Міністерство освіти і науки України
Житомирський державний університет імені Івана Франка

Український журнал природничих наук

№ 14

Науковий журнал,
заснований у 2022 році

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Видається за рішенням вченої ради Житомирського державного університету імені Івана Франка (протокол № 23 від 23.12.2025 року).

Головний редактор

Овчаренко Микола – габілітований доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, професор Інституту біології та охорони середовища Поморської академії наук (Слупськ, Республіка Польща)

Заступник головного редактора

Шелюк Юлія – доктор біологічних наук, професор кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Відповідальний секретар

Пацюк Марина – кандидат біологічних наук, доцент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Члени редакційної колегії

Атасарал Шебнем – доктор наук, професор відділу розробки технології рибальства факультету морських наук Караденізького технічного університету (Трабзон, Турецька Республіка)

Боймуродов Хусніддін – доктор біологічних наук, професор кафедри біотехнології Самаркандського інституту ветеринарної медицини (Самарканд, Республіка Узбекистан)

Власенко Руслана – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та географії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Воловик Володимир – доктор географічних наук, доцент, професор кафедри географії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського (Вінниця, Україна)

Гарбар Олександр – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри екології та географії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Жовнерчук Ольга – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник Інституту зоології ім. І. І. Шмальгаузена НАН України (Київ, Україна)

Зайонц Тадеуш – доктор біологічних наук, професор Інституту захисту природи Польської академії наук (Краків, Польща)

Киричук Галина – доктор біологічних наук, професор кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Кичкирук Ольга – кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Корнійчук Наталія – кандидат біологічних наук, доцент кафедри медико-біологічних дисциплін Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Кривенко Анна – доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувачка кафедри захисту, генетики і селекції рослин Одеського державного аграрного університету (Одеса, Україна)

Кусяк Наталія – кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Кюрчев Володимир – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НААН, радник ректора, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного (Мелітополь, Україна)

Лаврик Олександр – доктор географічних наук, професор кафедри екології та географії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Листван Віталій – кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Марченко Тетяна – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу селекції сільськогосподарських культур Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства Національної академії аграрних наук України (Одеса, Україна)

Міщенко Сергій – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри біології, здоров'я людини та методики навчання Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка (Глухів, Україна)

Мудрак Галина – кандидат географічних наук, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища Вінницького національного аграрного університету (Вінниця, Україна)

Нестерчук Інна – кандидат географічних наук, доцент кафедри екології та географії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Оксентюк Ярослава – кандидат біологічних наук, старший викладач кафедри медико-біологічних дисциплін Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Островський Ілля – доктор філософії (біологія/лімнологія), професор, старший науковий співробітник Інституту Океанографії і Лімнології, Кінеретська лімнологічна лабораторія (Хайфа, Ізраїль)

Пілярська Олена – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, завідувачка відділу маркетингу та міжнародної діяльності, Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства Національної академії аграрних наук України (Одеса, Україна)

Семенюк Наталія – доктор біологічних наук, старший науковий співробітник Інституту гідробіології НАН України (Київ, Україна)

Сидоренко Сергій – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник лабораторії екології лісу, Українського ордена «Знак пошани» науково-дослідного інституту лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г.М. Висоцького Державного агентства лісових ресурсів України та НАН України (Харків, Україна)

Стадниченко Агнеса – доктор біологічних наук, професор кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Стунженас Вірмантас – доктор філософії (біологія і екологія), науковий співробітник лабораторії паразитології Центру дослідження природи Інституту екології (Вільнюс, Литовська Республіка)

Тітов Юрій – доктор хімічних наук, старший науковий співробітник Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

Томашик Василь – доктор хімічних наук, професор Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України (Київ, Україна)

Хом'як Іван – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та географії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Чайка Микола – кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Чехній Віктор – кандидат географічних наук, старший науковий співробітник, учений секретар Інституту географії НАН України (Київ, Україна)

Чумак Володимир – кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії Житомирського державного університету імені Івана Франка (Житомир, Україна)

Наукове періодичне видання

Український журнал природничих наук: науковий журнал / [гол. ред. Овчаренко Микола, відп. ред. Шелюк Юлія]. Житомир: 2025. № 14. 394 с.

Реєстрація в Національній раді України з питань телебачення і радіомовлення (Рішення № 540 від 20.07.2023 р.).

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Житомирський державний університет імені Івана Франка (вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, 10008, intel@zu.edu.ua, тел. (0412) 43-14-17)

Фахова реєстрація (категорія «Б»): Наказ МОН України № 491 від 27.04.2023 року (додаток 3)

Спеціальності: Е1 Біологія та біохімія, Е2 Екологія, Е3 Хімія, Е4 Науки про Землю, С6 Географія та регіональні студії, Н1 Агрономія

Мови публікацій: українська, англійська.

Сайт видання: naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns
Макетування: Ковальчук Ю. В.

В усіх статтях збережено орфографію та пунктуацію авторів.

Підписано до друку 30.12.2025 р. Формат 60x90/8. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 45,80. Тираж 300. Замовлення 0126/076

Видавничий дім «Гельветика»
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

© Житомирський державний університет імені Івана Франка, 2025

Ministry of Education and Science of Ukraine
Zhytomyr Ivan Franko State University

Ukrainian Journal of Natural Sciences

№ 14

Scientific journal,
founded in 2022

Publishing House
“Helvetica”
2025

Approved for publication by the Academic Council of Zhytomyr Ivan Franko State University
(protocol № 23 dated from 23.12.2025).

Editor-in-chief

Ovcharenko Mykola – Doctor habilitatus of Sciences (Biology), Senior Researcher, Professor of Institute of Biology and Earth Sciences Pomeranian University in Słupsk (Slupsk, Republic of Poland)

Co-editor-in-chief

Shelyuk Yulya – Doctor of Sciences (Biology), Professor of Department of Botany, Biological Resources and Conservation of Biodiversity Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Executive Secretary

Patsyuk Maryna – PhD (Biology), Associate Professor of Department of Botany, Biological Resources and Conservation of Biological Diversity Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Members of the Editorial Board

Atasaral Şebnem – Doctor Sciences in Fisheries Technology Engineering, Assistant Professor of the Department of Fisheries Technology Engineering of Karadeniz Technical University (Trabzon, Turkey)

Boymurodov Husniddin – Doctor of Sciences (Biology), Professor of Biotechnology Department of Samarkand Institute of Veterinary and Medicine (Samarkand, Uzbekistan Repuplic)

Vlasenko Ruslana – PhD (Biology), Associate Professor of the Department of Ecology and Geography Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Volovyk Volodymyr – Doctor of Sciences (Geography), Professor of the Department of Geography Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi Pedagogical University (Vinnytsia, Ukraine)

Harbar Oleksandr – Doctor of Sciences (Biology), Professor, Head of the Department of Ecology and Geography Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Zhovnerchuk Olga – PhD (Biology), Senior Researcher of I. I. Schmalhausen Institute of Zoology NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Zając Tadeusz – PhD (Biology), Professor of the Institute of Nature Conservation of the Polish Academy of Sciences (Krakow, Poland)

Kyrychuk Halyna – Doctor of Sciences (Biology), Professor of Department of Botany, Biological Resources and Conservation of Biological Diversity Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Kychkyruk Olga – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Korniichuk Nataliia – PhD (Biology), Associate Professor of Department of Medical and Biological Bases of Physical Education and Sport Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Kryvenko Anna – Doctor of Sciences (Agricultural), Professor, Head of the Department of Plant Protection, Genetics and Breeding, Odessa State Agrarian University (Odesa, Ukraine)

Kusiak Nataliia – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Kyurchev Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University (Melitopol, Ukraine)

Lavryk Oleksandr – Doctor of Sciences (Geography), Professor of the Department of Ecology and Geography Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Lystvan Vitalii – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Marchenko Tetiana – Doctor of Sciences (Agricultural), Senior Researcher, Head of the Department of Crop Breeding, Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Odesa, Ukraine)

Mishchenko Serhii – Doctor of Sciences (Agricultural), Senior Researcher, Associate Professor at the Department of Biology, Human Health and Teaching Methods. Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University (Hlukhiv, Ukraine)

Mudrak Halyna – PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection, Vinnytsia National Agrarian University (Vinnytsia, Ukraine)

Nesterchuk Inna – PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Ecology and Geography Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Oksentiuk Yaroslava – PhD (Biology), Senior Lecturer of Department of Medical and Biological Bases of Physical Education and Sport Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Ostrovsky Ilia – PhD (Aquatic Biology/Limnology), Professor, Senior Scientist of Israel Oceanographic and Limnological Research, Yigal Allon Kinneret Limnological Laboratory (Haifa, Israel)

Piliarska Olena – PhD (Agricultural), Senior Researcher, Head of the Department of Marketing and International Activities, Institute of Climate-Smart Agriculture, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Odesa, Ukraine)

Semenyuk Nataliia – Doctor of Sciences (Biology), Senior Researcher of Institute of Hydrobiology NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Sydorenko Serhii – PhD (Agricultural), Senior Researcher Laboratory of Forest Ecology, Ukrainian order "Sign of Honour" Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky State Forest Resources Agency of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv, Ukraine)

Stadnychenko Agnesa – Doctor of Sciences (Biology), Professor of Department of Zoology, Biological Monitoring and Nature Conservation Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Stunžėnas Virmantas – PhD (Biology and Ecology), Senior researcher of Parasitology laboratory of the Nature Research Centre of the Institute of Ecology (Vilnius, Lithuania)

Titov Yuriy – Doctor of Sciences (Chemistry), Senior Research at Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)

Tomashyk Vasyl – Doctor of Sciences (Chemistry), Professor of Lashkariov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Khomyak Ivan – PhD (Biology), Associate Professor of the Department of Ecology and Geography Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Chayka Mykola – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Chekhniy Viktor – PhD (Geography), Senior Researcher, Scientific Secretary of the Institute of Geography of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Chumak Volodymyr – PhD (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemistry Zhytomyr Ivan Franko State University (Zhytomyr, Ukraine)

Scientific Periodical

Ukrainian Journal of Natural Sciences / [editor Ovcharenko Mykola, co-editor-in-chief Sheliuk Yuliia].
Zhytomyr: 2025. № 14. 394 p.

Registered by the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine (Decision No. 540 dated 20.07.2023).

Media entity – Zhytomyr Ivan Franko State University
(10008, Zhytomyr, Velyka Berdychivska Str., 40, intel@zu.edu.ua, tel. (0412) 43-14-17).

Professional registration (category «B»): Decree of MES No. 491 (Annex 3) dated 27.04.2023

Specialties: E1 Biology and Biochemistry, E2 Ecology, E3 Chemistry, E4 Earth Sciences,
C6 Geography and Regional Studies, H1 Agriculture

Publication languages: Ukrainian, English.

Website: naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns
Modelling: Kovalchuk Yu. V.

Authors' spelling and punctuation are preserved in the articles.

Signed for printing 30.12.2025. Size 60x90/8. Offset Paper. Font Times New Roman
Digital printing. Conventional printed sheets 45,80. Number of copies 300. Order 0126/076

Publishing House "Helvetica" 65101,
Ukraine, Odessa, 6/1 Inglizi St.
Telephone: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Certificate of a publishing entity ДК No 7623 dated 22.06.2022

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online
© Zhytomyr Ivan Franko State University, 2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

БІОЛОГІЯ

УДК 581.9(5)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.1

АУТЕКОЛОГІЧНІ ТА ФІТОЦЕНОТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ *ECHINOPS EXALTATUS* SCHRAD ЗАХІДНОГО ПОДІЛЛЯ

І. Г. Власов[1]

Дослідження присвячене аутекологічним і фітоценотичним особливостям Echinops exaltatus Schrad. на території Західного Поділля, що розташоване на північно-східній межі диз'юнктивного ареалу виду. Ця багаторічна рослина, геміkриптофіт із родини айстрових (Asteraceae), є цінним елементом природної флори завдяки обмеженому поширенню й високій екологічній пластичності. Проте інтенсивна антропогенна трансформація ландшафтів створює суттєві загрози для збереження її популяцій, що зумовлює актуальність дослідження екології та структури популяцій. Дослідження проводилося на території Сатанівського лісництва (Хмельницька область), яке представляє східні локалітети Echinops exaltatus у Західному Поділлі. Природні умови регіону характеризуються поєднанням вапнякових ґрунтів, помірним кліматом і формуванням унікальних фітоценозів Подільських Товтр. Для опису рослинних угруповань застосовувалася методика Браун-Бланке, біометричні показники визначалися шляхом прямих вимірювань.
Метою досліджень було виявлення популяцій Echinops exaltatus на теренах Західного Поділля, визначення їх особливостей залежно від умов існування й антропогенного впливу.
Результати досліджень засвідчили виражену диференціацію популяцій залежно від умов місцезростань. Висота рослин варіювала від 1,76 до 2,13 м. Вікова структура популяцій відрізнялася за співвідношенням імматурних, генеративних і сенільних особин, що зумовлено доступністю світла, рівнем конкуренції та вологістю ґрунту. У складі супутньої флори відзначено представників лучних, узлісних і рудеральних угруповань: Trifolium hybridum, Cichorium intybus, Festuca gigantea, Dactylis glomerata, Medicago falcata, Securigera varia та ін.
Дослідження підтверджує необхідність тривалого моніторингу популяцій Echinops exaltatus у Західному Поділлі та інтеграції цього виду до регіональних програм збереження біорізноманіття. Особливу роль у цьому процесі мають відігравати природоохоронні території – заповідник «Медобори», НПП «Подільські Товтри» й «Дністровський каньйон».
Таким чином, результати роботи поглиблюють розуміння екологічної поведінки Echinops exaltatus і створюють наукову основу для розробки заходів охорони виду на східній межі його ареалу.

