоправда воно вимагає виїзду техніки безпосередньо на конкретне поле, оцінка стану ґрунту на підставі заміру твердості пенетрометром – конусний індекс CI є простішою.

У методиці НАТО – WES інженерного корпусу армії США безпосереднє виявлення плями відсутнє, але воно фігурує за визначення показника прохідності т. зв. індексу/номеру мобільності MN (англ. – mobility number) військової автотехніки під конкретний стан ґрунту, що оцінюється показником твердості CI та типорозміром шин і навантаженням [10; 11]:

$$MN_{WES} = \frac{CI \times b \times d}{G_a} \times \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0,5} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{2d}} \right), \quad (5)$$

де CI – значення конусного індексу для даної поверхні, кПа; G_a – вага автомобіля/трактора, кН; δ – деформація шини під повним номінальним навантаженням на твердій опорній поверхні, м; d – діаметр колеса із шиною, без навантаження, м; b – ширина шини у зоні протектора, м; h – висота шини, м.

Практично у (5) враховано як твердість ґрунту CI , так навантаження та типорозмір

і деформація шин — тобто весь комплекс чинників, що формують деформацію — питомий тиск на ґрунт. Однак (5) в існуючому вигляді опрацьована під звичну військову автотехніку — з однотипною односкатною ошиновкою всіх осей та практично рівномірним розподілом навантаження по осях. Не враховується і ефект доущільнення в колії за проїзду наступних після першої осей, що також є істотним [10; 11]. Окрім уже звичних типорозмірів коліс передньої та задньої осей багатьох сучасних колісних тракторів класу тяги 3...6 (а відповідно і різних навантажень та деформацій ґрунту з врахуванням послідовності дії) в аграрній сфері необхідно враховувати і реалії істотного донавантаження задньої осі від навісного чи причіпного технологічного обладнання [3–5]. Однак власне цей комплексний підхід зведення оцінки ущільнення ґрунту під конкретне значення його твердості безумовно заслуговує уваги.

Певним чином це стосується і показника потенційної прохідності військової автотехніки — т. зв. ефективного тиску на опорну поверхню — *MMP* (англ. — Mean maximum pressure), що розроблений центром науково-дослідних робіт у сфері озброєння Великої Британії RARDE (англ. — Royal Armament Research and Development Establishment UK) [10; 11], що обробовується як:

$$MMP = \frac{k \times G_a}{2 \times n \times b^{0,85} \times d^{1,15} \times \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0,5}}, \quad (6)$$

де k — коефіцієнт осей (табл. 2); n — кількість осей; b — ширина шини у зоні про-

філя протектора; δ/n — питома деформація шини на недеформованій твердій поверхні ($\delta/n = 0,18$ за номінального тиску у шині для номінальної маси і швидкості масових автомобілів для шосе, $\delta/n = 0,25$ за тиску 70% від номінального для повнопривідних позашляховиків із повною масою, 0,35 — аналогічно за зменшення тиску у шинах до 30% від номінального).

Практично показник потенційної прохідності *MMP*, що використовується у нормативній базі багатьох європейський армій НАТО, у поєднанні з замірами твердості конкретного ґрунту/бездоріжжя — значеннями конусного індексу *CI* дає можливість заздалегідь оцінити прохідність конкретної машини за відповідною шкалою співвідношення значень *CI* та *MMP*.

У такий спосіб цей підхід можна застосувати і для оцінки т. зв. агроекологічної прохідності МТА — в аспекті допустимості руху конкретної техніки для заміряного фізико-механічного стану (за оцінкою згідно *CI*) конкретного поля. Вираз (6) допомагає визначити питомий тиск у контакті шини з твердою поверхнею без проміжного розрахунку площі плями контакту на підставі статистичного узагальнення шин підвищеної прохідності єдиного типорозміру на всіх осях та рівномірного розподілу навантаження. Очевидно, що необхідне опрацювання і розвиток методики *MMP* під конкретну агротехніку з різними типорозмірами шин передньої та задньої осей та відповідним нерівномірним розподілом навантажень. У випадку використання формули (4), окрім попереднього встановлення площі плями та тиску на твердій поверхні, тиск на ґрунт визначається за до-

Таблиця 2. Значення коефіцієнта осей k для розрахунку *MMP* [11]

Кількість осей	Кількість ведучих осей					
	1	2	3	4	5	6
2	4,4	3,65				
3	5,25	4,35	3,9			
4	6,05	4,95	4,44	4,1		
5			4,97		4,32	
6		6,2	5,55	5,15		4,6

даткового розрахунку глибини колії, приведення радіуса плями контакту та вибору значення чинника концентрації в діапазоні значень від 2 до 9 (досить суб'єктивному). Суб'єктивності позбавлена оцінка навісної здатності ґрунту (як опорної поверхні) на базі стандартизованого конусного індексу CI , до значень якого прив'язані вже опрацьовані емпіричні залежності визначення коефіцієнтів опору руху, зчеплення шин, глибини колії — ущільнення, енергозатратності руху та ін. за WES-методикою [10; 11]. Не менш важливим є переважно лінійна залежність твердості від вологості ґрунту [16], що дає змогу для певного типу ґрунту оперативно оцінити допустимий (з 5 рівнів — у діапазоні від 40 до 120 кПа та від 80 до 210 кПа згідно з [1]) максимальний тиск на ґрунт ходових систем залежно від зафіксованого на глибині до 10 см значення твердості.

ВИСНОВКИ

Фактичне домінування на переважній частині аграрних угідь України більш ефективних колісних тракторів класів 3–6, що зумовлюють деградацію — переущільнення угідь [5] понад допустимі нормативною ба-

зою [1], наразі актуалізує проблему оперативної оцінки МТА з умов агроєкології та відповідного оновлення нормативної бази насамперед щодо методів і засобів оцінки та допуску до експлуатації. Враховуючи сучасний розвиток і практику конкретного використання інструментарію оцінки стану ґрунтів, очевидна доцільність введення у нормативну базу [1–3] показника твердості ґрунту (що побічно підтверджується і у [16]). На наш погляд — у формі т. зв. конусного індексу CI з використанням стандартизованих пенетрометрів та згідно з ДСТУ ISO 22476 [13]. (Останній є необхідним і з умов гармонізації нормативної бази ЗС України з НАТО). Очевидно необхідні додаткові дослідження щодо деталізації кореляційних залежностей між твердістю CI та щільністю і вологістю основних типів ґрунтів в Україні, насамперед чорноземів, що практично не досліджені у WES-методиці. Крім того, наочна необхідність і уточнення — диференціація допустимих значень питомого тиску у контакті шини з ґрунтом залежно від типорозміру шини (та відповідного навантаження (див. рис. 1)). Все це вимагає подальших досліджень та деталізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. (2006). [Чинний від 2007-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
2. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем. (2008). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
3. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. (2005). [Чинний від 2007-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
4. Медведєв, В. В. (2012). Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-тракторних агрегатів. *Вісник аграрної науки*, 10, 39–45.
5. Ребров, О. Ю. (2018). Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях, 27, 110–116.
6. Soehne, W. (1951). Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Räder-
dern sowie bei der Bodenbearbeitung. *Grundlagen der Landtechnik*, 1(1), 87–94.
7. Bolling, I. H., & Soehne, W. (1982). Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. *Landtechnik*, 37(2), 54–57.
8. Brunotte, J., Brandhuber, R., Vorderbruegge, T., & Schrader, S. (2018). Vorsorge gegen Bodenverdichtungen. In: J. Brunotte (Eds.), *Bundesanstalt fuer Landwirtschaft und Ernährung*. URL: <https://hochwasser-grafschaft.de/wp-content/uploads/2023/04/2021-Praxis-Bodenbewirtschaftung-BiLU.pdf>.
9. Demmel, M. (2014, Juli). VDI — Richtlinie 6101. *Maschineneinsatz unter Beruecksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Boden*, 39. URL: <https://www.vdi.de>.
10. Wong, Y. J. (2010). *Terramechanics and off-road vehicle engineering*. London: Butterworth.
11. Грубель, М. Г., & Крайник, Л. В. (2023). *Проходність військових автомобілів*. Київ: Професіонал.
12. Іванишин, В. В., Рудь, А. В., & Мошенко, І. О. (2017). Визначення переущільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України.

- Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, 27, 146–158.
13. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. (2012). [First edition 2012-09-15]. URL: <https://www.iso.org/standard/57728.html>.
 14. Медведев, В. В., Лындина, Т. Е., & Лактионова, Т. Н. (2004). *Плотность сложения почв*. Харків: 13 типография.
 15. Карташов, С. Г., Городецкий, Е. Ю., Дудка, В. С., & Москалюк, А. А. (2018). Вплив оптимальної щільності ґрунту для різних сільськогосподарських культур на врожайність. *Таврійський науковий вісник*, 78, 21–26.
 16. Медведев, В. В. (2010). Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку. *Вісник аграрної науки*, 4, 14–18.
 17. ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твердоміром Ревякіна. (2008). [Чинний від 2009-03-01]. Київ. Держспоживстандарт України.
 18. Цизь, І. Є., & Голий, В. О. (2024). Результати дослідження твердості ґрунту полів ДПЕДГ «Еліта». *Сільськогосподарські машини*, 50, 25–36. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1332>.
 19. Кальченко, Б. І., Ребров, О. Ю., Кожушко, А. П., Мамонтов, А. Г., & Якунін, М. Є. (2021). *Динаміка руху колісних тракторів*. Харків: В.А. Мірошніченко.
 20. Diserens, E. (2002). *Ermittlung der Reifen-Kontaktf-laechen im Feld mittels Rechenmodell*. FAT Berichte, № 613, 1–16. Schweiz.
 21. Kutzbach, H.-D., & Boettinger, S. (2014). Reifen — Reifen/Boden — Verhalten. *Jahrbuch Agrartechnik*, 1–12. URL: <http://digibib.tu-bs.de/>.
 22. Koolen, A. J., & Kupers, H. (2012). *Agricultural Soil Mechanics*. (2nd ed.). Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, Springer-Verlag.
 23. DVWK Merkblatt 234. (1998). *Bodenverdichtung — Grundlagen fuer eine nachhaltige Landwirtschaft aus bodenkundlichen Sicht*. Bonn, Komis. Verband-vertrieb GmbH.
 24. Denker, S. (2011). *Landtechnische Methoden zur Erfassung von Bodenverdichtungen*. [Doctoral dissertation, Georg-August Universitaet, Goettingen, BRD]. PQDT Open <http://dx.doi.org/10.53846/goediss-1874>.
 25. Diserens, E., Battiato, A., & Sartori, L. (2014). Soil compaction, soil shearing and fuel consumption: TASC V3.0 — A practical tool for decision-making in farming. *Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering*, Zürich.
 26. Diserens, E., & Spiess, E. (2005). TASC — eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. *Agrarforschung*, 12(1), 22–29.

Стаття надійшла до редакції журналу 01.08.2025

ABSTRACT

Drebot O., Melnykov O. Environmental and economic assessment of agricultural systems and products: problems and their solutions. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 6–18.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: alexej.mln@gmail.com

The article examines the theoretical and methodological grounds of the ecological and economic assessment of agricultural systems and their products. The article considers such methods of ecological and economic assessment as ecological and economic analysis (EEA) and life cycle assessment (LCA). An improvement of the method of ecological and economic assessment is proposed, which would take into account the integral economic effect – the algebraic sum of the ecological, medical and biological, social, energetic, technological, economic effects of organic land use and the corresponding effects and losses of traditional land use. The main indicators of the analysis of the efficiency of land use within the framework of the control area method when comparing organic and traditional land use systems are highlighted. The main problem when comparing agricultural systems during EEA is the correct determination of the magnitude of the effect and loss of agricultural enterprises, since all pollution processes are difficult to take into account. As a rule, only part that can be seen and evaluated is subject to economic assessment, therefore the calculated costs are always less than the real ones, and do not take into account environmental, social, medical and biological damages. These damages are measured, at best, only on a regional or country scale, but they are not reflected in the activities of an individual enterprise and are not taken into account in the cost of production, and accordingly in the retail price paid by the consumer. This is confirmed by leading world studies. Analyzing statistical data, it was found that the costs incurred by agricultural enterprises of Ukraine for environmental protection do not cover even a small part of the environmental damages they have caused. Thus, the total amount of current environmental protection costs in Ukrainian agriculture in 2024 amounted to UAH 122.04 million, including current costs for the protection and restoration of soils, groundwater and surface waters – only UAH 13.77 million. The amount of capital investments in environmental protection in agriculture amounted to UAH 45.05 million, of which UAH 4.98 million were capital investments in the protection and restoration of soils, groundwater and surface waters. At the same time, the state of use and protection of soil resources in the country is characterized as unsatisfactory and tends to deteriorate. The main shortcomings and reasons for the unreliability of the life cycle assessment methodology in the comparative analysis of organic

and traditional land use are considered. To eliminate them, it is proposed to use functional units based on both the quantity of product and area (territory), take into account the loss of biodiversity, land degradation, the impact of pesticides, including on product quality and human health, social consequences, and supplement LCA with indicators of ecosystem services that assess the supporting, regulating and cultural services provided by the system.

Key words: sustainable development, competitiveness, profitability increasing, environmentally friendly agricultural land use, agricultural technologies, ecological state, quality of organic products, greening.

Yakovenko D.^{1,3}, Boroday V.^{1,2} Global market of biological products: trends, challenges, and future outlook. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 19–28.

¹Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

³BTU-Center LLC

e-mail: veraboro@gmail.com

The biologicals market has experienced remarkable growth, with global valuations exceeding USD 10 billion in 2023 and compound annual growth rates (CAGR) of 12–16% across product categories. The biopesticide segment alone demonstrates a CAGR of 16.1% for 2019–2025, while the U.S. biofertilizer market is projected to surpass USD 1 billion by 2029. However, significant barriers persist in translating scientific advances into commercial success. Regulatory frameworks, particularly in developed markets, impose complex, lengthy approval processes that disproportionately affect small and medium-sized enterprises (SMEs). The European Union's dual-tier authorization system, requiring both active substance approval and product-specific registration, can extend market entry timelines to nearly a decade, effectively excluding innovative SMEs from key markets. Biological products – biopesticides, biostimulants, and biofertilizers – are increasingly seen as key tools for sustainable development of the agricultural sector, allowing reducing the use of chemicals, improving soil condition, and increasing crop resistance to biotic and abiotic factors. The relevance of the study is due to political strategies, in particular such as the European Union's Farm to Fork Strategy, which mandates a 50% reduction in chemical pesticides and 20–30% reduction in fertilizers by 2030. A comprehensive meta-analysis of scientific publications from 2020–2024, industry analytical reports, and regulatory documents defining the rules for registering biological products in the EU and other jurisdictions was conducted.

Meta-analytical evidence demonstrates significant agronomic benefits, biofertilizers show 12–25% yield increases, while biostimulants enhance nutrient use efficiency by 9–15% and improve stress tolerance. However, the complexity and duration of registration procedures for biopesticides, the limitation of the list of permitted microorganisms in EU legislation for biostimulants, and the lack of unified methods for assessing «soil health» are currently the main obstacles to the development of the biopreparations market. The greatest difficulties are experienced by small and medium-sized enterprises (SMEs), which do not have the resources to undergo multi-year regulatory procedures, which contribute to market concentration in favor of transnational corporations. To achieve sustainable development goals, it is necessary to reform regulatory systems, harmonize international standards and implement risk-proportionate requirements. Future research should prioritize several critical gaps. Among them the systematic meta-analyses examining moderators of biological product efficacy – particularly soil properties, climate variables, and management interactions – would enable environment-specific recommendations. In addition, economic analyses comparing total cost-of-ownership for biological versus conventional input systems, accounting for soil health improvements and long-term sustainability benefits, would strengthen adoption business cases. Moreover, comparative regulatory analyses examining approval efficiency, safety outcomes, and innovation rates across different jurisdictional frameworks would inform evidence-based policy reform. Finally, longitudinal studies documenting soil microbiome shifts, carbon sequestration, and ecosystem service provision under biological product regimes would quantify sustainability benefits beyond immediate yield effects.

Key words: biopesticides, biostimulants, biofertilizers, soil health, Green Deal, Farm to Fork Strategy, small and medium enterprises (SMEs), innovation barriers.

Konishchuk V.¹, Khomiak I.², Shumyhai I.¹, Martynenko V.¹ Invasive potential of *Nicandra physalodes* (L.) Gaertn. in the territory of Ukraine. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 29–35.