Ключові слова: *Echinops exaltatus, аутекологія, фітоценотичні особливості, Західне Поділля, популяційна екологія, антропогенний вплив.*

[1] здобувач наукового ступеня доктора філософії
кафедри біології та екології
(Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, м. Кам'янець-Подільський)
e-mail: loringswoe@gmail.com
ORCID: 0009-0004-2274-960X

AUTECOLOGICAL AND PHYTOCENOTIC FEATURES OF *ECHINOPS EXALTATUS* SCHRAD OF WESTERN PODILLIA

I. G. Vlasov

The study focuses on the autecological and phytocoenotic features of Echinops exaltatus Schrad. within the territory of Western Podillia, located at the north-eastern border of the species' disjunctive range. This perennial hemicryptophyte of the Asteraceae family is considered a valuable element of natural flora due to its restricted distribution and ecological plasticity. However, the anthropogenic transformation of landscapes poses significant threats to the preservation of its populations, making comprehensive research on its ecology and population structure highly relevant.

The research was conducted on the territory of the Sataniv forestry (Khmelnytskyi region), which represents the easternmost localities of Echinops exaltatus in Western Podillia. The environmental conditions of the area are characterized by a combination of limestone-based soils, favorable climatic conditions with moderate humidity, and the presence of unique plant communities formed on the Podillia Tovtry ridge. Vegetation descriptions were performed using the Braun-Blanquet method, while biometric measurements of plants and seed productivity analyses were carried out in five population sites.

The aim of the research was to identify Echinops exaltatus populations in the territory of Western Podillia, and to determine their characteristics depending on the conditions of existence and anthropogenic impact.

The obtained results indicate significant differentiation between populations depending on habitat conditions. Plant height varied from 1.76 to 2.13 m, while the proportion of juvenile, reproductive, and senescent individuals differed across localities, reflecting the influence of light availability, competition, and soil moisture. Associated plant species included representatives of meadow, forest-edge, and ruderal communities, among them Trifolium hybridum, Cichorium intybus, Festuca gigantea, Dactylis glomerata, Medicago falcata, and Securigera varia.

A key finding of the research is the strong impact of anthropogenic factors, particularly mowing, which significantly reduces the generative potential of Echinops exaltatus. Plants damaged during mowing do not produce reproductive shoots, leading to the absence of seed production during the current season. Such pressure may gradually reduce the stability and viability of local populations.

The study confirms the importance of long-term monitoring of Echinops exaltatus populations within Western Podillia. It emphasizes the necessity of integrating this species into regional biodiversity conservation programs, particularly within protected areas such as the "Medobory" Nature Reserve and the "Podilski Tovtry" and "Dnistrovskyi Canyon" National Parks.

In conclusion, the results contribute to a deeper understanding of the ecological behavior of Echinops exaltatus and provide a scientific basis for the development of conservation measures aimed at preserving this rare species at the north-eastern edge of its natural range.

Key words: *Echinops exaltatus, autecology, phytocoenological characteristics, Western Podillia, population ecology, conservation, anthropogenic impact.*

Вступ

За сучасних кліматичних змін важливим питанням, що потребує негайного вирішення, є збереження рослинного різноманіття. Значні темпи антропогенної трансформації призводять до скорочення територій, на яких можуть проростати або зменшувати свою чисельність цінні природні види. До таких можна зарахувати рослину – головатень високий *(Echinops exaltatus)*, вид рослин із родини айстрових *(Asteraceae)*, поширений у Європі (Сташків та ін., 2025). Багаторічна рослина, гемікриптофіт (бруньки відновлення розташовані на рівні ґрунту, захищені від несприятливих умов). Стебло густо вкрите шовковистими жовтуватими волосками, сніжно-повстяне. Зазвичай просте або сильно розгалужене. Листя перисторозсічене, з крупно-пильчастими колючими частками. Базальні та прикореневі листки крилато-черешкові, середні й дистальні стеблові листки охоплюють стебло. Нижня сторона листя біло-повстяна, верхня – зелена, гола або рідко опушена (рис. 1) (Bitew & Hymete, 2019).

Квітки головки кулясті, 4–6 см у діаметрі, блідо-зелені. Віночки білуваті, внутрішні листочки обгортки блідо-жовті. Одна рослина може утворювати кілька суцвіть, кожне з яких має майже сферичну форму з білими або блідо-блакитними трубчастими квітками (без язичкових). Плід – сім'янки довжиною близько 7 мм. Цвіте влітку (червень-вересень) (Парпан і Дмитраш-Вацеба, 2016).

Рис. 1. Рослина *Echinops exaltatus* Schrad
Джерело: фото автора.

Віддає перевагу добре дренованим, суглинковим ґрунтам. Може переносити бідні ґрунтові умови, але найкраще росте на помірно родючих ґрунтах. Потребує яскравого прямого сонячного світла для оптимального росту й розвитку. Посухостійкий вид після вкорінення (Echinops…, 2025a).

Добре росте за помірних температур. Переносить широкий діапазон рівнів вологості. Узимку входить у період спокою. Розмножується насінням або вегетативно.

Вид *Echinops exaltatus* – європейсько-середземноморський вид із диз'юнктивним ареалом, який природно зростає в Болгарії, північно-східній Італії, Румунії, Польщі, Україні. В Україні він росте на Прикарпатті, Закарпатті (у Чернівецькій, Івано-Франківській, Закарпатській, Тернопільській областях). Останніми роками вид знайдено на південному Опіллі й Західному Поділлі. Його виявлено в межах заповідника «Медобори», національних природних парків (НПП) – «Дністровський каньйон» і «Подільські Товтри» (Брусак та Москалюк, 2016; ДП «Ярмолинецьке…, 2025). Інформації про наявність і чисельність популяцій *Echinops exaltatus* на досліджуваних територіях мало, тому вважаємо, що дослідження даного виду є актуальним.

Матеріал і методи

До Медоборів входять сильно розчленовані, скелясті вапнякові пасма. Частина єдиного у світі гірського кряжу Товтри, що з'явився не внаслідок тектонічних процесів, а утворений живими організмами – коралловими поліпами. Назва місцевості походить від іллірійського «medubaris», що означає «між долинами». Тут бере початок кілька річок, є карстові озера Вікнини. На березі річки Збруч б'ють джерела, вода яких за хімічним складом подібна до трускавецької «Нафтусі». Багато лікувальних джерел поблизу села Крутилів і смт Сатанів. Клімат відіграє велику роль у формуванні навколишнього середовища. Висота, розташування щодо напрямку домінуючих вітрів і залісненість створюють тут специфічні мікрокліматичні умови, що позитивно впливають на кількість опадів і температурний режим. Клімат території заповідника характеризується м'якою зимою (середня температура січня -3°C) і помірно теплим літом (середня температура липня +18°C). Значна кількість опадів (620 мм на рік) створює сприятливі умови для росту середньоєвропейських лісових видів. У ґрунтовому покриві переважають сірі суглинкові ґрунти на лесах, лесовидних суглинках і делювії вапняків.

З метою збереження особливо цінних геологічних пам'яток природи, рідкісних видів тварин і рослин, у 1990 році на базі Подільських Товтр було організовано державний заповідник «Медобори». Це нині єдиний заповідник у Тернопільській області й один із найбільших в Україні, загальною площею 10 454 га.

На досліджуваній території розрізняють шість ландшафтно-географічних районів, серед них Гологоро-Вороняцький ландшафтний район займає північ, найбільш високий і горбистий район Подільського плато, де переважають букові ліси з деякими гірськими карпатськими елементами: астранція велика (*Astrantia major* L.); аконіт молдовський (*Aconitum moldavicum* L.); деякі реліктові види: зозулині черевички (*Cypripedium calceolus* L.); листовик сколопендровий (*Asplenium scolopendrium* L.). Рідше зустрічаються дубово-грабові (з підліском із ліщини, глоду) і зовсім рідко соснові-букові ліси. Лучна рослинність збереглась тут на значних площах. Луки переважно заливні. Основу травостою становить осока гостра (*Carexa cuta* L.); осока гірська (*Carex montana* L.); тонконіг вузьколистий (*Poa anqustifolia* L.). Кременецький район є східним продовженням Гологоро-Вороняцького геоботанічного району, оскільки займає горбистий край Подільської височини, однак відрізняється від нього поширеними тут буково-грабовими й мішаними дубово-сосновими й грабово-сосновими лісами та майже повною відсутністю букових лісів.

Луки представлені переважно суходільними й меншою мірою заплавними. Товтровий кряж укритий ізольованою смугою грабово-дубових, дубово-букових, а також мішаних лісів. На його південно-західних схилах і сьогодні збереглися фрагменти наскельного степу з осоки низької *Carex humilis* Leyss, менше – ковили волосистої *(Stipa capillata L.)*, кипця гребенястого *(Koeleria macrantha (Ledeb.) Schult)*. На території Подільської височини переважають дубово-грабові ліси (з підліском ліщини, глоду), придорожні лісові насадження із різних видів тополі, осики, клена, акації, глоду, спіреї, пухироплідника тощо), лісопарки з ґрунтовими насадженнями ялини, берези, різних видів сосни, вільхи, акації, шипшини тощо, а також суходільні й заплавні луки. Західно-Подільське Придністров'я – район дубово-грабових і їх похідних грабових лісів. Луки переважно суходільні, справжні (Григора і Соломаха, 2005).

Описи ділянок проводили за методикою Браун-Бланке, біометричні показники отримано шляхом прямого вимірювання рослин у межах локалітетів, життєздатність насіння визначали лабораторно, пророщуючи насінини в ростильнях (Мінарченко та ін., 2008).

Результати

Нами досліджувалася популяція виду на території Сатанівського лісництва (Хмельницька область). Це є крайній східний локалітет знайдених та описаних популяцій. Місце зростання – прибережні луки на верхній річковій терасі лівого берега р. Збруч, яка оточена лісовим масивом. Пошуки й описи популяцій *Echinops exaltatus* проводили в кварталах 47, 44, 41, 33, 32, 31, 30 у межах об'єкту Сатанівська дача (рис. 1).

За результатами геоботанічного опису визначили, що у фітоценозі разом з *Echinops exaltatus* зростають *Trifolium hybridum L., Cichorium intybus L., Pastinaca sativa L., Lamium purpureum L., Papaver rhoeas L., Rubus caesius* L., *Urtica dioica* L., *Dactylis glomerata* L., *Geranium sanguineum* L., *Phalacroloma annuum* (L.) Dumort., *Festuca gigantea* (L.) Vill., *Prunella vulgaris* L., *Carex hirta* L., *Medicago falcata* L., *Agrimonia eupatoria* L., *Thalictrum minus* L., *Lavatera thuringiaca* (L.) Vis., *Hieracium umbellatum* L., *Aegopodium podagraria* L., *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm., *Arctium tomentosum* Mill., *Chaerophyllum aromaticum* L., *Dactylis glomerata* L., *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Geranium sylvaticum* L., *G. pratense* L., *Sonchus arvensis* L., *Stachys palustris* L., *Rumex confertus* Willd., *Securigera varia* (L.) Lassen.

Рис. 2. Карта-схема розміщення кварталів Сатанівського лісництва

Джерело: складено автором на основі матеріалів лісовпорядкування ДП «Ярмолинецьке лісове господарство» (Сатанівське лісництво).

Так, найбільша висота рослин відмічена в локалітеті 1 (2,13 м), а найнижча – у популяції на ділянці 5 (1,76 м). Показник висоти рослин пов'язаний з умовами території, доступом до світла та міжвидовою конкуренцією. Вікова структура популяцій демонструє наявність усіх вікових груп (табл. 1).

Проведені дослідження якісних показників насіння *Echinops exaltatus* у лабораторних умовах засвідчили його високу життєздатність та енергію проростання, що є прямим індикатором сприятливих умов його формування й дозрівання в природному середовищі.

Лабораторна схожість на рівні 62–74% для насіння, зібраного з дикорослих популяцій, є досить високим результатом. Цей показник відображає відсоток насінин у пробі, які сформували нормальні проростки за оптимальних лабораторних умов. Висока схожість свідчить про високу фізіологічну якість насіння, відсутність

Таблиця 1

Біометричні показники *Echinops exaltatus* у межах локалітетів популяцій

№ ділянки	Висота рослин (середні значення), м			Кількість рамет на 10м², %		
	іматурні рослини	генеративні рослини	сенільні рослини	іматурні рослини	генеративні рослини	сенільні рослини
1	0,35	2,13	0,87	20	60	20
2	0,28	1,97	0,74	25	45	30
3	0,42	2,06	0,95	27	48	25
4	0,27	1,89	0,73	40	20	20
5	0,24	1,76	0,66	25	40	35

Примітка: 1 ділянка – на березі річки Збруч, 2 ділянка – на узліссі (квартал 30), 3 ділянка – біля лісової дороги (квартал 33), 4 – на узліссі (квартал 41), 5 – на узліссі (квартал 47).

глибокого спокою, що дає насінню змогу проростати одразу після дозрівання та забезпечує його конкурентоспроможність у природі.

Енергія проростання – важливий факт, схожість досягає високих значень уже на ранніх етапах тестування, указує на високу життєздатність насіння. Насіння швидко й дружно проростає, що має велике екологічне значення, оскільки швидкі сходи підвищують шанси рослини закріпитися в ґрунті й уникнути конкуренції чи загибелі від несприятливих факторів (рис. 3).

Відносно невеликий діапазон коливань схожості (лише 12%) між різними популяціями або варіантами свідчить про загалом сприятливі агроекологічні умови на теренах Західного Поділля в період вегетації та дозрівання насіння. Цей фактор мінімізував негативний вплив стресових чинників, таких як посуха, хвороби на фізіологічну зрілість насіння. Високий відсоток схожості підтверджує, що популяції *Echinops exaltatus* на досліджуваній території мають високий репродуктивний потенціал, що є важливою ознакою їхньої стійкості до зовнішніх впливів і здатності до відновлення.

Для рослини, яка може мати кормове, медоносне чи лікарське значення, висока лабораторна схожість є ключовим показником для подальшої інтродукції та культивування. Це значно спрощує відбір і розмноження матеріалу. Таким чином, виявлені показники схожості свідчать про те, що насіння *Echinops exaltatus* є якісним, а умови його формування були оптимальними для забезпечення високої життєздатності.

Антропогенний вплив на фітоценози, зокрема нерегульоване або передчасне викошування, становить значну загрозу для стабільності й кількісного складу популяцій *Echinops exaltatus* на досліджуваній території (рис. 4).

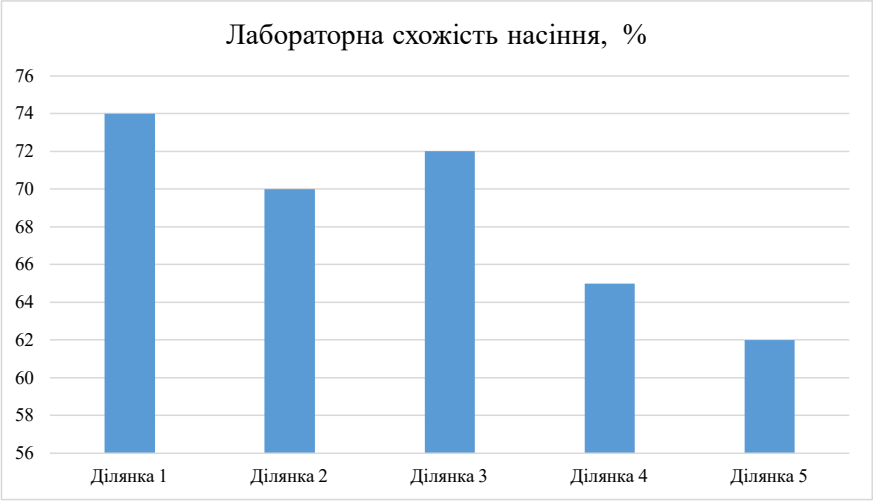


Рис. 3. Лабораторна схожість насіння *Echinops exaltatus*

Джерело: результати власних досліджень.

Рис. 4. Рослина *Echinops exaltatus* після скошування
Джерело: фото автора.

На теренах Західного Поділля виявлені численні рослини, пошкоджені внаслідок викошування. Оскільки *Echinops exaltatus* є високим трав'янистим багаторічником, який часто зростає на луках, узбіччях чи в лісосмугах, він схильний до знищення під час сінокосу або санітарного скошування. Викошування призводить до фізичного пошкодження або повного видалення надземної частини рослин. Це різко знижує накопичену біомасу, необхідну для живлення кореневої системи та формування генеративних (квітконосних) органів у майбутньому. Якщо скошування відбувається після того, як рослина вже сформувала генеративний пагін (стебло, яке несе суцвіття-голівку), цей пагін знищується. Рослини *Echinops exaltatus*, пошкоджені таким чином, нездатні сформувати нові генеративні пагони й зацвісти повторно впродовж цього вегетаційного сезону. Їхні ресурси спрямовуються на відновлення вегетативної маси для забезпечення життєздатності кореневища. Як результат, такі рослини не утворюють насіння в поточному році. Це призводить до випадіння всього року з репродуктивного циклу популяції (Echinops…, 2025b).

Обговорення

Установлені фактори антропогенного впливу, зокрема викошування, мають істотні екологічні та популяційні наслідки для *Echinops exaltatus* на теренах Західного Поділля. Ці наслідки варто розглядати в контексті загального розподілу й стану популяцій виду в регіоні, описаних у сучасній науковій літературі.

Echinops exaltatus є багаторічником, і його ключова стратегія виживання полягає в стабільному щорічному насіннєвому поповненні та довговічності кореневища (Сташків та ін., 2025). Факт відсутності формування насіння в рослин, пошкоджених викошуванням, прямо вказує на випадіння всього року з репродуктивного циклу на певній ділянці, а це означає, що запас насіння в ґрунті не поповнюється. Стан популяцій *E. exaltatus* часто залежить від фітоценотичних умов, які, з одного боку, сприятливі для його росту, а з іншого – легкодоступні для антропогенного впливу. Природне старіння й відмирання дорослих особин у поєднанні з відсутністю насіннєвого поповнення неминуче призводять до зниження кількісного складу популяції та її інволюції (зменшення чисельності) на локальних рівнях (Echinops, 2025a).

Рослини *Echinops exaltatus* на Західному Поділлі часто зустрічаються у фітоценозах, пов'язаних із вапняковими виходами (Didukh & Vasheniak, 2018), або на узліссях, що створює специфічні ґрунтово-геологічні умови. Викошування не просто знищує надземну частину, а й змінює мікроклімат і світловий режим усього фітоценозу. У популяціях, що перебувають під антропогенним пресом, знижується їхня конкурентна здатність щодо більш агресивних чи швидкозростаючих видів-супутників (Matyashuk et al., 2023), які можуть скористатися моментом і зайняти звільнену екологічну нішу.

Нерегульоване викошування впливає на генетичну структуру популяції. Якщо викошуванню регулярно піддаються одні й ті ж ділянки, це може призвести до відокремлених груп рослин, які збереглися, але не можуть перехресно запилюватися з іншими через фізичну перешкоду (скошений простір), стають генетично ізольованими. У невеликих ізольованих групах зростає ризик спорідненого схрещування, що зменшує загальне генетичне різноманіття (Сташків та ін., 2025) і, відповідно, знижує адаптаційну здатність популяції до майбутніх змін клімату чи нових хвороб.

Антропогенний тиск через викошування не лише зменшує поточний кількісний склад популяцій *Echinops exaltatus*, а й створює довгострокові загрози для їхнього генетичного різноманіття та стабільності в екосистемах Західного Поділля.

Висновки

У межах Сатанівської дачі (Західне Поділля) виявлено й проаналізовано популяції *Echinops exaltatus*, проведено геоботанічний опис і метрологічні вимірювання

рослин. Установлено, що вид тяжіє до добре освітлених ділянок із дерново-карбонатними ґрунтами, на яких формує угруповання переважно лучно-степового й узлісного типу.

Популяції характеризуються мозаїчною структурою та різним співвідношенням вікових станів. У більшості випадків домінують генеративні особини, що вказує на відносну стабільність, проте окремі ценопопуляції виявляють ознаки депресії.

Біометричні вимірювання підтвердили значну варіабельність морфологічних ознак, що зумовлено як едафічними умовами, так і рівнем антропогенного навантаження.

Основними негативними чинниками для збереження виду є антропогенний вплив, зокрема надмірне сінокосіння й порушення природних біотопів.

Для підтримання стабільності популяцій *Echinops exaltatus* у регіоні необхідним є проведення моніторингу, регулювання режиму господарської діяльності на територіях зростання виду та посилення природоохоронних заходів у межах заповідних об'єктів Західного Поділля.

Список використаної літератури

Брусак В., Москалюк К. Ландшафтна структура природного заповідника «Медобори». *Вісник Львівського університету.* 2016. Вип. 50. С. 67–83. [Електронний ресурс]. URL: https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/02/50.1.pdf (дата звернення: 15.10.2025).

Григора І.М., Соломаха В.А. Рослинність України (еколого-ценотичний, флористичний та географічний нарис). Київ : Фітосоціоцентр, 2005. 452 с. [Електронний ресурс]. URL: https://surl.li/bsjufa. (дата звернення: 17.10.2025).

ДП «Ярмолинецьке лісове господарство» (Сатанівське лісництво). [Електронний ресурс]. URL: https://dpliss.at.ua/ (дата звернення: 02.07.2025).

Мінарченко В.М., Тимченко І.А., Глущенко Л.М., Сивоглаз Л.М. Методичні аспекти моніторингу недеревних рослинних ресурсів. *Агроекологічний журнал.* 2008. № 3. С. 32–36. [Електронний ресурс]. https://surl.li/ymdxoa (дата звернення: 22.07.2025).

Парпан В.І., Дмитраш-Вацеба І.І. Поширення та стан популяції *Echinops exaltatus* (*Asteraceae*) у Південному Опіллі. *Український ботанічний журнал.* 2016. Вип. 73. № 5. С. 483–491. https://doi.org/10.15407/ukrbotj73.05.483.

Сташків І.П., Прокоп'як М.З., Дробик Н.М. Біологічна характеристика і поширення *Echinops exaltatus* schard. (*asteraceae*). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету.* 2025. Вип. 85. № 1–2. С. 82–88. https://doi.org/10.25128/2078-2357.25.1–2.11.

Bitew H., Hymete A. The Genus *Echinops*: *Phytochemistry and Biological Activities* : A Review. *Front. Pharmacol.* 2019. Vol. 10. P. 1234. https://doi.org/10.3389/fphar.2019.01234.

Didukh Y.P., Vasheniak Yu.A. Vegetation of limestone outcrops in Western and Central Podillia (Ukraine). *Tuexenia.* 2018. № 38. P. 419–444.

Echinops exaltatus Schrader. Flora of North America. [Електронний ресурс]. URL: https://floranorthamerica.org/Echinops_exaltatus (дата звернення: 28.09.2025а).

Echinops exaltatus Schrad. [Електронний ресурс]. URL: https://www.infoflora.ch/en/flora/echinops-exaltatus.html (дата звернення: 28.09.2025б).

Matyashuk R.K., Pirko I.F., Gubar L.M., Tkachenko I.V. Decorative perennials of the regional flora for recreation landscapes in the forest-steppe zone. *Biosystems Diversity*. 2023. Vol. 31. P. 319–326. https://doi.org/10.15421/012337.

References

Brysak, V., & Moskalyuk, K. (2016). Landshaftna struktura pryrodnoho zapovidnyka "Medobory" [Landscape structure of the "Medobory" Nature Reserve]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya heohrafichna [Bulletin of Lviv University. Geographical Series]*, 50, 67–83. [Electronic resource] URL: https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/02/50.1.pdf (access date 15.10.2025) [in Ukrainian].

Hryhora, I.M., & Solomakha, V.A. (2005). Roslynist Ukrainy (ekoloho-tsenotychnyi, floristchnyi ta heohrafichnyi narys) [Vegetation of Ukraine: Ecological-coenotic, floristic and geographical outline]. Kyiv: Fitosotsiotsentr, 452 p. [Electronic resource] URL: https://surl.li/bsjufa (access date 17.10.2025) [in Ukrainian].

DP "Yarmolynetske lisove hospodarstvo" (Satanivske lisnytstvo) State Enterprise "Yarmolynetsk Forestry" (Satanivske Forestry). [Electronic resource] URL: https://dpliss.at.ua/ (access date 02.07.2025) [in Ukrainian].

Minarchenko, V.M., Tymchenko, I.A., Hlushchenko, L.A., & Syvohlaz, L.M. (2008). Metodychni aspekty monitorynhu nederevnykh roslynnykh resursiv [Methodological aspects of monitoring non-woody plant resources]. *Ahroekolohichnyi zhurnal [Agroecological Journal]*, 3, 32–36. [Electronic resource] URL: https://surl.li/ymdxoa (access date 22.07.2025) [in Ukrainian].

Parpan, V.I., & Dmytrash-Vatseba, I.I. (2016). Distribution and population state of *Echinops exaltatus (Asteraceae)* in Southern Opillya. *Ukrainian Botanical Journal*, *73*(5), 483–491. https://doi.org/10.15407/ukrbotj73.05.483 [in Ukrainian].

Stashkiv, I.P., Prokopiak, M.Z., & Drobik, N.M. (2025). Biolohichna kharakterystyka i poshyrennia Echinops exaltatus Schrad. *(Asteraceae)* [Biological characteristics and distribution of Echinops exaltatus *(Asteraceae)*]. Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. Seriia Biolohiia [*Scientific notes of Ternopil National Pedagogical University*], 85(1–2), 82–88. https://doi.org/10.25128/2078-2357.25.1–2.11 [in Ukrainian].

Bitew, H., & Hymete, A. (2019). The Genus *Echinops*: Phytochemistry and Biological Activities: A Review. *Frontiers in Pharmacology*, *10*, 1234. https://doi.org/10.3389/fphar.2019.01234 [in English].

Didukh, Y.P., & Vasheniak, Yu.A. (2018). Vegetation of limestone outcrops in Western and Central Podillia (Ukraine). *Tuexenia*, *38*, 419–444 [in Ukrainian].

Echinops exaltatus Schrader. Flora of North America. [Electronic resource] URL: https://floranorthamerica.org/Echinops_exaltatus (access date 28.09.2025a) [in English].

Echinops exaltatus Schrad. [Electronic resource] URL: https://www.infoflora.ch/en/flora/echinops-exaltatus.html (access date 28.09.2025b) [in English].

Matyashuk, R.K., Pirko, I.F., Hubar, L.M., & Tkachenko, I.V. (2023). Decorative perennials of the regional flora for recreation landscapes in the forest-steppe zone. *Biosystems Diversity*, *31,* 319–326. https://doi.org/10.15421/012337 [in English].

Отримано: 28.10.2025
Прийнято: 24.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 612.3.335
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.2

МОРФОМЕТРИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУДИН МІКРОГЕМОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА СЛИЗОВОЇ ОБОЛОНКИ ТОВСТОЇ КИШКИ ПРИ УРАЖЕННІ ПІДДОСЛІДНИХ ТВАРИН ТЕТРАХЛОРМЕТАНОМ

Л. М. Головатюк[1], О. В. Кратко[2], Т. О. Головатюк[3]

У статті досліджено структурні зміни судин мікрогемоциркуляторного русла слизової оболонки товстої кишки при токсичному гепатиті індукованому тетрахлорметаном. Токсичне ураження піддослідних тварин тетрахлорметаном призводить до пошкодження печінки, розвитку гепатиту, яке супроводжується вираженими змінами у будові судин шлунково-кишкового тракту. Дослідження проводилось на білих статевозрілих щурах-самцях. За допомогою морфологічних методів було вивчено мікрогемоциркуляторне русло слизової оболонки товстої кишки при токсичному гепатиті. Токсичний гепатит був змодельований шляхом внутрішньошлункового введення чотирихлористого вуглецю. Дослідження проводились на 2-у, 7-у та 14-у добу експерименту. При морфометричному вивченні мікрогемоциркуляторного русла визначали діаметр артеріол, прекапілярів, капілярів, посткапілярів, венул, а також щільність судиного русла на 1 мм^2 тканини. В результаті дослідження виявлено, що токсичне ураження печінки, спричинене тетрахлорметаном, супроводжується вираженими морфометричними змінами в судинах мікрогемоциркуляторного русла слизової оболонки товстої кишки піддослідних тварин. Найбільш виражені структурні зміни даної оболонки товстої кишки спостерігались на 7-у добу експерименту. Експериментально встановлено, що артеріальна частина мікрогемоциркуляторного русла (артеріоли, прекапіляри та капіляри) м'язової оболонки товстої кишки в умовах змодельованої патології звужувалася. Венозна частина мікрогемоциркуляторного русла (посткапіляри, венули) істотно розширювалася. Це свідчило про розвиток спастичних реакцій, порушення мікроциркуляції та гіпоксію тканин. В уражених тварин у товстій кишці спостерігався набряк строми оболонок, нечіткі межі клітин, тьмяна та зерниста цитоплазма, спостерігалось повнокрів'я судин,

[1] кандидат біологічних наук,
доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання
(Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, м. Кременець)
e-mail: liudmylam[1]@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2099-145X
[2] кандидат історичних наук,
доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання
(Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, м. Кременець)
e-mail: kratkoolya@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2708-4684
[3] лікар-методист
(КНП «Тернопільська обласна клінічна лікарня» Тернопільської обласної ради, м. Тернопіль)
e-mail: tanua191992@gmail.com.
ORCID: 0009-0001-5460-813X

крововиливи, дистрофічні зміни епітеліоцитів, інфільтрати. Також, виявлено зниження кількості капілярів на одиницю площі тканини, що є ознакою ішемії.