¹ *Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS*

² *Zhytomyr Ivan Franko State University*
e-mail: khomyakivan@gmail.com

The article is devoted to determining the invasive potential of *Nicandra physalodes* in the territory of Ukraine. The aim of this study is to perform an ecological and coenotic analysis of *Nicandra physalodes* (L.) Gaertn. in localities situated at the boundary between Central Polissia and the Right-Bank Forest-Steppe, as well as to assess the species' invasive potential within its current natural and geographical range. To achieve this goal, we set the following objectives: to

classify the plant communities of the *N. physalodes* localities according to the Braun-Blanquet phytosociological system; to determine the coenotic affiliation of the species within the studied region; to identify the ecological spectrum of *N. physalodes* using synphytoindication methods; and to evaluate its invasive potential under the specific environmental conditions of the study area. The species was mainly recorded on cultivated plots with potato and onion crops, as well as on fallows of the first and second years after cessation of cultivation. The phytocoenoses with the participation of *Nicandra physalodes* belong to one class, three orders, four alliances, and four associations, among which we identified the following variants: *Ambrosio artemisiifoliae*–*Chenopodietum albi* var. *Nicandra physalodes*, *Echinochloo*–*Setarietum* var. *Nicandra physalodes*, *Portulacetum oleraceae* var. *Nicandra physalodes*, and *Erigeronto*–*Lactucetum serriolae* var. *Nicandra physalodes*. The vegetation of these communities is characterized by low floristic diversity (7–11 species) and the dominance of segetal and ruderal species typical of the classes *Stellarietetea mediae* and *Plantaginietea majoris*. According to synphytoindication analysis, the habitats of *N. physalodes* are characterized as submesophytic–mesophytic, subacidophilous–neutrophilous, mesotrophic–semi-eutrophic, with the narrowest ecological amplitudes for perennial moisture regime (6.09%) and soil aeration (6.93%), and the widest for moisture variability (15.91%) and nitrogen compound content (11.82%). The microclimatic conditions of *N. physalodes* localities are mesothermal and subcontinental, with an eughemerobic level of anthropogenic transformation (11–11.5 points according to the Didukh–Khomyak scale). It was found that systemic herbicides of total action based on N-(phosphonomethyl) glycine showed low efficiency against *N. physalodes*, indicating a certain level of resistance and high ecological plasticity of the species. Such adaptability, together with broad ecological tolerance and high reproductive capacity, suggests that *N. physalodes* possesses a considerable invasive potential and the ability to expand its range throughout Ukraine, especially under current climate change trends and intensive agricultural land use. Therefore, the species should be regarded as a potentially dangerous invasive element in agroecosystems. Continuous monitoring of *N. physalodes* populations within agricultural landscapes and adjacent disturbed habitats is recommended in order to prevent its further spread and establishment in natural or semi-natural ecosystems.

Key words: invasive transformer species, seed weeds, anthropogenic transformation, climate change.

Mudrak O.¹, Antonyuk Yu.², Mudrak H.³, Shcherbliuk A.², Demyanyuk O.² Ecological features of vascular plants flora of the Karmeliukove Podillia National Nature Park. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 36–46.

¹Public higher educational establishment
«Vinnytsia academy of continuing education»

²Institute of agroecology and environmental
management of NAAS

³Vinnytsia national agrarian university
e-mail: ov_mudrak@ukr.net

In this article for the first time, we analyzed the taxonomic, floristic, ecological-coenotic and chorological structure of the vascular plants of the National Nature Park «Karmeliukove Podillia», which is located in the territory of the Haisyn district of the Vinnytsia region within the administrative boundaries of the Chechelnytska settlement, Olhopil village and Obodiv village territorial communities. The territory of the park combines unique phytocenoses of Eastern Podillia, the study of which allows us to determine the patterns of flora formation for planning measures to protect ecosystems. We found that the flora includes 668 species of higher vascular plants, of which the leading place belongs to the families *Asteraceae*, *Poaceae*, *Fabaceae*, *Rosaceae*, *Lamiaceae*, *Apiaceae*, *Brassicaceae*. The ratio of the leading families *Asteraceae*, *Poaceae*, *Fabaceae* is 5.7:3.5:2.9. According to Raunkier's classification, it was determined, that hemicryptophytes (351 species) prevail in the park. A significant proportion is made up of therophytes (120 species) and geophytes (78 species). The smallest number of species is represented by chamaephytes (7 species), species immersed in water (3 species) and with floating leaves (3 species). According to the main biomorph, perennial polycarpic grasses prevail (60%), annual and biennial monocarpic grasses make up 27.4%. It was established, that the ecological and coenotic structure is characterized by species diversity according to the main (forest 18%, ruderal 13%, steppe 4.5%, meadow 3%) and transitional cenomorph (forest-meadow 7.6%, forest-steppe 4.5%, meadow-forest 4.2%, ruderal-forest 3.1% and forest ruderal 2.8%). It was noted, that in terms of chorological aspect, the flora of the national park is characterized by the predominance of European, Eurasian and Euro-Siberian species. It is noted that the flora contains plants endemic as *Carlina onopordifolia* Bess et Szaf. Kulcz. et Pawl., *Glechoma hirsuta* Waldst. & Kit., *Salvia nutans* L., *Stachystrans silvanica* L., *Lactuca chaixii* Vill., *Lathyrus pannonicus* (Jacq.) Garcke, *Lotus ucrainicus* Klokov, *Asperula cynanchica* L., *Chamaecytisus podolicus* (Blocki) Klaskova and *Linum hirsutum* L., which further emphasizes the uniqueness of the formed flora. A number of measures are outlined that need to be implemented within the national nature park to preserve and protect forest, meadow-steppe and wetland ecosystems.

Key words: species diversity, species protection, ecological-coenotic structure, chorological analysis, ecological network, Eastern Podillia.

Chornobrov O. Assessing ecological impact of climate change on forest ecosystems. Agroecological journal. 2025. No 4. P. 47–56.

*Institute of Agroecology and Environmental
Management of NAAS*

e-mail: oleksandr.chornobrov@ukr.net.

Climatic observations prove the existence of an increasing global temperature trend on the globe, which is caused by greenhouse gas emissions into the atmosphere. The article analyzes the main ecological impacts of climate change on forest ecosystems of temperate climate zone focusing on temperate continental bioclimatic region of Europe. The research was carried out by analyzing and synthesizing literary sources and the Internet resources. Direct impacts of climate change on forests arise from an increase in CO₂ concentration, changes in temperature, amount and precipitation regime. Indirect impacts are the result of the interaction between changes in climatic parameters, abiotic and biotic factors. The projected increase in CO₂ concentration may stimulate increased growth and productivity of forest stands. Rising temperatures will cause changes in species ranges, forest species composition, and competition between tree species. In temperate forests, without increasing precipitation in summer and subsequent droughts may limit forest productivity. In some regions, extreme weather events (including prolonged droughts) will increase and have negative impacts on forest ecosystems. In Ukraine, climate change will significantly narrow the optimal growth zone for two main forest-forming species – Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and English oak (*Quercus robur* L.) in terms of climate humidity. Climate change can increase the frequency and intensity of natural disturbances caused by abiotic factors (windstorms, windthrows and snowstorms, fires in ecosystems), as well as increase the vulnerability of forests to them. It is generally considered that climate change can increase the intensity of pest outbreaks and promote the successful colonization of fungal pathogens. Most of these impacts will lead to increased damage to forests, but the interaction between abiotic factors must be taken into account. Climate change is one of the greatest current and future threats to forest biodiversity, as it directly affects both species and their habitats. Studying the ecological impacts of climate change is necessary to develop strategies for adapting to it and mitigating its negative consequences.

Key words: forest stands, tree species, range, abiotic and biotic factors, vulnerability, stability, biodiversity.

Moroz V.¹, Dushko P.² State of pine stands in Zhytomyr Polissia under the influence of insect pests and climatic factors. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 57–69.

¹West Ukrainian National University

²*Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS*

e-mail: vera_moroz@ukr.net

Increasing damage to pine forests in the Zhytomyr Polissia region due to the impact of insect pests and climate change requires the development of effective protection measures to ensure the sustainable development of forest ecosystems. The aim of the study was to investigate the impact of insect pests on pine stands under conditions of climate change, in particular taking into account solar activity and hydrothermal conditions, in order to improve forest protection strategies. To achieve this goal, field surveys, climate change analysis, assessment of the spread of phytophagous insects and stem pests, as well as statistical analysis using methods of counting pine silkworm (*Dendrolimus pini* L.) caterpillars with sticky tapes and Barber traps were carried out. Correlation and lag analysis of climate indicators for 2019–2024 was performed. The results showed a 73% reduction in the area of affected forests, from 951 ha in 2019 to 255 ha in 2024. The main pests, in particular the common pine sawfly (*Diprion pini* L.), the pine bark beetle (*Aradus cinnamomeus* Panzer), and the pine silkworm (*Dendrolimus pini* L.), were characterized by a decrease in the number of infested areas. However, pine moth infestations remained relatively stable, indicating the need for continuous monitoring and biological control. The influence of astrophysical and climatic factors on the intensity of infestations was studied. A decrease in solar activity (Wolf number <50) is associated with a 15–20% increase in forest infestation one year after the decline in solar activity. A decrease in the hydrothermal coefficient ($HTC < 1.1$) contributes to drought and an increase in the number of pests. Such biological products as «Boverin» and «Metarizin» have shown high efficiency, reducing the number of *D. pini* caterpillars by 54–72% and forest productivity losses by 30–40%, providing economic benefits and environmental safety. Recommendations have been developed for regular monitoring, the use of biological products, sanitary felling, and forecasting pest outbreaks based on the Wolf number and HTC. The results are of practical importance for the sustainable management of forests in Zhytomyr Polissia region and can be adapted for other regions of Ukraine. As a result of the study, recommendations were developed for regular monitoring of forest plantations, using biological products, and aerial spraying of large areas with infestations. Considering solar activity forecasts improves forest protection during critical times. The results of the study have practical significance for sustainable forest management, particularly in the context of climate change, and can be adapted for use in other forest regions of Ukraine.

Key words: air temperature, precipitation, biological products, solar activity, Wolf number, hydrothermal coefficient.

Kovaliv O. Organizational and economic principles of balanced use of natural objects in the agricultural sector of Ukraine. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 70–79.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: okovaliv@ukr.net

The specific and relevant organizational and economic principles of balanced nature management, which are based on the laws of nature and society and are consistent with the constitutionally motivated imperatives of land relations and nature management in Ukraine, are substantiated. Based on the previously developed new ideas, visions and approaches to the complex modeling and functioning of balanced use of natural objects, especially in the agricultural sphere, the functionality of cognitive land economics in Ukraine has been discovered for the first time as a new direction in economic science, since the system is based on unique fundamental constitutional and land imperatives that are inherent only to the Ukrainian people. It has been scientifically proven that the constitutional right of the Ukrainian people to land and its natural resources as natural objects requires the immediate implementation of this right de facto. The primary need for accounting and inclusion in the national balance of renewable and exhaustible resources as available wealth, which together constitute only a tenth of all and are estimated in the total monetary equivalent of over 9 trillion US dollars, is substantiated. The obtained new knowledge has significant scientific value, as well as real practical economic and legal interest of all segments of the Ukrainian community. It is – to establish law and order in all segments of economic activity related to land and natural resource use on the «internal front», without which victory over the external enemy is also unthinkable in the conditions of an existential war against Ukrainians. It is proven that every citizen (from birth to death), who is alive and has only one citizenship (the requirement of Article 4 of the Civil Code) will have in the authorized capital of the nation an equal share of a citizen of Ukraine (in our case, for a start, over 200 thousand US dollars), which will be recorded in monetary equivalent on a special personal account of each. On this basis, the lifelong personal economic fund of every citizen of Ukraine will be replenished monthly – for their own development and growth...

Key words: constitutional law, cognitive land economics, cadastre, soils, research work, nature management.

Volkogon V., Dimova S., Volkogon K., Sydorenko V., Shevchenko L., Sasina T. Direction of mineralization ↔ synthesis processes of organic matter in chernozem leached under different systems of agricultural crop fertilization. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 80–95.

*Institute of Agricultural Microbiology
and Agro-Industrial Production NAAS
e-mail: volkogan@ukr.net*

To determine changes in the direction of mineralization $\leftrightarrow$ synthesis processes of organic matter in the soil when growing crops under mineral and organo-mineral fertilization systems is the purpose of the work. We used such methods as field experiment (stationary field experiment on leached black soil), field chambers, gas chromatographic and calculation. The aim was to determine the specific losses of nitrous oxide ($\text{g N-N}_2\text{O/kg CO}_2/\text{ha}^{-1}$) and establish the direction of the processes of mineralization $\leftrightarrow$ synthesis of organic matter by comparing the indicators with the values of the «reference» soil (soil under fallow, located next to the experiment). Since the processes of transformation of nitrogen and carbon compounds in the soil are closely related, the dynamics determined the intensity of N_2O and CO_2 emissions from the soil during the cultivation of crops in crop rotation (potato $\rightarrow$ spring barley $\rightarrow$ peas $\rightarrow$ winter wheat) with compliance with mineral and organo-mineral fertilization systems. Emission specific nitrogen losses ($\text{g N-N}_2\text{O/kg C-CO}_2/\text{ha}^{-1}$) were calculated depending on the studied fertilization systems. In addition, the indices of mineralization $\leftrightarrow$ synthesis of soil organic matter were calculated by comparing the obtained indicators with the values of fallow. With the systematic use of only mineral fertilizers, the dominance of mineralization processes was noted, the intensity of which increased with increasing fertilizer doses. When mineral fertilizers were applied against the background of direct action and after-effect of 5 t/ha^{-1} of straw ($\text{C/N ratio} = 76.9$) with post-harvest green manure of lupine ($\sim 2.6 \text{ t/ha}^{-1}$ of dry aboveground mass + 2.8 t/ha^{-1} of roots with a C/N ratio of ~ 16.2), the direction of the studied processes changed, since the fraction of mineral nitrogen not absorbed by plants was metabolically transformed by microorganisms into organic compounds. When applying low doses of mineral fertilizers ($\text{N}_{30-40}\text{P}_{30-40}\text{K}_{30-40}$ depending on the crop) against the background of organic matter in the soil, synthetic processes dominated, while at medium doses ($\text{N}_{60-80}\text{P}_{60-80}\text{K}_{60-80}$ depending on the crop) the processes of mineralization and synthesis of organic matter were balanced. Although the application of high doses of mineral fertilizers ($\text{N}_{90-120}\text{P}_{90-120}\text{K}_{90-120}$ depending on the crop) on the background of straw and green manure improved the ecological situation compared to the indicators obtained when applying fertilizers in pure form, it did not provide optimal indicators (mineralization processes prevailed in the soil). The effect of straw with green manure on the optimization of the studied processes faded over time, but was observed for three years. To ensure the dominance of synthetic processes in leached chernozem, part of mineral nitrogen fertilizers that is not absorbed by plants must be metabolically transformed by microorganisms into organic compounds by intro-

ducing exogenous carbon sources into the soil (for example, straw, sideral biomass). An increase in the dose of mineral nitrogen in crop cultivation technologies should be accompanied by an increased supply of fresh organic matter to the soil with a wide carbon/nitrogen ratio. Determination of specific nitrogen losses ($\text{g N-N}_2\text{O/kg C-CO}_2$) and calculation of the coefficients of mineralization $\leftrightarrow$ synthesis of soil organic matter in the practice of monitoring studies of the state of soils of agroecosystems may be promising for obtaining operational information and making the necessary management decisions.

Key words: N_2O and CO_2 emissions, soil organic matter, mineral nitrogen, straw, green manure.

Hryshchenko O.¹, Palamarchuk R.¹, Shliakhtunov D.¹, Zapasnyy V.¹, Krupko H.² Soil contamination with mobile forms of heavy metals as a result of hostilities in the territory of Mykolaiv region. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 96–107.

¹ *State Institution «Soils Protection Institute of Ukraine»*

² *Rivne Regional Center of the State Institution «Soils Protection Institute of Ukraine»*

e-mail: grischenkoel@ukr.net

The article highlights the peculiarities of land contamination with mobile heavy metal compounds as a result of hostilities. The object of research was 19 collective soil samples taken in five locations on the territory of Pervomaiska TG of Mykolaiv district and Snigurivska TG of Bashtanka district of Mykolaiv region. Three locations included agricultural lands that were under constant shelling during hostilities, two – non-agricultural lands – a crater on the site of a mineral fertilizer warehouse destroyed by an explosion and a line of defensive structures. As a result of the agrochemical and ecological-toxicological survey, compared to the control indicators of pre-war monitoring of these territories, an extremely high (6.5–11.2 times) increase in the concentration of mobile manganese compounds in all 12 selected soil samples was found. A significant increase in the content of mobile cadmium compounds in 9, copper in 6, cobalt in 9, lead in 2, and zinc in 4 samples. The level of contamination of all surveyed agricultural lands locations with mobile manganese compounds is weak, but with cadmium it is moderate. Significant variability was recorded in the level of contamination with lead (five samples demonstrated weak contamination, one each – moderate, medium and very high, four – no contamination) and cobalt (one sample – very high contamination level, two each – medium and high, three each – weak and moderate, one location has no contamination). There is no contamination with mobile compounds of zinc, nickel, chromium, copper (except for one location, where slight contamination was recorded). No exceeding of the maximum permissible concentration for the content of mobile compounds

of trace elements were established. The studied territories can be used for their intended purpose only after reclamation measures. A mandatory measure is the introduction of constant monitoring of the ecological and toxicological state of the soil and grown agricultural products. The surveyed non-agricultural territories are characterized by an average level of contamination with cadmium, weak and moderate levels with copper, weak, moderate and medium levels with nickel, high and very high levels with cobalt. The absence of contamination with mobile compounds of chromium, manganese and zinc was established. The content of mobile lead compounds exceeds the maximum permissible concentration in all taken in these areas soil samples by 1.2–2.9 times. Remediation measures should be carried out on these lands to prevent the spread of heavy metals.

Key words: agrochemical survey, military operations, maximum permissible concentration, iron, cadmium, cobalt, manganese, copper, nickel, chromium, pollution level, lead, zinc.