Ключові слова: *слизова оболонка, товста кишка, мікрогемоциркуляторне русло, токсичний гепатит, щури.*

MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE VESSELS OF THE MICROHEMOCIRCULATORY BED OF THE COLONIC MUCOSA IN EXPERIMENTAL ANIMALS EXPOSED TO CARBON TETRACHLORIDE

L. M. Holovatiuk, O. V. Kratko, T. O. Holovatiuk

The article investigates structural changes in the microcirculatory vessels of the colonic mucosa in toxic hepatitis induced by carbon tetrachloride. Toxic damage to experimental animals by carbon tetrachloride leads to liver damage and the development of hepatitis, which is accompanied by pronounced changes in the structure of the gastrointestinal tract vessels. The study was conducted on white sexually mature male rats. The microcirculatory vessels of the colonic mucosa in toxic hepatitis were studied using morphological methods. Toxic hepatitis was simulated by intragastric administration of carbon tetrachloride. The studies were conducted on the 2nd, 7th and 14th days of the experiment. During the morphometric study of the microcirculatory vessels, the diameter of arterioles, precapillaries, capillaries, postcapillaries, venules, as well as the density of the vascular bed per 1 mm^2 of tissue were determined.

As a result of the study, it was found that toxic liver damage caused by carbon tetrachloride is accompanied by pronounced morphometric changes in the vessels of the microhemocirculatory bed of the colon mucosa of experimental animals. The most pronounced structural changes in this colon mucosa were observed on the 7th day of the experiment. It was experimentally established that the arterial part of the microhemocirculatory bed (arterioles, precapillaries and capillaries) of the muscular coat of the colon narrowed under conditions of simulated pathology. The venous part of the microhemocirculatory bed (postcapillaries, venules) significantly expanded. This indicated the development of spastic reactions, impaired microcirculation and tissue hypoxia. In the affected animals, the colon showed edema of the stroma of the membranes, indistinct cell boundaries, dim and granular cytoplasm, vascular hyperemia, hemorrhages, dystrophic changes in epithelial cells, and infiltrates. Also, a decrease in the number of capillaries per unit area of tissue was detected, which is a sign of ischemia.

Key words: *mucosa, colon, microhemocirculatory system, toxic hepatitis, rats.*

Вступ

Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, захворювання органів травлення входять до числа найпоширеніших у світі, поступаючись лише патологіям серцево-судинної системи та онкологічним хворобам Поширенню цих захворювань сприяє низка несприятливих чинників, серед яких – порушення режиму та якості харчування, забруднення довкілля, зловживання лікарськими препаратами, підвищення рівня наркоманії й алкоголізму, а також інтенсивна хімізація різних сфер людської діяльності.

Згідно із сучасними уявленнями, результатом токсичного впливу на організм людей і тварин різних хімічних речовин може бути неспецифічний за більшістю клінічних та біохімічних проявів синдром ендогенної інтоксикації (ЕІ), який характеризується невідповідністю між утворенням і виведенням як продуктів нормального обміну, так і речовин патологічно зміненого метаболізму (Дмухальська і Корда, 2021). Під впливом ендогенної інтоксикації розвиваються запальні процеси в організмі (Григор'єва, 2023). Насамперед уражається печінка, яка виконує ключові функції, в тому числі й детоксикуючу.

Однією з найбільш вивчених моделей токсичного ураження печінки в експерименті є застосування тетрахлорметану, який індукує гострий токсичний гепатит. При цьому патологічний процес не обмежується лише ураженням гепатоцитів, а поширюється також на інші органи травної системи. Зокрема, зміни спостерігаються у кишечнику. У цьому контексті надзвичайно важливим є дослідження змін мікрогемоциркуляторного русла товстої кишки, оскільки порушення місцевої мікроциркуляції здатне провокувати розвиток вторинних

дистрофічних і запальних процесів, а також дисфункція кишкового бар'єра. (Татарчук, 2018).

Проблематика токсичного ураження печінки та його системного впливу на організм останніми роками набуває дедалі більшої уваги вітчизняних та зарубіжних науковців. у численних дослідженнях описано структурно-функціональні зміни в органах травлення при токсичному гепатиті. Доведено, що ураження печінки, спричинене тетрахлорметаном, супроводжується не лише пошкодженням гепатоцитів, але й порушенням мікрогемоциркуляції в різних відділах шлунково-кишкового тракту (Процайло та ін, 2022; Гнатюк та ін., 2022).

На сьогодні морфометричні особливості судин мікрогемоциркуляторного русла слизової оболонки товстої кишки при токсичному ураженні печінки досліджені недостатньо. Особливо це стосується умов токсичного гепатиту, індукованого тетрахлоретаном. У зв'язку з цим актуальним є проведення морфометричного аналізу змін мікросудин товстої кишки в умовах токсичного ураження печінки. Таке дослідження дозволяє не лише виявити ранні патоморфологічні маркери мікроциркуляторних порушень, а й визначити потенційні напрямки для їхньої корекції, що є важливим для розробки ефективних стратегій (Гнатюк та ін., 2020).

У цьому контексті актуальним є морфометричний аналіз змін мікросудин товстої кишки при токсичному ураженні печінки».

Метою дослідження є аналіз мікросудин слизової оболонки товстої кишки при токсичному гепатиті в умовах експериментального ураження тетрахлорметаном у піддослідних тварин.

Завдання дослідження: визначити діаметри артеріол, прекапілярів, капілярів, посткапілярів та венул слизової оболонки товстої кишки, а також щільність судин мікрогемоциркуляторного русла у інтактних тварин; визначити діаметри судин мікрогемоциркуляторного русла слизової оболонки товстої кишки на 2-у, 7-у та 14-у доби експерименту; проаналізувати одержані дані.

Матеріал і методи

У ході дослідження було проаналізовано морфологію слизової оболонки товстої кишки у 20 білих статевозрілих самців щурів. Тварини були розподілені на чотири експериментальні групи по п'ять тварин у кожній. Перша група (контрольна) складалася з клінічно здорових тварин, які утримувалися в стандартних умовах віварію без втручань. Друга група включала щурів із експериментально індукованим токсичним гепатитом, евтаназованих на другу добу після початку експерименту. У третю групу входили тварини з аналогічною моделлю ураження, евтаназовані на сьому добу досліду. Четверта група складалася з щурів, евтаназованих на чотирнадцяту добу після моделювання токсичного ураження печінки. Такий розподіл дозволив простежити динаміку змін у структурі товстої кишки залежно від тривалості патологічного процесу.

Модель токсичного гепатиту у щурів реалізовували шляхом внутрішньошлункового введення 50% розчину тетрахлорметану (CCl_4), розведеного в оливковій олії у співвідношенні 1:1. Евтаназію тварин здійснювали шляхом кровопускання після попереднього введення наркозу, індукованого тіопентал-натрієм. Для вивчення мікрогемоциркуляторного русла товстої кишки проводили ін'єкцію судин туш-желатиновою масою. Після фіксації виконували просвітлення препаратів, що дозволяло візуалізувати судинну мережу.

Статистична обробка проведена за допомогою програми Excel та пакету програм "Statistica 6,0" (Stat Soft, США) на персональному комп'ютері типу IBM.

Результати

У результаті детального морфометричного дослідження встановлено, що токсичне ураження печінки супроводжується вираженими змінами структурних компонентів судинної мережі слизової оболонки товстої кишки. Виявлені порушення свідчать про ремоделювання мікросудин, що може бути патогенетичною ланкою розвитку кишкових порушень при токсичному гепатиті (табл. 1).

Всестороннім аналізом показаних в таблиці 1 морфометричних показників слизової оболонки товстої кишки при токсичному гепатиті встановлено, що зміни спостерігалися на 2-у добу експерименту. Так, діаметр артеріол товстої кишки зменшився на 6,0 %. Подібні зміни відзначено у досліджуваних морфометричних параметрах прекапілярів у змодельованих патологічних умовах. Так, діаметр прекапілярів у слизовій оболонці товстої кишки зменшився на 3,8 %. Діаметри капілярів у даних експериментальних умовах також зменшувалися на 4,1 %. Посткапіляри слизової оболонки товстої кишки на 2-у добу токсичного гепатиту розширювалися на 7,56 %. Венули слизової

Таблиця 1

Морфометрична характеристика судин мікрогемоциркуляторного русла слизової оболонки товстої кишки при токсичному гепатиті (M±m)

Діаметр досліджуваних структур, мкм	**Група спостережень**			
	Контрольна	**2-а доба**	**7-а доба**	**14-а доба**
Артеріоли	18,20±0,33	17,10±0,30*	15,90±0,22**	16,50±0,22*
Прекапіляри	10,60±0,15	10,20±012*	9,40±0,12**	9,70±0,15*
Капіляри	5,80±0,09	5,56±0,09	5,30±0,02**	5,45±0,15**
Посткапіляри	11,90±0,15	12,80±0,18*	13,50±0,18**	12,90±0,15**
Венули	26,40±0,51	28,90±0,54*	30,40±0,54**	29,10±0,51*
Щільність судин мікрогемо-циркуляторного русла	3380,5±74,40	3237,2±63,30	3160,0±57,60	3241,8±63,90

Примітки: 1.– p<0,05; 2.**– p<0,01; 3.***– p<0,001 – величини, що статистично достовірно відрізняються від контрольних.*

оболонки досліджуваного органа також розширилися на 9,46 %. Число судин мікрогемоциркуляторного русла на 1 мм² слизової оболонки товстої кишки в умовах змодельованої патології зменшилося на 4,2 % порівняно з аналогічним контрольним.

На 7-у добу досліду морфометричні параметри судин мікрогемо-циркуляторного русла були змінені у більшому ступені. В досліджуваних експериментальних умовах діаметр артеріол зменшився на 12,6 %. Діаметр прекапілярів слизової оболонки товстої кишки знизився на 11,3 %. Обмінна ланка мікрогемоциркуляторного русла (капіляри) в умовах змодельованої патології також зменшилися на 8,6 %, тобто виявилися спазмованими. Виносна ланка гемомікроциркуляторного русла (посткапіляри, венули) слизової оболонки товстої кишки на 7-у добу токсичного гепатиту розширювалися. Так, діаметр посткапілярів збільшився на 13,4 %. Діаметр венул при цьому зріс на 15,1 %. В товстій кишці, що супроводжувалося порушенням кровопостачання, про що свідчило зниження кількості судин мікрогемоциркуляторного русла на 1 мм² слизової оболонки досліджуваного органа. Встановлено, що при цьому вказаний морфометричний параметр зменшився на 6,5 %.

На 14-у добу токсичного гепатиту морфологічні параметри мікрогемоциркуляторного русла слизової оболонки товстої кишки змінювалися у меншому ступені порівняно із 7-и добовим дослідженням. Так, в даний період експерименту діаметр артеріол слизової оболонки виявився меншим на 9,3 % порівняно з аналогічним контрольним. Діаметр прекапілярів слизової оболонки товстої кишки виявився меншим на 8,5 % порівняно з аналогічним контрольним, на 3,2 % більшим порівняно з попередньою групою. Діаметр капілярів слизової оболонки товстої кишки зменшився на 6,0 % порівняно з таким самим контрольним параметром. Досліджуваний морфометричний показник був також на 2,8 % більшим за аналогічний параметр попередньої групи (7-ми добовий гепатит). В умовах експерименту посткапіляри слизової оболонки товстої кишки розширювалися на 8,4 % порівняно з тими ж параметрами контрольної групи, а венули – на 10,2 %.

Обговорення

У публікаціях останнього десятиріччя підкреслюється важливість регіонарних мікроциркуляторних порушень як ключового механізму розвитку кишкової дисфункції (Whitmarsh et al., 2024). Дослідники зазначають, що гіпоксія та ішемія, зумовлені мікросудинними порушеннями, відіграють провідну роль у запуску вторинних дистрофічно-запальних процесів у слизовій оболонці товстої кишки. Морфометричний аналіз мікросудин дозволяє кількісно оцінити вираженість порушень, що має важливе діагностичне та прогностичне значення (Reunamo et al., 2025).

Водночас більшість досліджень зосереджені переважно на вивченні змін у печінці, тоді як морфофункціональні аспекти стану судин мікрогемоциркуляторного русла товстої кишки при токсичному гепатиті вивчені недостатньо. Це створює необхідність у проведенні комплексних досліджень, які б розкрили патогенетичні зміни на тканинному рівні в умовах системного токсичного впливу.

У численних дослідженнях доведено, що тетрахлорметан, як хлорований вуглеводень, спричиняє гепатоцелюлярне пошкодження, розвиток оксидативного стресу, порушення мікроциркуляції та системної інтоксикації організму (Тупол, 2015). Зміни у системі мікрогемоциркуляції при токсичних гепатитах набувають дедалі більшої уваги дослідників (Гнатюк та ін., 2020), адже мають системний характер і впливають на функціональний стан органів-мішеней (Григор'єва, 2023).