Stetsiuk O., Kyrychenko L., Lyubchenko V., Shtanko I. Preventing deflationary processes in hop plantations in Polissia. *Agroecological journal*. 2025. No. 4. P. 108–117.

Institute of Agriculture of Polissya NAAS

e-mail: alex.stecyuk@ukr.net

Perennial hop plantations are influenced by changes in agroclimatic conditions to the same extent as other agrobiocenoses, which requires new methodological approaches to existing technological processes and their adaptation taking into account the weather and climatic factors of the hop growing season. Moisture deficiency contributes to the drying out of the topsoil, especially in the transitional spring-summer period, when the agroecosystem hop plantations are not yet protected by vegetation. Most hop plantations and hop plantings are located on light sod-podzolic soils of Polissia, which are deflation-dangerous under such conditions. The article focuses on the results of research into individual elements of the technological process of hop cultivation that prevent wind erosion in the agroecosystem. hop plantations, as well as their impact on the productivity and quality of hop raw materials. Research methods include field experiments, laboratory studies, meteorological studies, and statistical analysis methods. It has been established that in the hop plantation agroecosystem, the determining parameters of soil anti-deflation resistance are the degree of coverage of hop plantation row spacing with green manure crops during the drought period and soil moisture, which reduces the destruction of wind-resistant aggregates to erosion hazardous sizes of less than 1 mm. On average, over the three years of research, the probable and calculated soil losses on variants of conventional technology due to deflation reached 4.76–4.84 t/ha, soil protection agricultural technologies almost 100%

prevented these negative processes for the hop plantations agroecosystem. The productivity of hop cones indicates that the traditional cultivation technology had practically no advantage over the variants of soil protection. While the cone yield under the traditional cultivation technology was 1.63–1.72 t/ha, the soil-protective cultivation technology realised itself in the range of 1.53–1.67 t/ha of hop cones. Seeding hop planting row spacing with a diaper-oat mixture made it possible to obtain the same cone productivity as humus application within 40 t/ha every two years. Compared to the absolute control (no fertilizer option), we observe a significant yield advantage for both the traditional and soil protection technologies. On average, for three years, the advantage in the accumulation of alpha acids is observed in the variants of soil protection agrotechnologies, compared to the traditional one, the increase was 0.3 absolute percent. Thus, the effective functioning of the agrobiocenosis of hop plantations can be ensured by the use of new environmentally safe soil protection agricultural practices based on maintaining row spacing under siderable crops and introducing them into the soil superabsorbent moisture Teravet. Agrobiological methods of soil maintenance allow to reduce the anthropogenic load on the hop ecosystem, maintaining stable productivity, support the natural process of soil regeneration, prevent deflationary and dangerous processes on light sod-podzolic soils, and in terms of productivity of the resulting hop raw material, they approach traditional technology.

Key words: hops, soil protection technology, green manure, soil, Teravet absorbent.

Palamarchuk R.¹, Hryshchenko O.¹, Yatsenko Yu.¹, Nechytailo V.², Minenko O.² Spatial variability of mobile cadmium compounds content in the soils of Kharkiv region under military influence. *Agroecological journal*. 2025. No. 4. P. 118–128.

¹ *State Institution «Soils Protection Institute of Ukraine»*

² *Northeastern Interregional Center of the State Institution «Institute of Soil Protection of Ukraine»*

e-mail: grischenkoel@ukr.net

The study analyzed the results of agrochemical surveys of agricultural lands affected by military actions in the Izium, Kharkiv, and Chuhuiv districts of Kharkiv region. The soils of the surveyed sites are characterized with high and medium natural fertility, and some are classified as particularly valuable soils of the Steppe Left-Bank Province. The results of the research revealed a significant increase in the content of mobile cadmium compounds in the soils of the surveyed sites by 3.2 times compared to the pre-war level (0.05 mg/kg). The spatial heterogeneity of cadmium distribution reflects both the intensity of military actions and the influence of local soil properties on the

migration of heavy metals. It was found that among the 16 surveyed sites, only one, with an average content of mobile cadmium compounds of 0.07 mg/kg, can be classified as uncontaminated. Three sites exhibit a moderate level of contamination (0.20 mg/kg), while twelve sites have a low level (0.14–0.17 mg/kg). The area distribution by contamination level showed that 69.1% of the surveyed lands are characterized by a low level, 24.0% by a moderate level, and 6.9% remain conditionally clean, without detectable contamination by mobile cadmium compounds. Exceedances of the maximum permissible concentration (0.7 mg/kg) were not recorded, indicating a relatively safe level of contamination and no ecological risk for further agricultural use. The spatial heterogeneity of cadmium content indicates localized accumulation influenced by anthropogenic sources. The main factors of this influence are active military actions—detonation of munitions, combustion of military equipment, destruction of engineering structures and industrial facilities containing cadmium alloys and protective coatings. Although the current level of contamination does not pose an immediate ecological threat, the results emphasize the necessity of systematic monitoring to track the dynamics of cadmium migration over time and across spatial scales, especially in areas with localized contamination hotspots.

Key words: agrochemical survey, maximum permissible concentration, soil, military actions, monitoring, contamination level.

Sadovyi O., Mardziavko V., Rudenko A. Optimization of the spectral composition of phytolamps in closed soil to improve food stability in Ukraine in the context of postwar recovery. *Agroecological journal*. 2025. No. 4. P. 129–135.

Mykolaiv National Agrarian University
email: sadovyuyos@mnaeu.edu.ua

The article presents the results of an experimental study of the influence of the spectral composition of LED lighting on the growth, development and productivity of vegetable crops in closed ground. The relevance of the topic is due to significant yield losses in open ground, due to climatic risks, soil degradation and instability of weather conditions, as well as the reduction of sown areas due to military operations. These factors reduce the efficiency of traditional agriculture, limiting the possibility of stable provision of the population with high-quality vegetables. In the conditions of a controlled greenhouse environment, the risks of losses can be minimized, especially when using LED phytolamps with an adaptive spectrum, which allows optimizing the photosynthetic activity of plants and increasing the efficiency of energy use. The aim of the study was to determine the optimal spectral parameters of lighting to increase the productivity of tomato (*Solanum lycopersicum*, variety «Chumak») and lettuce (*Lactuca sativa*, variety «Odesa 75»). The experiment was conducted in a training

greenhouse using 100 W LED phytolamps in four modes: full spectrum (control), predominantly blue, predominantly red, and combined with the inclusion of infrared (IR) and ultraviolet (UV) radiation. During eight weeks of vegetation, weekly measurements of plant height, leaf surface area, biomass mass, chlorophyll content, number of flowers, fruit mass, and yield were performed. Statistical processing was performed using the one-way analysis of variance (ANOVA) method with a significance level of $p \leq 0.05$. The most effective was the combined spectrum, which provided the maximum yield of tomatoes (4.9 kg/m²) and lettuce biomass (186 g/plant), and also promoted the harmonious development of vegetative and generative organs. The blue spectrum stimulated the accumulation of chlorophyll, but had a limited effect on generative processes, while the red spectrum enhanced fruiting, but reduced vegetative growth. The results obtained confirm the feasibility of using adaptive LED phytosystems with a controlled spectrum as an innovative and energy-efficient tool for increasing the productivity of vegetable crops in closed soil. This is of particular importance for the post-war restoration of Ukraine's agricultural sector and strengthening the country's food security.

Key words: survey lighting, LED phytolamp, limited resources, vegetable crops, adaptive agricultural production, photosynthesis, greenhouse cultivation.

Lazariev M., Yermolenko S. Radiological aspects of the application of local fertilizers in a radioactively contaminated territory. *Agroecological journal*. 2025. No. 4. P. 136–142.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
e-mail: laz_rev@i.ua

In light of the prevailing circumstances, it is imperative to explore methodologies for enhancing the nation's resilience, with a particular focus on Ukraine's food security. This undertaking necessitates the utilisation of cost-effective resources, including the reintegration of radioactive contaminated land into agricultural production. This land, which was previously abandoned following the Chernobyl incident in accordance with the Law of Ukraine, holds potential for repurposing. The issue of rehabilitating areas contaminated with radionuclides began to be considered almost immediately following the initial assessment of the extent of radioactive contamination. As early as the 1990s, studies were undertaken to ascertain the feasibility of cultivating high-quality agricultural produce in regions characterised by variable degrees of radioactive contamination and distinct soil characteristics. It is evident that mineral fertilizers, most notably potash and calcium fertilizers, have been instrumental in mitigating the radioactivity levels of plant products. In view of the ongoing military operations, the temporary loss of territory

(including agricultural land), and the rising prices of mineral fertilizers, the search for and scientific justification of the use of more affordable means that can influence the transfer of radionuclides from the soil to plants is becoming particularly important. One of the measures that assists the private sector in maintaining soil fertility on household plots is the utilisation of ash produced following the incineration of wood and rural stoves. The present study is an analysis of monitoring studies, which sought to determine the level of radioactive contamination of wood ash formed in private households in areas contaminated with radionuclides. In addition, the study assessed the impact of ash application to the soil on the radiological quality of potatoes. The present study analyses available information and new data on the radioactive contamination of wood ash after burning wood for domestic heating purposes during the winter months. The ash produced in the spring is applied to the soil for the cultivation of various crops, primarily potatoes. Research has demonstrated that, in numerous instances, the degree of radioactive contamination of household ash has been found to approach, and in some cases, exceed the criteria for categorizing it as radioactive waste.