У дослідженнях показано системні зміни у внутрішніх органах при рубцевій цирозній трансформації печінки легені, підшлункова залоза, селезінка, нирки. Це вказує, що токсичне ураження печінки має міжсистемний ефект (Xiang et al., 2022). Науковцями детально описано механізм дії CCl_4, роль цитохрому Р450, утворення активних радикалів та їхній вплив на клітинні структури та індукцію апоптозу (Головенко, 2025). Це – основа для розуміння морфофізіологічних змін на судинному рівні (Frank et al., 2020). Дослідження морфометричних змін судин мікрогемоциркуляторного русла слизової оболонки товстої кишки при токсичному гепатиті**,** індукованому тетрахлорметаном, є важливим для науки, оскільки дає змогу детальніше розкрити патогенетичні зв'язки між печінкою та кишками (Татарчук, 2018).

Висновки

У результаті дослідження встановлено, що токсичне ураження печінки, індуковане тетрахлорметаном, супроводжується значними морфометричними змінами у судинах мікрогемоциркуляторного русла м'язової оболонки товстої кишки у піддослідних тварин. Найбільш інтенсивні порушення спостерігалися на сьомий день експерименту: артеріальна ланка (артеріоли, прекапіляри та капіляри) зменшилася, тоді як венозна частина (посткапіляри та венули) розширилася. Ці зміни вказують на розвиток спастичних реакцій, порушення мікроциркуляції та прогресування тканинної гіпоксії.

Додатково зафіксовано зниження кількості капілярів на одиницю площі тканини, що свідчить про ішемічні процеси. Отримані дані дають підстави вважати, що такі судинні зміни в товстій кишці є одним із ключових патогенетичних механізмів розвитку кишкової дисфункції на тлі печінкової патології. Застосовані кількісні морфометричні методи аналізу та отримані результати можуть слугувати інструментом для оцінки ступеня змін досліджуваного органа в морфологічних лабораторіях і при вивченні його будови.

Список використаної літератури

Гнатюк М.С., Татарчук Л.В., Гданська Н.М., Монастирська Н.Я. Кількісні морфологічні аспекти вивчення особливостей структурної перебудови судин гемомікроциркуляторного русла шлуночків серця в умовах пострезекційної портальної гіпертензії *Здобутки клінічної і експериментальної медицини.* 2022. №1. С. 70–74. https://doi.org/10.11603/1811-2471.2022.v.i1.12991

Гнатюк М.С., Процайло О.М., Татарчук Л.В. Особливості кількісних морфофункціональних змін артерій товстої кишки при резекція об'ємів паренхіми печінки. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини.* 2020. №3. С. 66–71. https://doi.org/10.11603/1811-2471.2020.v.i3.11391

Головенко М.Я. Модернізація класифікації цитохромів Р-450 на основі структурно-функціонального підходу. *Медична та клінічна хімія.* 2025. № 2. С. 5–17. https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2025.i2.15520

Григор'єва Н.П. Вплив тетрахлорметанової інтоксикації на активність антиоксидантних ферментів у нирках щурів за умов зміненого фотоперіоду (автореферат / дисертація). Чернівці: Буковинський державний медичний університет; 2023. [Електронний ресурс]. URL: https://dspace.bsmu.edu.ua/handle/123456789/20933 (дата звернення 10.08.2025).

Дмухальська Є.Б., Корда М.М. Вікові особливості змін показників ендогенної інтоксикації і стан мембран за дії важких металів та гліфосату. *Мед. та клініч. хімія.* 2021. № 4 (4). С. 22–29. https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2021.i4.12729

Процайло О.М., Гнатюк М.С., Татарчук Л.В. Морфометричне вивчення особливостей ремоделювання структур товстої кишки в умовах пострезекційної портальної гіпертензії. *Здобутки клінічної та експериментальної медицини.* 2022. № 3. С. 78–82. https://doi.org/10.11603/1811-2471.2022.v.i3.13292

Татарчук Л.В. Кількісна морфологічна оцінка структурної перебудови артерій порожньої кишки при пострезекційній портальній гіпертензії. *Вісник наукових досліджень.* 2018. № 1. С. 136–140. https://doi.org/10.11603/2415-8798.2018.1.8757

Тупол Л.Д. Структурні та морфометричні зміни печінки при експериментальній термічній травмі. Вісник наукових досліджень ТДМУ. 2015. № 1. С. 114–115. https://doi.org/10.11603/2415-8798.2015.1.4600

Frank D., Ofir R., Zolotarov L. etc. Inducing acute liver injury in rats via carbon tetrachloride (CCl_4) exposure through an orogastric tube. Journal of Visualized Experiments. 2020. Vol. 159. P. 580–582. https://doi.org/10.3791/60695.

Reunamo A., Hannula M., Virta J., Kurppa K., Lindfors K., Hyttinen J. X-ray microtomography imaging enables accurate visualization and quantification of the small-intestinal villi microvasculature: – celiac disease as a model. Microvascular Research. 2025. Vol. 158. P. 350–358. https://doi.org/10.1016/j.mvr.2025.104782.

Whitmarsh T., Cope W., Carmona-Bozo J., Manavaki R., Sammut S-J., Woitek R., Provenzano E., Brown E. L., Bohndiek S. E., Gallagher F. A., Caldas C., Gilbert F. J., Markowetz F. Quantifying the tumour vasculature environment from CD-31 immunohistochemistry images of breast cancer using deep learning based semantic segmentation. Breast Cancer Research. 2025. Vol. 27(1). P. 17–24. https://doi.org/10.1186/s13058-024-01950-2.

Xiang H., Liu Z., Xiang H., Xiang D., Xiao S., Xiao J., Shen W., Hu P., Ren H., Peng M. Dynamics of the gut–liver axis in rats with varying fibrosis severity. International Journal of Biological Sciences. 2022. Vol. 18, No. 8. P. 3390–3404. https://doi.org/10.7150/ijbs.69833.

References

Hnatiuk, M.S., Tatarchuk, L.V., Hdanska, N.M., & Monastyrska N.Ya. (2022). Kilkisni morfolohichni aspekty vyvchennia osoblyvostei strukturnoi perebudovy sudyn hemomikrotsyrkuliatornoho rusla shlunochkiv sertsia v umovakh postrezektsiinoi portalnoi hipertenzii [Several morphological aspects of the study of the peculiarities of the structural remodeling of the hemomicrocirculatory vessels of the heart valves in conditions of post-resection portal hypertension]. *Zdobutky klinichnoi i eksperymentalnoi medytsyny [Achievements of clinical and experimental medicine],* 1, 70–74. https://doi.org/10.11603/1811-2471.2022.v.i1.12991 [in Ukrainian].

Hnatiuk, M.S., Protsailo, O.M., & Tatarchuk, L.V. (2020). Osoblyvosti kilkisnykh morfofunktsionalnykh zmin arterii tovstoi kyshky pry rezektsiia obiemiv parenkhimy pechinky [Peculiarities of multiple morphofunctional changes in the colonic artery during resection of liver parenchyma volumes]. *Zdobutky klinichnoi i eksperymentalnoi medytsyny [Achievements of clinical and experimental medicine],* 3, 66–71. https://doi.org/10.11603/1811-2471.2020.v.i3.11391 [in Ukrainian].

Golovenko, M.Ya. (2025). Modernizaciya klasifikaciyi citohromiv R-450 na osnovi strukturno-funkcionalnogo pidhodu. [Modernization of the classification of cytochromes P-450 based on the structure-function approach]. *Medichna ta klinichna himiya [Medical and clinical chemistry],* 2, 5–17. https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2025.i2.15520 [in Ukrainian].

Grigor'yeva, N.P. (2023). Vpliv tetrahlormetanovoyi intoksikaciyi na aktivnist antioksidantnih fermentiv u nirkah shuriv za umov zminenogo fotoperiodu (avtoreferat / disertaciya) [The effect of carbon tetrachloride intoxication on the activity of antioxidant enzymes in the kidneys of rats under conditions of altered photoperiod]. Chernivci: Bukovinskij derzhavnij medichnij universitet; DSpace BDMU. [Electronic resource] URL: https://dspace.bsmu.edu.ua/handle/123456789/20933 (access date 10.08.2025) [in Ukrainian].

Dmuhalska, Ye.B. (2021). Vikovi osoblivosti zmin pokaznikiv endogennoyi intoksikaciyi i stan membran za diyi vazhkih metaliv ta glifosatu [Age-related changes in endogenous intoxication indicators and the state of membranes under the influence of heavy metals and glyphosate] *Med. ta klinich. himiya.* [in Ukrainian]. *[Medical and clinical chemistry],* 4, 22–29. https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2021.i4.12729 [in Ukrainian].

Protsailo, O.M., Hnatiuk, M.S., & Tatarchuk, L.V. (2022). Morfometrychne vyvchennia osoblyvostei remodeliuvannia struktur tovstoi kyshky v umovakh postrezektsiinoi portalnoi hipertenzii [Morphometric study of the features of remodeling of colon structures in conditions of post-resection portal hypertension]. *Zdobutky klinichnoi ta eksperymentalnoi medytsyny [Achievements of clinical and experimental medicine],* 3, 78–82. https://doi.org/10.11603/1811-2471.2022.v.i3.13292 [in Ukrainian].

Tatarchuk, L.V. (2018). Kilkisna morfolohichna otsinka strukturnoi perebudovy arterii porozhnoi kyshky pry postrezektsiinii portalnii hipertenzii [Quantitative morphological assessment of structural rearrangement of jejunal arteries in post-resection portal hypertension]. *Visnyk naukovykh doslidzhen*

[Bulletin of Scientific Research.], 1, 136–140. https://doi.org/10.11603/2415-8798.2018.1.8757 [in Ukrainian].

Tupol, L.D. (2015). Strukturni ta morfometrychni zminy pechinky pry eksperymentalnii termichnii travmi [Strukturni ta morfometrychni zminy pechinky pry eksperymentalnii termichnii travmi]. *Visnyk naukovykh doslidzhen TDMU [Summary of scientific research TDMU],* 1, 114–115. https://doi.org/10.11603/2415-8798.2015.1.4600 [in Ukrainian].

Frank, D., Ofir, R., & Zolotarov, L. (2020). Inducing acute liver injury in rats via carbon tetrachloride (CCl_4) exposure through an orogastric tube. *Journal of Visualized Experiments,* 159, 580–582. https://doi.org/10.3791/60695 [in English].

Reunamo, A., Hannula, M., Virta, J., Kurppa, K., Lindfors, K., & Hyttinen, J. (2025). X-ray microtomography imaging enables accurate visualization and quantification of the small-intestinal villi microvasculature: – celiac disease as a model. Microvascular Research, 158, 350–358. https://doi.org/10.1016/j.mvr.2025.104782 [in English].

Whitmarsh, T., Cope, W., Carmona-Bozo, J., Manavaki, R., Sammut, S-J., Woitek, R., Provenzano, E., Brown, E.L., Bohndiek, S.E., Gallagher, F.A., Caldas, C., Gilbert, F.J., & Markowetz, F. (2025). Quantifying the tumour vasculature environment from CD-31 immunohistochemistry images of breast cancer using deep learning based semantic segmentation. Breast Cancer Research, 27(1), 17–24. https://doi.org/10.1186/s13058-024-01950-2 [in English].

Xiang, H., Liu, Z., Xiang, H., Xiang, D., Xiao, S., Xiao, J., Shen, W., Hu, P., Ren, H., & Peng, M. (2022). Dynamics of the gut–liver axis in rats with varying fibrosis severity. *International Journal of Biological Sciences*, 18 (8), 3390–3404. https://doi.org/10.7150/ijbs.69833 [in English].

Отримано: 28.10.2025
Прийнято: 19.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 632.95:632.937
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.3

ВПЛИВ ФУНГІЦИДІВ НА СМЕРТНІСТЬ ХИЖОГО КЛОПА *MACROLOPHUS PYGMAEUS*

А. Г. Гонтар[1], Т. С. Шарамок[2]

Інтегрований метод захисту пасльонових культур у теплицях передбачає комплекс заходів із використання корисних комах хижого клопа Macrolophus pygmaeus для боротьби зі шкідниками та пестицидів для боротьби із захворюваннями рослин. У статті наведено результати оцінки впливу чотирьох фунгіцидів на смертність імаго й німф Macrolophus pygmaeus у лабораторних умовах. Обробку здійснювали препаратами на основі сульфату міді, бупримату, пропамокарбу з фосетилом алюмінію, а також біопрепаратом Trichoderma harzianum. Метою дослідження було надання рекомендацій щодо використання фунгіцидів у виробничих і лабораторних умовах на основі визначених результатів летальних ефектів на корисного клопа Macrolophus pygmaeus. За результатами проведених експериментів до найбезпечніших для Macrolophus pygmaeus фунгіцидів належать такі препарати. Біологічний засіб на основі Trichoderma harzianum продемонстрував найнижчі показники смертності: на 7-й день після обробки загибель німф становила 18,4%, а імаго – 19,4%. Подібний рівень безпечності показав препарат на основі пропамокарбу гідрохлориду й фосетилу алюмінію, який спричинив 18,4% смертності німф V стадії розвитку та 19,8% смертності імаго. Це дає змогу зарахувати ці препарати до нешкідливих і рекомендувати їх до застосування у виробничих умовах у біолабораторіях і теплицях, навіть при контактному внесенні.

Діюча речовина буприматна 7-й день після обробки спричиняє смертність імаго на рівні 19,8% і німф – 46,8%, що робить його помірно токсичним для молодого покоління хижого клопа при контактному внесенні й має бути обережно використано у виробничих умовах або навіть виключено з обробки задля зниження ризику загибелі популяції корисних комах Macrolophus pygmaeus. Мінеральний фунгіцид – сульфат міді – продемонстрував виражений негативний вплив на Macrolophus pygmaeus. На 7-й день після обробки смертність імаго становила 31%, а смертність німф V стадії досягала 51,6% із подальшим зростанням накопиченої летальності впродовж часу. Це свідчить про продовжений ефект токсичної дії цього фунгіциду після обробки й відсутність деградації діючої речовини під час впливу на комах. Використання цього препарату є токсичним при контактному внесенні на корисних комах і має інсектицидний ефект, тому його застосування має бути обережним.