Key words: radioactive cesium (^{137}Cs), wood ash, density of radioactive contamination, specific activity of ^{137}Cs , potato.

Demyanyuk O., Poltava O. Foliar fertilization as an effective method to increase the productivity of agricultural crops. *Agroecological journal*. 2025. No. 4. P. 143–150.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: demolena@ukr.net

Under the growing challenges of food security and the negative impacts of climate change, enhancing the efficiency of agricultural production — particularly through the optimization of plant nutrition — has become of strategic importance. One of the effective approaches is foliar feeding, which ensures the rapid and efficient uptake of nutrients by plants, especially during periods when nutrient absorption from the soil is limited. The aim of this study is to summarize scientific approaches and practical experiences related to the use of foliar fertilization as an effective method to increase the yield of major cereal crops (wheat, maize, rice, rye, barley, oats, and millet). A bibliographic search and content analysis of publications from international and national scientific databases were carried out, and comparative as well as analytical–review methods were applied. The results of the study showed that foliar fertilization has been used worldwide for quite a long time and is now considered an effective technological practice for sustainable agriculture. This method of supplying plants with essential nutrients is particularly important for cereal crops (wheat, maize, rice, barley, rye, oats, and millet),

as it contributes to higher yields and better-quality production. It is well known that nutrient deficiencies during the early growth stages or in critical periods of development disrupt key physiological and biochemical processes, determining the level of productivity and yield quality. Fertilization during these critical growth phases stimulates physiological and biochemical processes, increases chlorophyll content, enhances photosynthetic activity, promotes the accumulation of proteins and carbohydrates, and improves yield structure and productivity components. The use of complex fertilizers, micronutrients (Zn, B, Mn, Cu, Si, S, etc.), as well as organo-mineral and nanoform fertilizers, has proven particularly effective, as they enhance nutrient uptake and plant tolerance to drought and salinity. Foliar fertilization also reduces environmental pressure on agroecosystems by minimizing nitrogen losses, improving nutrient use efficiency, and decreasing the risk of soil contamination. Thus, this method of fertilizer application represents an integral element of integrated plant nutrition management and a crucial component of sustainable agriculture aimed at increasing crop productivity, preserving soil fertility, and ensuring global food security.

Key words: plant nutrition, fertilization, cultivation technology, cereal crops, yield, product quality, efficiency, micronutrients, stress tolerance.

Glukhovets D., Matusevych H. Phytosanitary condition of the maize agrocenosis depending on chemical protection systems. *Agroecological journal*. 2025. No. 4. P. 151–160.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: matusevichgalina1971@gmail.com

The article presents the results of research on the impact of different chemical protection systems on the phytosanitary condition of maize agrocenoses under the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. During 2023–2025, the effectiveness of herbicidal, insecticidal, and fungicidal crop protection systems was assessed based on weed infestation levels, population density of key pests, and the incidence and development of diseases. It was established that the combined application of soil and post-emergence herbicides (Akris + Stellar Plus) ensured a significant reduction in weed infestation (down to 3.5–8.2 plants/m²), with a technical efficiency reaching 95.3%. The analysis of weed species composition in maize crops revealed that annual weeds accounted for 85.6% of the total infestation. Among them, spring annual species were predominant, comprising 74.6% of the weed community. Perennial weeds such as field sow-thistle (*Sonchus arvensis* L.), field bindweed (*Convolvulus arvensis* L.), and couch grass (*Elytrigia repens* L.) represented 1.4% of the overall weed population. The dominant weed species in maize fields were *Amaranthus retroflexus* (35.6%), *Chenopodium album* (22.3%), *Setaria glauca* (17.0%), and *Elytrigia repens* (8.2%).

Among the harmful species, the greatest threat to maize crops was posed by wireworm larvae (*Elaeteridae*) and the European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn.), which exhibited high levels of harmfulness. The intensity of maize damage by these pests was strongly influenced by hydrothermal conditions. In years with excessive soil moisture (May 2025 – 64.6 mm of precipitation), seedling damage by wireworms exceeded 10–15%, whereas in drier periods (May 2023–2024), the damage level decreased but remained within the economic threshold. The highest harmfulness of the corn borer was recorded in 2024–2025, when crop infestation levels ranged between 22.0–40.0%, which was associated with excessive rainfall in June. Conversely, a sharp rise in temperature in July 2024 led to a decrease in pest population density and damage intensity. The application of the insecticide Ampligo (0.2 L/ha) at the BBCH 18–19 stage proved to be an effective measure for controlling both soil-dwelling and stem-boring pests, reducing their harmfulness by 25–35%. The use of the fungicide Abacus (1.5 L/ha) significantly reduced the development and spread of helminthosporium and fusarium diseases of maize, providing reliable protection during critical stages of organogenesis. The fungicide contributed to a marked decrease in leaf and ear infection rates, which positively affected the preservation of the photosynthetic potential of plants. The obtained results confirm the expediency of using Abacus within the maize protection system against a complex of fungal pathogens. Thus, the integrated application of herbicides, insecticides, and fungicides in maize protection systems considering the biological characteristics of phytophages, weed species composition, and prevailing weather conditions ensures stable control of major harmful organisms and promotes the maintenance of agroecological balance within the agrocenosis.

Key words: cereal crops, herbicides, insecticides, fungicides, weeds, pests, diseases, agroecosystem.

Horodyska I., Mursyukaev F. Effect of plant density on productivity, growth, and development of sunflower hybrids. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 161–172.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: ammi0479@gmail.com

The article presents the results of a two-year study (2023–2024) on the effect of different plant densities on the morphological characteristics and productivity of four sunflower hybrids (Groot, Tor Sumo, Stark, and Avalon) in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. The research covered periods with both favorable (2023) and arid (2024) weather conditions, which allowed for an objective assessment of the hybrids' adaptability to various agroecological factors and the determination of their productive potential under stress. The study aimed to investigate the influence of varying plant densities on the

growth, development, and overall productivity of sunflower hybrids. The research methods included field observations, measurements, and related assessments, all conducted in accordance with the standard methodologies for field trials and state variety testing. The findings confirm that optimizing plant density is a key tool for fully realizing the genetic potential of sunflower hybrids. The analysis revealed a clear hybrid-specific reaction to increased density, which manifested in changes to plant height, head diameter, and leaf area. In particular, the Groot and Stark hybrids were found to be more adaptable to intensive cultivation practices and can be grown at higher densities while maintaining high productivity. In contrast, the Avalon hybrid was highly sensitive to increased competition, leading to a sharp decline in its morphometric indicators and final yield. The study established optimal plant density ranges for each hybrid, which is crucial for practical application. It was shown that the ideal density for achieving maximum yield for the Groot and Avalon hybrids is 60–70 thousand plants/ha, while for Tor Sumo and Stark, this range is 70–80 thousand plants/ha. The conclusion is drawn that a rational combination of a hybrid's genetic traits with appropriate cultivation techniques enables effective management of sunflower productivity in unstable climatic conditions, ensuring a stable yield even under drought stress.

Key words: yield, plant density, head diameter, leaf area, plant height, plant competition, hybrid adaptability, arid conditions, favorable conditions.

Gaponenko A.¹, Gnatiuk A.², Kulyk M.³, Bondar V.¹, Blum O.² Mercury in the aboveground parts of *Trifolium repens* L. and *Trifolium pratense* L.: accumulation and prospects of phytoextraction. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 173–181.