[1] аспірант кафедри загальної біології та водних біоресурсів
(Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро)
e-mail: a.hontar@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3761-798X
[2] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
завідувач кафедри загальної біології та водних біоресурсів
(Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро)
e-mail: sharamok@i.ua
ORCID: 0000-0003-3523-5283

Таким чином, отримані дані дають змогу класифікувати Trichoderma harzianum і пропамокарб +фосетил алюмінію як сумісні Macrolophus pygmaeus, тоді як бупіримат і сульфат міді мають бути застосовані з обережністю або виключені з програм біозахисту.

Ключові слова: *Macrolophus pygmaeus, Trichoderma harzianum, сульфат міді, побічні ефекти, фунгіцид.*

THE IMPACT OF FUNGICIDES ON THE MORTALITY OF THE PREDATORY BUG *MACROLOPHUS PYGMAEUS*

A. H. Hontar, T. S. Sharamok

The integrated protection strategy for solanaceous crops in greenhouses involves a combination of measures that include the use of beneficial insects –specifically the predatory bug Macrolophus pygmaeus – for pest control, as well as pesticides for managing plant diseases. This article presents the results of an assessment of four fungicides and their effects on the mortality of Macrolophus pygmaeus adults and nymphs under laboratory conditions. The treatments included copper sulfate, bupirimate, propamocarb combined with aluminium fosetyl, and the biological agent Trichoderma harzianum. The aim of this study was to provide recommendations for the application of fungicides in production and laboratory settings, based on the observed lethal effects on the beneficial predator Macrolophus pygmaeus.

According to the experimental results, the safest fungicides for Macrolophus pygmaeus were the following. The biological product based on Trichoderma harzianum showed the lowest mortality rates: on day 7 after treatment, nymph mortality reached 18.4%, while adult mortality was 19.4%. A similar level of safety was observed for the formulation containing propamocarb hydrochloride and aluminium fosetyl, which caused 18.4% mortality in fifth-instar nymphs and 19.8% mortality in adults. These results allow both products to be classified as non-harmful and suitable for use under production conditions in biolaboratories and greenhouses, even when applied by contact.

The active ingredient bupirimate caused 19.8% adult mortality and 46.8% mortality in fifth-instar nymphs on day 7 after treatment. This indicates moderate toxicity for younger developmental stages during contact exposure. Therefore, its application should be used with caution in production, or potentially excluded, to reduce the risk of population loss of the beneficial predator Macrolophus pygmaeus.

The mineral fungicide copper sulfate demonstrated a pronounced negative effect on Macrolophus pygmaeus. By day 7 after treatment, adult mortality reached 31%, while mortality of fifth-instar nymphs increased to 51.6%, with cumulative lethality continuing to rise over time. This indicates a prolonged toxic effect of the fungicide after application and the absence of degradation of the active substance during exposure. Its use is therefore considered highly toxic to beneficial insects under contact application and shows an insecticidal effect, meaning it must be applied with extreme caution.

In summary, the findings classify Trichoderma harzianum and propamocarb + aluminium fosetyl as compatible with Macrolophus pygmaeus, whereas bupirimate and copper sulfate should be used with caution or excluded from biological protection programs.

Key words: *Macrolophus pygmaeus, Trichoderma harzianum, copper sulfate, side effects, fungicide.*

Вступ

Інтегрований метод захисту рослин томатів, перців та огірків від шкідників у теплицях передбачає комплекс заходів із використання корисних комах Macrolophus pygmaeus як природного ворога шкідників.

Macrolophus pygmaeus Rambur, 1839 (макролофус пігмеус) – хижак, родом із середземноморського регіону. Завдяки своєму потенціалу він комерційно масово розведений та успішно випущений у середземноморських країнах (Martinou & Wright, 2019). Сьогодні широко використовується в теплицях Європи. Macrolophus pygmaeus є поліфагом (Sanchez et al., 2018) та основним інструментом у біологічній боротьбі з Tuta absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae), білокрилками (Trialeurodes vaporariorum, Bemisia tabaci) як шкідниками томатів, трипсами (Frankliniella occidentalis) і павутинними кліщами (Tetranychus urticae), попелицями при захисті перців та огірків. При відсутності жертв живиться соком рослин (Urbaneja et al., 2009, Martinou et al., 2014). Іноді для захисту томатів використовують й інші види макролофуса, наприклад Нубіус (Alimbekova, 2021).

При використанні хижого клопа Macrolophus pygmaeus в інтегрованій системі захисту культур виникає два фактори,

що знижують ефективність цього методу захисту культур. Перший фактор полягає в складності процесу виробництва хижих клопів, що відображається в потребі поєднання рослинного субстрату для розмноження й умов утримання, який часто уражається хворобами рослин. До таких рослин належать томат (Solanum lycopersicum), баклажан (Solanum melongena), тютюн звичайний (Nicotiana tabacum), квасоля стручкова (Phaseolus vulgaris), календула (Calendula officinalis) тощо (Lykouressis et al., 2001).

Другий фактор виникає на етапі використання цього агента в теплицях для захисту рослин, де на ефективність його роботи впливає вже наявна технологія вирощування та система захисту рослин від шкідників і хвороб. На цьому етапі має відбутися інтеграція природних ворогів і використання пестицидів.

Однак суттєвою перешкодою в технології вирощування Macrolophus pygmaeus на рослинному субстраті є розповсюдження захворювань рослин, які спричиняють утрати біоматеріалу й суттєве зниження ефективності вирощування хижих клопів. Такими хворобами є борошниста роса (Erysiphe spp.), сіра гниль (Botrytis cinerea) та інші грибкові захворювання.

Для контролю й зупинки поширення грибкових патогенів використовують фунгіциди різного походження – біологічного, мінерального та хімічного. У виробничих умовах, у теплицях, фунгіциди при вирощуванні томатів уносять багаторазово, у період росту рослин, який збігається з періодом випуску Macrolophus pygmaeus (Perdikis et al., 2015), що також шкодить розвитку хижаків.

Галузь овочівництва в Україні займає важливу ланку в продовольчій безпеці країни. Загальна площа овочевих культур становить до 400 тис. га. Серед найпоширеніших овочевих культур – томати. За статистикою, у 2021 році площа вирощування томатів становила близько 75 000 га, з них у закритому ґрунті (теплицях) використовується лише 3 тис. га (Державна служба статистики України, 2021).

На томатах проти комплексу грибних і бактеріальних хвороб широко використовують фунгіциди на базі різних діючих речовин. В Україні для використання на томатах захищеного та відкритого ґрунту зареєстровано 71 фунгіцид (Кабінет ..., 2025). Серед них, згідно з класифікацією FRAC (FRAC, 2025), найпоширенішими є препарати на основі міді (група M01) – 11 препаратів, манкоцебу (група M03) – 10 препаратів, 5 препаратів на базі азолів (група 3), 5 стробилуринів (група 11) тощо.

Нині, незважаючи на те що Macrolophus pygmaeus широко використовується, вивчені побічні ефекти невеликої кількості фунгіцидів на швидкість його хижацтва. Застосування фунгіцидів для підвищення ефективності виробництва Macrolophus pygmaeus у біофабриках є актуальною та недослідженою темою, розкриття якої дасть змогу значно підвищити вихід готової продукції та знизити втрати комах від пошкодження рослинного субстрату.

Протягом останніх 20 років вплив пестицидів на корисних комах стає предметом усе більшого числа досліджень, оскільки вимоги до якості й безпеки харчових продуктів посилюються щороку (Haynes, 1988). Однак сьогодні знання про летальні й, головним чином, сублетальні ефекти фунгіцидів на Macrolophus pygmaeus дуже обмежені.

Указане дослідження виконано з метою визначення найбільш безпечних препаратів для боротьби з патогенами в процесах виробництва корисних комах у біолабораторіях групи компаній Bioprotection (виробничі площадки України, Польщі та Казахстану) та актуалізування виробничих протоколів захисту рослин томату, перцю, баклажанів від захворювань рослин у промислових теплицях України та Польщі.

Визначення безпечних пестицидів, сумісних в інтегрованому методі біологічного захисту рослин (IPM), з використанням корисних комах Macrolophus pygmaeus є важливою ланкою в розвитку сучасного овочівництва. Особливо це актуально в умовах посилення екологічних норм використання пестицидів і постійного зростання резистентності шкідників і хвороб.

Фунгіциди можуть бути дуже токсичними для широкого спектру організмів, оскільки вони є біоцидами широкого спектру дії, через те що їх механізм дії часто включає пригнічення клітинного дихання або поділу, які є загальними для всіх організмів. Багато фунгіцидів застосовуються з профілактичною метою, що іноді завдає шкоди замість користі (Sánchez-Bayo, 2021).

У наукових джерелах недостатньо досліджено вплив фунгіцидів на корисних клопів, особливо вплив на всі стадії розвитку цих ентомофагів: яйце, німфи й імаго. Зокрема,

фунгіцид із діючою речовиною хлорокис міді (Copper oxychloride), що використовується на томатах для контролю таких хвороб, як фітофтороз, макроспоріоз, бура плямистість, за даними нідерландської компанії Koppert, є токсичним для дорослих особин енкарзії формози (50–75% загибель) і помірно токсичний для личинок та імаго золотоочки, високотоксичний для перепончатокрилих із сімейства трихограмматид. Проте його токсичність на Macrolophus pygmaeus не вказана. Інший препарат – гідроксид міді, який регулярно застосовується на посівах томатів для боротьби з несправжньою борошнистою росою, теж недостатньо вивчений (Martinou et al., 2014)

Окремі лабораторні експерименти з фунгіцидами (фосетилом алюмінію, азоксистробіном, фенгексамідом і крезоксим-метилом) показали, що вони не мали побічного негативного впливу на хижого квіткового клопа Orius insidiosus (Hemiptera: Anthocoridae (Herrick & Cloyd, 2017)). Застосування фунгіцидів впливає на популяцію грибоїдних кліщів, але також може мати непрямий вплив на хижих кліщів (Acari: Phytoseiidae) (Pozzebon et al., 2010). Проте їх побічна дія на Macrolophus pygmaeus не визначена.

Діюча речовина манкоцеб фунгіциду Mancozeb з групи дітіокарбаматів майже 60 років лідирує у світі серед продажів фунгіцидів. Його використовують для боротьби з різними видами грибів, включаючи представників аскоміцетів, ооміцетів, базидіоміцетів і недосконалих грибів. Захищає томат від таких хвороб, як альтернаріоз, ризоктоніоз, фітофтороз і макроспоріоз. За даними компанії Biobest, справляє слабку токсичність на дорослу особину енкарзії формози та німфу оріуса левігатуса, слабку токсичність на родину афідіїд (Biobest, 2025), але не вказана його дія на Macrolophus pygmaeus.

Фунгіцид із діючою речовиною фосетил алюмінію, що є фосфорорганічною сполукою, є препаратом захисної й лікувальної системної дії, який стимулює захисну реакцію рослини-господаря та викликає синтез фенольних сполук, що відіграють важливу роль у прояві фунгіцидного ефекту. Він вибірковий до ооміцетів, але впливає й на фітопатогени інших класів. Використовується для боротьби на томатах кореневої та прикореневої гнилі, фітофторозів. За даними компанії Biobest, є помірно токсичним на дорослу особину хижого клопа Macrolophus pygmaeus, на німфу хижого клопа Nesidiocoris tenuis і на личинку хижої оси Encarsia Formosa (Biobest, 2025).

Важливо, що, крім прямої дії препаратів, необхідно досліджувати також побічні ефекти летального характеру, що спричинені залишковою дією пестицидів і токсичністю на 5–7 день (тривалість циклу розвитку кожної стадії Macrolophus pygmaeus). Так, результати дослідження інсектицидів показали, що токсична дія інсектицидів на хижих клопів була значно вищою через 72 години після внесення, порівняно з 24 годинами після обробки. При цьому токсична дія інсектицидів не посилювалася зі зростанням концентрації. Виходячи з досягнутого прямого ефекту через 24 години, згідно з класифікацією IOBC, до слаботоксичних інсектицидів можна зарахувати азадирактин, люфенурон, спіносад, лямбдацигалотрин і піретрин, ацетаміприд та абамектин є помірно токсичними. Проте через 72 години впливу лише азадирактин залишається помірно токсичним, а всі інші інсектициди (люфенурон, спіносад, лямбда-цигалотрин і піретрин) є високо токсичними. Залишки інсектицидів віком один і три дні для всіх інсектицидів показують помірно токсичну дію через 24 години після випуску. Залишки діючої речовини пестицидів сім днів після обробки для всіх інсектицидів мають слабший ефект у перші 24 години після випуску, ніж залишки віком один і три дні. Але через 72 години після впливу всі інсектициди, незалежно від часу внесення, є дуже токсичними, оскільки смертність клопів перевищує 75%. Дослідження показало, що екологічно прийнятні інсектициди не є безпечними для ентомофагів (Bažok et al., 2024), хоча певні інсектициди на базі діючої речовини матрин є вибірковими та безпечними для хижака Macrolophus pygmaeus і можуть бути рекомендовані в комплексних програмах управління шкідниками Tuta absoluta (Mohammadi & Valizadegan, 2025).

Це дослідження підкреслює те, що вказана IOBC токсичність пестицидів може відрізнятися залежно від умов унесення, тривалості токсичної дії, стадії розвитку, що підпала під внесення розчину, і додатково вказує на необхідність актуалізації даних токсичності з урахуванням умов використання препаратів.

Потребують поглибленого вивчення також фунгіциди й інсектициди біологічного походження. У дослідженні біологічний препарат інсектицид B. bassiana визнаний слабошкідливим для Macrolophus pygmaeus

(Malekan et al., 2015), а препарати на базі грибка триходерми недостатньо вивчені.

Дослідження демонструє вплив різних типів фунгіцидів на дорослих особин і німф хижого клопа Macrolophus pygmaeus у лабораторних умовах на штучних субстратах, які використовуються для вирощування промислових партій хижаків. Зокрема, поряд із синтетичними фунгіцидами досліджено біологічний препарат Trichoderma harzianum і мідумісний фунгіцид сульфат міді. Отриманий науковий матеріал поповнить знання щодо особливостей боротьби з патогенами рослин під час виробничих процесів у біолабораторіях де вирощується ентомофаг Macrolophus pygmaeus, і дасть змогу підвищити результативність розведення й економічну ефективність.

Матеріал і методи

Лабораторна культура хижих клопів для експерименту відібрана з німф і дорослих особин-імаго Macrolophus pygmaeus, що надана біолабораторією фірми Investbio Sp z o.o. (Краків, Польща). Комах попередньо розводили на стручках квасолі (сорт Faiza, Rijk Zwaan), годуючи кормом, який складається з яєць зернової молі Sitotroga cerealella (Lepidoptera: Pyralidae) у довільному об'ємі (ad libitum) із 3-денним інтервалом. В експерименті використано стручки квасолі спаржевої (Phaseolus vulgaris L.), яка використовується хижими клопами як субстрат для відкладення яєць і живлення вологою під час проведення дослідів.

В експерименті вивчався вплив свіжого розчину пестицидів на хижих клопів Macrolophus pygmaeus при прямому впливі токсичної речовини через контакт із обробленими поверхнями комах і субстрату, без прямого впливу розчину на комах, а лише на субстрат. Вивчали виживаність і смертність імаго та німф і сублетальні поведінкові ефекти.

Перший дослід – аналіз резидуального впливу речовини фунгіцидів на дорослих особин Macrolophus pygmaeus. Дослід передбачав виселення дорослих особин хижака на поверхню стручків, які висохли після нанесення спрею. Другий дослід – хижаків на стадії німф 5 стадії (що не мають здатності літати) виселяли перед застосуванням спрею з токсичною речовиною.

Метою досліджень було вивчення кількісних показників смертності імаго без прямого контакту з розчином пестицидів і смертності німф при прямому контакті (виробничий сценарій, що імітує ситуацію в теплиці).

У дослідах використовувалися імаго, які після збору були поміщені в пластикові ємкості об'ємом 10 л із покритим млиновим газом – сіткою 300 мікрон – з отвором у кришці для вентиляції, що імітувало умови, подібні до виробничих.

Бокси зберігали при температурі 24 ± 1 °C і відносній вологості 60 ± 5%, а також використовувався фотоперіод 16:8 (L:D) год.

Як пестициди використовувалися такі фунгіциди: сульфат міді, превікур енерджі, Trichoderma harzianum, німрод (таблиця 1). У дослідах використані максимально дозволені норми пестицидів для тепличних культур. Як контролю використовувалася дистильована вода. Для приготування робочих розчинів пестицидів застосовували дистильовану воду.

Смертність німф реєструвалася після їх обприскування (контактного впливу) або впливу сухих залишків.

Для проведення експерименту використані спеціальні гроубокси об'ємом 10 л, у кришках котрих зроблені отвори розміром 25*30 см і запаяні вентиляційні сітки, що дають змогу підтримувати мікроклімат і дихання комах.

У кожен із боксів покладено папір і 20 стручків квасолі, після чого була проведена обробка розчином фунгіциду. Розпилення відбувалося за допомогою ручного спускового розпилювача, сопло якого було відрегульоване до положення створення туману й із відстані 0,2 м у бік стручків. Розпилення проводилося до рівномірного змочування та початку стікання капель. Після цього протягом 1 години проводилося просихання боксу при кімнатній температурі в лабораторії до зникнення слідів розчину на стручках.

Після цього відбулося виселення комах: у кожен бокс по 100 дорослих особин хижих клопів. Фіксування летальних ефектів від дії пестицидів проводили на 2 і 7 день після обробки, визначаючи кількість мертвих особин і фіксуючи результати. Також надалі експеримент продовжився для визначення кількості новонароджених німф 1–2 стадії з фіксацією результатів на 20 день після обробки.

Друге дослідження базувалося на вивченні дії прямого контакту комах із розчином фунгіцидів і перорального впливу обробленого корму. Експеримент проводився за схожою методикою. Але для визначення побічної дії пестицидів використовували німф 5-ї стадії розвитку з огляду на відсутність у них крил і мож-

Таблиця 1

Препарати й концентрації, що використані в експерименті

Діюча речовина	**Хімічний клас**	**Спосіб дії**	**Бренд/назва, виробник (країна)**	**Доза, мл (мг)/л**
Пропамокарб гідрохлорид (530 г/л) + фосетил алюмінію (310 г/л)	Карбамати + фосфонати	Системна дія, інгібує розвиток збудників фітофторозу, переноспорозу.	Previkur Energy, Bayer CropScience (Німеччина)	2
Триходерма на зерновій основі	Trichoderma harzianum	Антагонізм до патогенних грибів: конкуренція, мікопаразитизм.	Trichiderma Harzianum, MykoGuardian (Україна)	2000
Сульфат міді – пентагідрат	Мінеральний фунгіцид	Контактна дія, порушує ферментативні процеси в клітинах грибів і бактерій.	Copper sulfate, Warchem, (Польща)	200–500
Бупіримат (250g/l)	Піримідин	Системна дія, пригнічує спороношення й розвиток міцелію грибів.	Nimrod, ADAMA (Ізраїль)	1,2

ливості літати під час унесення препарату під час досліду. У пластиковий бокс, що описаний вище, було покладено папір і по 20 стручків квасолі. Після цього відбулося розпорошення корму та виселення 100 німф хижих клопів. Після виселення провели обробку квасолі й німф розчинами пестицидів, змочуючи їх рівномірно. Фіксування летальних ефектів проводили на 2 і 7 день після обробки, підраховуючи кількість мертвих особин.

У кожному експерименті проводилося 5 паралельних повторень. Для оцінки впливу фунгіцидів на смертність імаго та німф п'ятої стадії розвитку Macrolophus pygmaeus використано однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA). Статистичні розрахунки виконувалися з використанням пакету статистичного аналізу програмного забезпечення Excel. У ході дослідження оцінено вплив чотирьох фунгіцидів на смертність імаго Macrolophus pygmaeus на сьомий день після обробки. Статистичний аналіз включав перевірку припущень для застосування дисперсійного аналізу. У всіх дослідних групах рівень значущості був більшим за 0,05, що свідчить про відповідність даних нормальному розподілу.

Результати

У дослідженні остаточного (резидуального) впливу фунгіцидів на смертність імаго Macrolophus pygmaeus оцінювали вплив п'яти варіантів обробки (чотири фунгіциди й контроль). Оцінка результатів проводилася на другий і сьомий день після обробки (далі – дпо).

Таким чином, на основі даних першого досліду, де визначався вплив сухого залишку препаратів, визначено, що існує природна смертність хижого клопа, що зафіксовано в контролі. На 7-й дпо смертність становила 7% (див. табл. 2).

Обробка біологічним препаратом на основі Trichoderma harzianum спричинила 19,4% смертності, причому на 2-й день зафіксовано лише незначне відхилення від контрольної групи. Це свідчить про пролонгований характер дії препарату. До наступної групи належать хімічні фунгіциди, що застосовуються в системах інтегрованого захисту рослин. Препарат на основі пропамокарбу й фосетилу алюмінію проде-

Таблиця 2

Смертність імаго Macrolophus pygmaeus від впливу 4 груп фунгіцидів на 2-й і 7-й день після обробки при резидуальному методі внесення (%)

Вид розчину	**Смертність на 2-й день**	**Смертність на 7-й день**
Контроль (дистильована вода)	4,6	5
Сульфат міді	16,8	31
Пропамокарб + фосетил алюмінію	17	24,2
Trichoderma harzianum	7	19,4
Бупіримат	12,4	19,8

монстрував 17% смертності на 2-й день, яка зросла до 24% на 7-й день, що вказує на посилення летального ефекту з часом. Стосовно діючої речовини бупіримат, то показники на 7-й день після обробки становили близько 20%, що є порівнянним із результатами групи, обробленої Trichoderma harzianum.

Фунгіцид на основі міді – сульфат міді – на 2-й дпо демонстрував чи не найвищий рівень токсичності – 16,8%, а вже на 7-й дпо – 31% летального ураження. Таким чином, у дослідженні впливу фунгіцидів на імаго, відповідно до класифікації IOBC, пропамокарб + фосетил, Trichoderma harzianum і бупрімат належать до категорії нешкідливих, а сульфат міді – як злегка шкідливий препарат.

У другому експерименті оцінювали летальний ефект п'яти варіантів обробки (чотири фунгіциди та контроль) за умов контактного способу внесення на смертність німф 5-ї стадії Macrolophus pygmaeus на другий і сьомий дпо.

Визначаючи вплив контактного способу застосування розчину фунгіцидів, також виявили смертність німф від застосування спрею води контактно, хоча значно меншою мірою, ніж на імаго. Природна смертність хижого клопа в контролі на 7-й дпо становила 4,2%, що майже вдвічі нижче за попередній експеримент з обробкою дорослих особин. Це може вказувати на непереносимість надмірної вологості й фізичний негативний вплив вологи на комах.

Обробка біологічним препаратом на базі триходерми Trichoderma harzianum спричинила смертність на рівні 13,6% на 2-й дпо та 18,4% на 7-й дпо, що вказує на те, що основний вплив відбувається в перші дні після обробки й існує незначний ефект дії грибка Trichoderma harzianum на німф Macrolophus pygmaeus. Але, зважаючи на те що це остання стадія розвитку німф перед перетворенням на імаго, подальший вплив триходерми за рахунок розростання на поверхні субстрату недоцільний, оскільки буде повторювати дані першого експерименту.

Хімічні фунгіциди продемонстрували більш агресивний вплив на німф, ніж на дорослих особин. Так, розчин пропамокарб + фосетил алюмінію на 2-й день показав 13,6% смертності зі зростанням до 18,4% на 7-й день. Це демонструє, що основний ефект здійснюється в перші дні після обробки, а в подальшому незначно підвищується через деградацію діючої речовини на поверхні.

Фунгіцид на базі діючої речовини бупіримат демонструє значний вплив одразу з 2-го дня – 37,2%, до 46,8% на 7-й дпо. Це вказує на токсичну дію розчину на німф Macrolophus pygmaeus одразу після обробки та подальшу токсичність за рахунок існування випарувань. Також це підтверджує, що комахи на цій стадії розвитку майже у два рази вразливіші за дорослих особин, смертність яких була 19,8% на 7 дпо.

Мінеральний фунгіцид на основі міді – сульфат міді – на 2-й дпо демонстрував чи не найвищий рівень токсичності 37,2%, а вже на 7-й дпо – 51,6% летального ураження. Це значна смертність і її зростання вказує на пролонговану дію фунгіциду на поверхні та відсутність деградації діючої речовини. Ураховуючи дані першого експерименту, де смертність імаго була теж висока, можна охарактеризувати, що цей фунгіцид має інсектицидні властивості на корисних клопів при контактному застосуванні.

З урахуванням виконання обох припущень проведено однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA), який виявив статистично значущу різницю між групами ($F = 9,32$, $P = 0,0002$). Це вказує на суттєвий вплив типу фунгіциду на рівень смертності імаго Macrolophus pygmaeus. В експери-

Таблиця 3

Смертність німф 5 стадії Macrolophus pygmaeus від впливу 4 груп фунгіцидів на 2-й і 7-й день після обробки (%)

Вид розчину	**Смертність на 2-й день**	**Смертність на 7-й день**
Контроль	0,8	4,2
Сульфат міді	37,2	51,6
Пропамокарб + фосетил алюмінію	13,6	18,4
Trichoderma harzianum	6	15
Бупіримат	37,2	46,8

менті з німфами на 7-й дпо теж виявлена статистично значуща різниця між групами (F = 95, P = 0,000002). Оскільки F = 95 > F критичного значення 2,8 та P < 0,05, різниця в смертності між обробками є статистично значущою. Це означає, що фунгіциди мають різний вплив на виживаність хижого клопа. І відповідно до результатів дослідів, пропамокарб + фосетил, Trichoderma harzianum належать до категорії нешкідливих, а сульфат міді й бупіримат – токсичні препарати згідно з класифікацією IOBC.

Обговорення

Використані в дослідженні діючі речовини фунгіцидів широко застосовуються при захисті томатів від патогенів. Проте, як видно з результатів дослідження, вплив на корисних комах може бути суттєвий при певних умовах застосування.

Так, у певних дослідженнях фунгіцидів на базі діючих речовин пропамокарб гідрохлорид (530 г/л) і фосетил-алюміній (310 г/л) доведено, що вони сумісні з Macrolophus pygmaeus, ключовим агентом біоконтролю в IPM, а лабораторні та польові дослідження показали мінімальну смертність, відсутність сублетального впливу на розмноження або поведінку. Фосетил алюміній практично нешкідливий, тоді як пропамокарб проявляє незначну токсичність в умовах прямого розпилення або одразу після нього. Водночас дослідження фунгіцидів на основі міді (Martinou et al., 2014) показали, що залишки гідроксиду міді викликають значну смертність 58% німф 5-го Macrolophus pygmaeus віку через 72 години. Також обприскані німфи показали підвищену смертність аж до 66,6%, що призвело до класифікації цього фунгіциду як слабошкідливого. Аналогічне явище зареєстровано для картопляної цикади Empoasca fabae (Harris) (Hemiptera: Cicadellidae) після обробки бордоською сумішшю на основі сульфату міді (DeLong, 1940). Хлорокис міді спричинив 30% смертності в близькоспорідненого хижака Nesidiocoris tenuis (Hemiptera: Miridae) при обприскуванні рослин, хижаків та їжі. Але при впливі резидуально, лише через висушені рослини, смертність клопів була подібною до смертності контрольної. На противагу цьому, ця речовина викликала до 30% смертності в Nesidiokoris. tenuis (Ziaei Madbouni et al., 2017). Але відповідне дослідження для Macrolophus pygmaeus не проводилося.

У дослідженні фунгіцид на основі міді показав смертність дорослих особин на рівні 31% і 51,6% смертності німф 5-ї стадії на 7-й день дослідження. Це вказує на те, що побічні ефекти залежать від методу впливу та концентрації препаратів і потребують обережного застосування у виробничих умовах.