¹*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

²*M.M. Gryshko National Botanical Garden, National Academy of Sciences of Ukraine*

³*SE «UKRMETRTTESTSTANDART» State Enterprise «All-Ukrainian State Research and Production Center for Standardization, Metrology, Certification and Consumers' Rights Protection»*

e-mail: lera_bond@email.ua

Soil contamination with mercury (Hg) represents a critical environmental challenge due to its profound neurotoxicity and its tendency to biomagnify. Legacy industrial zones, in particular, often contain high concentrations of Hg, posing long-term risks to ecosystem stability and human health. In response, phytoremediation has emerged as a promising green technology that utilizes plants to extract or stabilize contaminants. This study provides a comparative in situ assessment of two ubiquitous, nitrogen-fixing legume species, white clover (*Trifolium repens* L.) and

red clover (*Trifolium pratense* L.), to determine their natural capacity for mercury phytoextraction from historically contaminated soils. Field investigations were conducted on plots with a significant mercury concentration gradient, ranging from a baseline of 0.04 mg/kg to a heavily contaminated 5.26 mg/kg, the latter of which far exceeds regulatory limits (2.1 mg/kg). The concentration of total mercury in dried, above-ground biomass and corresponding soil samples was quantified using a direct mercury analyzer DMA-80 evo (Milestone, Italy) based on thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrometry. The plants' accumulative efficiency was evaluated using the Bioconcentration Factor (BF), calculated as the ratio of Hg concentration in the above ground plant parts to that in the soil. The results revealed that both species successfully grew without visible signs of toxicity across all contamination levels. A strong, dose-dependent relationship was observed between soil Hg levels and the concentration within plant tissues. The highest accumulations recorded were 0.25 ± 0.01 mg/kg for *T. repens* L. and a notably higher 0.45 ± 0.01 mg/kg for *T. pratense* L. Interestingly, at the lowest background contamination level, both species achieved a $BF > 1$, suggesting a hyperaccumulative potential under conditions of low environmental pressure. However, the species demonstrated distinct accumulation strategies at higher concentrations: *T. pratense* L. exhibited a linear uptake response, while *T. repens* L. showed a polynomial (non-linear) trend, suggesting the activation of tolerance mechanisms at peak toxicity. Given its greater biomass production and superior accumulation capacity in highly contaminated soil, *Trifolium pratense* L. is identified as the more promising candidate for practical phytoextraction applications. These findings underscore the potential for using common clover species in managed phytoremediation systems. Future work should focus on identifying the phytotoxicity thresholds, investigating the genetic and physiological mechanisms of Hg uptake and sequestration, and developing sustainable management strategies for the harvested, mercury-laden biomass.

K e y w o r d s: phytoremediation, heavy metals, Hg, pollution, *Fabaceae*, plant resistance, bioconcentration factor, phytotoxicity, soil contamination.

Kravchuk Yu., Beznosko I. Influence of side crops on the amount of soil microorganisms in agroecosystems of winter wheat. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 182–191.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: beznoskoirina@gmail.com

The use of green manure crops in winter wheat agroecosystems plays a crucial role in maintaining soil fertility and ecological stability. Green manures improve the nutrient status, stimulate soil microbial communities, enhance enzymatic activity, and contribute to

the formation of a sustainable agroecosystem. The objective of this study was to analyze the structure and composition of soil microbial complexes under different green manure crops in order to assess their influence on microbiological activity, organic matter transformation, and ecological balance in agroecosystems of winter wheat. The experiment included four green manure crops — spring vetch (*Vicia sativa* L.), oil radish (*Raphanus sativus* var. *oleifera* Metrg.), white mustard (*Sinapis alba* L.), and milk thistle (*Silybum marianum* L.) — representing different biological and ecological groups that differently affect soil nutrient availability, moisture regime, and productivity of subsequent crops. The results demonstrated that the introduction of legume green manures, particularly spring vetch and field pea (*Pisum sativum* L.), provided the most favorable conditions for the activation of soil microbiota. These crops significantly increased the abundance of ammonifying and amylolytic microorganisms, indicating enhanced nitrogen transformation and carbon cycling. In contrast, cruciferous green manures such as white mustard and oil radish stimulated the growth of actinomycetes and promoted the mineralization of organic residues, thereby accelerating nutrient release for plant uptake. However, the use of milk thistle as a green manure resulted in a sharp increase in actinomycete populations, which is associated with signs of microbial imbalance and degradation processes, potentially reducing soil biological resilience. At early stages of winter wheat ontogenesis, the highest mineralization–immobilization ratio was observed in treatments with spring vetch and field pea, suggesting active nitrogen mobilization and efficient organic matter decomposition. The pedotrophic coefficient was greatest in variants with white mustard and vetch, reflecting optimal microbial community structure and substrate utilization. At later stages, soils after pea green manure exhibited the highest transformation coefficient of organic matter, followed by mustard and vetch treatments, whereas the fallow variant demonstrated the lowest level of microbial activity and transformation intensity. Overall, the findings confirm that the incorporation of green manure crops—especially legumes—substantially enhances soil biological activity, optimizes nutrient cycling, and supports the ecological stability of agroecosystems. Such practices are essential for improving soil fertility, maintaining microbiological diversity, and ensuring the sustainable production of high-quality crop yields under environmentally balanced agricultural systems.

K e y w o r d s: agroecosystem, micromycetes, ecological balance, soil fertility, microbiological activity, organic matter transformation, pedotrophy, oligotrophy, mineralization–immobilization ratio, green manure crops, winter wheat.

Tsvihun V., Mazur S., Levishko A., Gumeniuk I., Kolodyazhnyi O. Dynamics of the spread of *Cucumber mosaic virus* in vegetable crop agroecosystems

under contrasting climate change. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 192–204.

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: vika-natceovich@ukr.net

The study was focused on analyzing the dynamics of the spread of *cucumber mosaic virus* (CMV) in vegetable crops of Ukraine under global climate change. CMV, which is one of the one of the most common and economically significant plant viruses, and which affects more than 1200 plant species, including cucumbers, tomatoes, pepper and courgettes, causes harvest damages from 20 to 50%. The monitoring conducted in 2021–2025 showed a significant spread of CMV in vegetable crop agroecosystems. The level of impact varied from 19% in 2021 to the top 40% in 2024. The highest level (15–25%) was in south regions, where higher temperature and longer periods of drought contributed to the activity of the virus, while in northern regions the rate was significantly lower (8–12%). Symptoms of infection included light green (35.3%) and yellow-green (25.1%) mosaic, chloroses (21.6%), blistering deformations of leaves (9.7%) and discoloration of fruits, accompanied by a decrease in seed quality. Correlation analysis showed a strong positive correlation ($r=0.86$) between average annual temperature and CMV virulence, and a strong negative correlation ($r=-0.94$) with precipitation. The impact of soil organic carbon (SOC) content was insignificant ($r=0.06$). Extreme weather conditions in 2024, including record warming (+1.55°C) and increased humidity, contributed to the massive spread of the virus through the activity of vectors such as green peach aphid. In 2025, the incidence rate decreased to 31% thanks to the application of agronomic measures. Recorded climate changes, including 1.6°C warming in Polissia and precipitation instability, contributed to the prolongation of the growing season and vector invasion. In the central regions with fertile black soils (SOC 2.0–3.5%), there was intense contact transmission, while less fertile soils (SOC 1.0–2.0%) increased plant susceptibility to viral stress. Importantly, 38% of infected plants were asymptomatic carriers, highlighting the critical need for molecular diagnostics for effective monitoring. Ultimately, the study emphasizes the need to develop integrated protection strategies that take into account climatic and soil factors for CMV control in a changing climate.

Keywords: plants viral infections, *Cucurbitaceae*, monitoring, environmental factors, climatic changes, organic carbon content, phytosanitary risks.

Kraynyk L., Syvulka P. Agroecological assessment of machine-tractor units in agriculture: problematic issues and modern approaches to improvement. Agroecological journal. 2025. No. 4. P. 205–212.

Lviv National Environmental University

e-mail: l.kraynyk@gmail.com

A comparative analysis of regulatory frameworks and assessment methodologies for tractors and automobiles under agroecological conditions in Ukraine and the EU (using Germany as an example) has been conducted. The study highlights the ambiguity of agroecological assessment when based solely on the specific pressure at the tire-soil contact point, as regulated by National Standard of Ukraine 4521:2006. In particular, at the same specific pressure values, tires of a larger size (and with a correspondingly higher wheel loads) cause a significantly greater depth and perimeter of soil compaction. The range of permissible specific pressure values is 4-fold and depends not only on the seasons and the corresponding soil density variants, but also on five levels of moisture content. The regulatory tools for determining density and moisture content (other National Standards of Ukraine) involve lengthy laboratory assessments and do not take into account the development of rapid assessment tools that have become widespread over the last 40–30 years. The assessment of wheeled tractors of traction class 3 and higher with different tire sizes on the front and rear axles is also problematic. The study examines the use of soil hardness—associated with soil density and moisture content—as an operational indicator of soil condition and as a basis for refining the calculation of the tire-ground contact patch area. The proposed assessment methodology is based on the use of piezoelectric penetrometers equipped with a standardized conical tip designed for determining the so-called cone index (*CI*). It is also suggested to adopt the corresponding ISO standard as a national DSTU, which is relevant for other fields of application as well. Proposals have been developed for the modernization and revision of the relevant regulatory framework for agricultural units, taking into account advances in tools for rapid soil condition assessment and variations in tire-ground contact patch area depending on soil hardness, tire inflation pressure, and axle load.

Keywords: tractors, automobiles, regulatory framework, soil compaction, assessment tools, specific pressure, standards, modernization.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

АНТОНЮК Юрій Петрович, Інститут агро-екології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: yuraantoniuk22@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3257-0843>)

БЕЗНОСКО Ірина Володимирівна, доктор біологічних наук, старший дослідник, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: beznoskoirina@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2217-5165>)

БЛЮМ Олег Борисович, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України, м. Київ, Україна (e-mail: oleg_blum@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0765-9866>)

БОНДАРЬ Валерія Іванівна, кандидат сільськогосподарських наук, доцент Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна (e-mail: lera_bond@email.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-3568>)

БОРОДАЙ Віра Віталіївна, доктор сільськогосподарських наук, доцент, Інститут агроекології і природокористування НААН, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна (e-mail: veraboro@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-8646>)

ВОЛКОГОН Віталій Васильович, доктор сільськогосподарських наук, професор, академік НААН, Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН, м. Чернігів, Україна (e-mail: volkogon@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0675-1318>)

ВОЛКОГОН Катерина Іванівна, Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН, м. Чернігів, Україна (e-mail: katerina_volkogon@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7156-4124>)

ГАПОНЕНКО Андрій Миколайович, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна (e-mail: andreygaponenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4215-2216>)

ГЛУХОВЕЦЬ Денис Володимирович, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: denys.glukhovets@basf.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1973-485X>)

ГНАТЮК Алла Миколаївна, кандидат біологічних наук, старший дослідник, Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України, м. Київ, Україна (e-mail: gnatiukalla@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5001-971X>)

ГОРОДИСЬКА Інна Миколаївна, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: anni0479@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1580-3450>)

ГРИЩЕНКО Олена Миколаївна, кандидат сільськогосподарських наук, Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», м. Київ, Україна (e-mail: grischenkoel@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1241-7183>)

ГУМЕНЮК Ірина Ігорівна, кандидат біологічних наук, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: gumenyuk.ir@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6692-0171>)

ДИМОВА Світлана Борисівна, кандидат сільськогосподарських наук, Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН, м. Чернігів, Україна (e-mail: dimova13@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2440-6657>)

ДЕМ'ЯНЮК Олена Сергіївна, доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: demolena@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4134-9853>)

ДРЕБОТ Оксана Іванівна, доктор економічних наук, професор, академік НААН, Інститут агро-екології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: drobot_oksana@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2681-1074>)

ДУШКО Павло Миколайович, кандидат сільськогосподарських наук, Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: Dushko@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1408-0342>)

ЄРМОЛЕНКО Сергій Миколайович, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна (e-mail: ogorbachiev@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8677-4938>)

ЗАПАСНИЙ Віктор Степанович, Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», м. Київ, Україна (e-mail: pasportyzaciya@iogu.

gov.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8547-8852>)

КИРИЧЕНКО Леся Петрівна, Інститут сільськогосподарства Полісся НААН, м. Житомир, Україна (e-mail: lkyrych@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8604-2524>)

КОВАЛІВ Олександр Іванович, доктор економічних наук, старший науковий співробітник, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: okovaliv@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4908-7963>)

КОЛОДЯЖНИЙ Олександр Юрійович, кандидат сільськогосподарських наук, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: sashoknet.sk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5359-1738>)

КОНІЩУК Василь Васильович, доктор біологічних наук, професор, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: konishchuk_vasyl@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4115-5642>)

КРАВЧУК Юрій Алікович, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: doslidna_skvira@meta.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6878-7700>)

КРАЙНИК Любомир Васильович, доктор технічних наук, професор, Львівський національний університет природокористування, м. Дубляни, Львівська обл., Україна (e-mail: l.kraynyk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0524-9126>)

КРУПКО Галина Дмитрівна, Рівненський регіональний центр Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України», с. Шубків, Рівненський р-н, Рівненська обл., Україна (e-mail: krupko_gd@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1506-1258>)

КУЛИК Максим Володимирович, ДП «УКР-МЕТРТЕСТСТАНДАРТ» Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів», м. Київ, Україна (e-mail: maksymkulyk@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8206-9735>)

ЛАЗАРЄВ Микола Михайлович, кандидат біологічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна (e-mail: laz_rev@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6286-0063>)

ЛЕВІШКО Алла Сергіївна, кандидат біологічних наук, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: alodua2@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4037-1730>)

ЛЮБЧЕНКО Владислав Владиславович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут сільського господарства Полісся НААН, м. Житомир, Україна (e-mail: vladovich70@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-000-7558-8054>)

МАЗУР Світлана Олександрівна, кандидат сільськогосподарських наук, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: mazurlanalana@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5025-0134>)

МАРДЗЯВКО Віталій Анатолійович, Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна (e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7327-9215>)

МАРТИНЕНКО Василь Валентинович, доктор філософії (екологія), Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: martinenko.vasil@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2526-6732>)

МАТУСЕВИЧ Галина Дмитрівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: matusevichgalina1971@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6513-5287>)

МЕЛЬНИКОВ Олексій Васильович, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: alexej.mln@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3710-9152>)

МІНЕНКО Олег Валентинович, 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/0009-0009-0825-6426>)

МОРОЗ Віра Василівна, кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Тернопільська обл., Україна (e-mail: vera_moroz@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-4641>)

МУДРАК Галина Василівна, кандидат географічних наук, доцент, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна (e-mail: galina170971@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1319-9189>)

МУДРАК Олександр Васильович, доктор сільськогосподарських наук, професор, КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти», м. Вінниця, Україна (e-mail: ov_mudrak@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1776-6120>)

МУРСЮКАЄВ Філіп Фатіхович, Інститут агроєкології і природокористування НААН,

м. Київ, Україна (e-mail: philipmursyukaev@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7500-2629>)

НЕЧИТАЙЛО Валентина Михайлівна, Північно-східний міжрегіональний центр Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України», с-ще Степне, Полтавський р-н, Полтавська обл., Україна (e-mail: valentinanecitajlo68@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6366-6155>)

ПАЛАМАРЧУК Роман Павлович, Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», м. Київ, Україна (e-mail: prp777@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5965-1305>)

ПОЛТАВА Олександр Петрович, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: o.poltava@profi.land; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3007-6550>)

РУДЕНКО Андрій Юрійович, Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна (e-mail: andrey0911r@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5103-6412>)

САДОВИЙ Олексій Степанович, кандидат технічних наук, доцент, Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна (e-mail: sadovuyos@mnaeu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0424-6086>)

САСІНА Тетяна Сергіївна, Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН, м. Чернігів, Україна (e-mail: taniateri5@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4021-9202>)

СИВУЛЬКА Петро Миколайович, Львівський національний університет природокористування, м. Дубляни, Львівська обл., Україна (e-mail: petr1111@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0254-4064>)

СИДОРЕНКО Василь Павлович, Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН, м. Чернігів, Україна (e-mail: sydorenkochrom@gmail.com)

СТЕЦЮК Олександр Петрович, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Інститут сільського господарства Полісся НААН, м. Житомир, Україна (e-mail: alex.stecyuk@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8872-537X>)

ХОМ'ЯК Іван Владиславович, доктор біологічних наук, доцент, Житомирський держав-

ний університет імені Івана Франка, м. Житомир, Україна (e-mail: khomyakivan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0080-0019>)

ЦВІГУН Вікторія Олександрівна, кандидат біологічних наук, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: vika-natcevich@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9517-9810>)

ЧОРНОБРОВ Олександр Юрійович, кандидат сільськогосподарських наук, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: oleksandr.chornobrov@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8251-1573>)

ШЕВЧЕНКО Любов Анатоліївна, Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН, м. Чернігів, Україна (e-mail: shevchenkolyubov@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2637-1999>)

ШЛЯХТУРОВ Денис Сергійович, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України» м. Київ, Україна (e-mail: dshlyahurov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8896-3236>)

ШТАНЬКО Ігор Павлович, кандидат сільськогосподарських наук, Інститут сільського господарства Полісся НААН, м. Житомир, Україна (e-mail: shtanko_hop@meta.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7847-0772>)

ШУМИГАЙ Інна Вікторівна, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: innashum27@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0432-2651>)

ЩЕРБЛЮК Аліна Леонідівна, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна (e-mail: alina.shcherbliuk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1606-4554>)

ЯКОВЕНКО Дмитро Олексійович, Інститут агроєкології і природокористування НААН, м. Київ, Україна, ТОВ «Компанія БТУ-Центр» (e-mail: d.yakovenko@btu-center.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0008-8239-7684>)

ЯЦЕНКО Юлія Миколаївна, Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», м. Київ, Україна (e-mail: yuliya.yatsenko@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3402-3093>)

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 анонімне 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 невирішених 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 аббревіатура, 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.