Висновки

Згідно з класифікацією IOBC (Міжнародної організації біологічного контролю), усі пестициди й біопрепарати оцінюються за рівнем токсичності до ентомофагів. Так, речовини, які викликали смертність менше ніж 30%, уважаються нешкідливими, ті, що викликають смертність від 30 до 79%, – злегка шкідливі, ті, що викликають від 80 до 99% смертності, – шкідливі, а ті, які спричинили смертність більше ніж 99%, – дуже шкідливі (Sterk et al., 1999). Відповідно до дослідження, біологічний препарат на зерновій основі Trichoderma harzianum як біологічний фунгіцид належить до 1 класу – нешкідливий як для німф, так і для імаго. Препарат не чинить значного негативного впливу на ентомофагів і рекомендований як в органічному виробництві, так і в інтегрованих технологіях.

Сульфат міді – пентагідрат, згідно з дослідженнями, спричинив смертність німф на рівні 51,6%, тому належить до 2-го класу помірно шкідливих або шкідливих, залежно від дози та стадії впливу на корисних комах. Підвищена концентрація міді також негативно впливає на ґрунтову мікрофлору, кліщів-фітосейулюсів та інших корисних комах, що варто враховувати при його застосуванні в системах захисту рослин.

Бупіримат, згідно з дослідженнями, теж належить до 2-го класу – помірно шкідливих фунгіцидів при контактному внесенні. Його системна дія та тривалий вплив на патогени роблять його ефективним проти борошнистої роси, проте він може викликати загибель або порушення розвитку корисних комах, особливо при прямому контакті або обробці місць їх перебування.

Пропамокарб гідрохлорид + фосетил алюмінію, згідно з проведеними дослідженнями, уважається малотоксичним для різних стадій Macrolophus pygmaeus.

При плануванні захисту виробничих субстратів у біолабораторіях від впливу патогенів необхідно враховувати, що найбезпечніше використовувати резидуальний метод використання фунгіцидів без прямого внесення на присутніх комах. Найбезпечнішими препаратами є біофунгіцид Trichoderma harzianum і пропамокарб гідрохлорид у поєднанні з фосетилом алю-

мінію, а дослідження з використанням цих фунгіцидів дало змогу зберегти рослинний субстрат і продовжити термін його використання на 40% у виробничих умовах, що, у свою чергу, позитивно сприяє підвищенню відроджуваності яєць Macrolophus pygmaeus і його економічній ефективності виробництва.

Список використаної літератури

Державна служба статистики України. Рослинництво України. Київ, 2021.

Кабінет Міністрів України. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Державний реєстр пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні. [Електронний ресурс]. URL: https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy/derzhavnyj-reyestr-pestytsydiv-i-agrohimikativ-dozvolenyh-do-vykorystannya-v-ukrayini/ (дата звернення: 17.07.2025).

Alimbekova A. Efficiency of using Macrolophus nubilus H.S. for protecting tomatoes from major pests in the greenhouse conditions of South Kazakhstan. Agravita. 2021. Vol. 43. № 3. https://doi.org/10.17503/agrivita.v43i3.2857.

Bažok R., Miholić L., Kadoić B. Osjetljivost predatorske stjenice Macrolophus pygmaeus na insekticide. Zbornik sažetaka 66. seminara biljne zaštite. Hrvatsko društvo biljne zaštite. Zagreb, 2024.

Biobest. Side effects database, 2025. [Електронний ресурс]. URL: https://www.biobest.com/side-effects-app (дата звернення: 15.09.2025).

DeLong D.M. Studies of methods and materials for the control of the leafhopper Empoasca fabae as a bean pest. USDA Technical Bulletin. 1940. P. 740.

FRAC – Fungicide Resistance Action Committee. FRAC mode of action poster. 2025. [Електронний ресурс]. URL: https://www.frac.info/media/a5vnynr3/frac-moa-poster-2025.pdf (дата звернення: 10.10.2025).

Haynes K.F. Sublethal effects of neurotoxic insecticides on insect behavior. Annual Review of Entomology. 1988. Vol. 33. P. 149–168. https://doi.org/10.1146/annurev.en.33.010188.001053.

Herrick N.J., Cloyd R.A. Direct and indirect effects of pesticides on the insidious flower bug (Hemiptera: Anthocoridae) under laboratory conditions. Journal of Economic Entomology. 2017. Vol. 110. P. 931–940. https://doi.org/10.1093/jee/tox306.

Lykouressis D., Perdikis D., Tsagarakis. Polyphagous mirids in Greece: host plants and abundance in traps placed in some crops. Bollettino del Laboratorio di Entomologia Agraria “Filippo Silvestri”. 2001. Vol. 56. P. 57–68.

Malekan N., Hatami B., Akhavan A., Ebadi R. Evaluation of entomopathogenic fungi Beauveria bassiana and Lecanicillium muscarium on different nymphal stages of greenhouse whitefly Trialeurodes vaporariorum in greenhouse conditions. Biharean Biologist. 2015. Vol. 9. P. 108–112. https://doi.org/10.1515/bibio-2015-0017.

Martinou A.F., Seraphides N., Stavrinides M.C. Lethal and behavioral effects of pesticides on the insect predator Macrolophus pygmaeus. Chemosphere. 2014. Vol. 96. P. 167–173. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.028.

Martinou A.F., Wright D.J. The predation consequence of continuous breeding vs starting a new colony of a polyphagous insect predator. Phytoparasitica. 2019. Vol. 37. № 1. P. 27–33. https://doi.org/10.1080/00779962.1982.9722404.

Mohammadi R., Valizadegan O. Lethal and sublethal effects of matrine (Rui agro®) on the tomato leaf miner, Tuta absoluta and the predatory bug Macrolophus pygmaeus. Journal of Applied Research in Plant Protection. 2025. Vol. 14(2). P. 111–125. https://doi.org/10.22034/ARPP.2025.19084.

Perdikis D.C., Arvaniti K., Paraskevopoulos A., Grigoriou A. Pre-plant release enhanced the earlier establishment of Nesidiocoris tenuis in open field tomato. Entomologia Hellenica. 2015. Vol. 24. P. 11–21. https://doi.org/10.12681/eh.11541.

Pozzebon A., Borgo M., Duso C. The effects of fungicides on non-target mites can be mediated by plant pathogens. Chemosphere. 2010. Vol. 79. P. 8–17. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.01.064.

Sanchez J.A., López-Gallego E., Pérez-Marcos M., Perera Fernández L.G., Ramírez Soria. How safe is it to rely on Macrolophus pygmaeus (Hemiptera: Miridae) as a biocontrol agent in tomato crops. Agroecology. 2018. Vol. 6. https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00132.

Sánchez-Bayo F. Indirect Effect of Pesticides on Insects and Other Arthropods. Toxics. 2021. Vol. 9. № 8. Article 177. https://doi.org/10.3390/toxics9080177.

Sterk G., Hassan S. A., Baillod M. Results of the seventh joint pesticide testing programme. IOBC/WPRS Working Group "Pesticides and Beneficial Organisms". BioControl. 1999. Vol. 44. P. 99–117. https://doi.org/10.1023/A:1009966806383.

Urbaneja A., Montón H., Molla O. Suitability of the tomato borer Tuta absoluta as prey for Macrolophus pygmaeus and Nesidiocoris tenuis. Journal of Applied Entomology. 2009. Vol. 133. № 4. P. 292–296. https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2008.01380.x.

Ziaei Madbouni M.A., Samih M.A., Qureshi J.A., Biondi A., Namvar P. Compatibility of insecticides and fungicides with the zoophytophagous mirid predator Nesidiocoris tenuis. PLoS ONE. 2017. Vol. 12. № 11. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187439.

References

Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy (2021). Roslynnytstvo Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine. Crop production of Ukraine]. Kyiv [in Ukrainian].

Kabinet Ministriv Ukrainy. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. Derzhavnyi reiestr pestytsydiv i ahrokhimikativ, dozvolenykh do vykorystannia v Ukraini [Cabinet of Ministers of Ukraine. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. State register of pesticides and agrochemicals permitted for use in Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy/derzhavnyj-reyestr-pestytsydiv-i-agrohimikativ-dozvolenyh-do-vykorystannya-v-ukrayini/ (access date 17.07.2025) [in Ukrainian].

Alimbekova, A. (2021). Efficiency of using Macrolophus nubilus H.S. for protecting tomatoes from major pests in the greenhouse conditions of South Kazakhstan. Agravita, 43(3). https://doi.org/10.17503/agrivita.v43i3.2857 [in English].

Bažok, R., Miholić, L., & Kadoić, B. (2024). Osjetljivost predatorske stjenice Macrolophus pygmaeus na insekticide. In Zbornik sažetaka 66. seminara biljne zaštite. Zagreb: Hrvatsko društvo biljne zaštite. [Susceptibility of the predatory bug Macrolophus pygmaeus to insecticides. In Proceedings of the 66th Plant Protection Seminar] [in Croatian].

Biobest. Side effects database. [Electronic resource] URL: https://www.biobest.com/side-effects-app (access date: 15.09.2025) [in English].

DeLong, D.M. (1940). Studies of methods and materials for the control of the leafhopper Empoasca fabae as a bean pest. USDA Technical Bulletin, 740 [in English].

FRAC – Fungicide Resistance Action Committee (2023). FRAC mode of action poster. [Electronic resource] URL: https://www.frac.info/media/a5vnynr3/frac-moa-poster-2025.pdf (access date: 10.10.2025) [in English].

Haynes, K.F. (1988). Sublethal effects of neurotoxic insecticides on insect behavior. Annual Review of Entomology, 33, 149–168. https://doi.org/10.1146/annurev.en.33.010188.001053 [in English].

Herrick, N.J., & Cloyd, R.A. (2017). Direct and indirect effects of pesticides on the insidious flower bug (Hemiptera: Anthocoridae) under laboratory conditions. Journal of Economic Entomology, 110, 931–940. https://doi.org/10.1093/jee/tox306 [in English].

Lykouressis, D., Perdikis, D., & Tsagarakis. (2001). Polyphagous mirids in Greece: host plants and abundance in traps placed in some crops. Bollettino del Laboratorio di Entomologia Agraria "Filippo Silvestri", 56, 57–68 [in English].

Malekan, N., Hatami, B., Akhavan, A., & Ebadi, R. (2015). Evaluation of entomopathogenic fungi Beauveria bassiana and Lecanicillium muscarium on different nymphal stages of greenhouse whitefly Trialeurodes vaporariorum in greenhouse conditions. Biharean Biologist, 9, 108–112. https://doi.org/10.1515/bibio-2015-0017 [in English].

Martinou, A.F., Seraphides, N., & Stavrinides, M.C. (2014). Lethal and behavioral effects of pesticides on the insect predator Macrolophus pygmaeus. Chemosphere, 96, 167–173. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.028 [in English].

Martinou, A.F., & Wright, D.J. (2019). The predation consequence of continuous breeding vs starting a new colony of a polyphagous insect predator. Phytoparasitica, 37(1), 27–33. https://doi.org/10.1080/00779962.1982.9722404 [in English].

Mohammadi, R., & Valizadegan, O. (2025). Lethal and sublethal effects of matrine (Rui Agro®) on the tomato leaf miner Tuta absoluta and the predatory bug Macrolophus pygmaeus. Journal of Applied Research in Plant Protection, 14(2), 111–125. https://doi.org/10.22034/ARPP.2025.19084 [in English].

Perdikis, D.C., Arvaniti, K.A., Paraskevopoulos, A., & Grigoriou, A. (2015). Pre-plant release enhanced the earlier establishment of Nesidiocoris tenuis in open-field tomato. Entomologia Hellenica, 24(1), 11–21. https://doi.org/10.12681/eh.11541 [in English].

Pozzebon, A., Borgo, M., & Duso, C. (2010). The effects of fungicides on non-target mites can be mediated by plant pathogens. Chemosphere, 79(1), 8–17. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.01.064 [in English].

Sanchez, J.A., López-Gallego, E., Pérez-Marcos, M., Perera-Fernández, L. G., & Ramírez Soria, M.J. (2018). How safe is it to rely on Macrolophus pygmaeus (Hemiptera: Miridae) as a biocontrol agent in tomato crops. Agroecology, 6, 132. https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00132 [in English].

Sánchez-Bayo, F. (2021). Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. Toxics, 9(8), 177. https://doi.org/10.3390/toxics9080177 [in English].

Sterk, G., Hassan, S.A., & Baillod, M. (1999). Results of the seventh joint pesticide testing programme IOBC/WPRS Working Group “Pesticides and Beneficial Organisms”. BioControl, 44, 99–117. https://doi.org/10.1023/A:1009966806383 [in English].

Urbaneja, A., Montón, H., & Molla, O. (2009). Suitability of the tomato borer Tuta absoluta as prey for Macrolophus pygmaeus and Nesidiocoris tenuis. Journal of Applied Entomology, 133(4), 292–296. https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2008.01380.x [in English].

Ziaei Madbouni, M.A., Samih, M.A., Qureshi, J.A., Biondi, A., & Namvar, P. (2017). Compatibility of insecticides and fungicides with the zoophytophagous mirid predator Nesidiocoris tenuis. PLoS ONE, 12(11). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187439 [in English].

Отримано: 30.10.2025
Прийнято: 11.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 502.51:504.4:528.8
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.4

ОГЛЯД ПОТЕНЦІЙНИХ ЗМІН У РЕПРОДУКТИВНІЙ ФУНКЦІЇ РИБ ДНІПРОВСЬКО-БУЗЬКОГО ЛИМАНУ ЗА ДІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ В УМОВАХ ПІДРИВУ КАХОВСЬКОЇ ГЕС

М. Ю. Євтушенко[1], В. О. Демченко[2], Н. А. Демченко[3], В. М. Клименко[4]

У публікації наведено результати огляду потенційних змін у репродуктивній функції риб іхтіоценозу Дніпровсько-Бузької естуарної екосистеми в умовах підвищення концентрації іонів важких металів, яке є наслідком руйнації Каховського гідровузла.

Реакція організму риб на біологічно відчутне підвищення кількісних показників іонів важких металів у воді має багатогранний характер і залежить від хімічної природи металу, його концентрації у воді, потреби організму в ньому. Відмічено, що зміни гідрохімічного режиму водойм призводять до модифікації річних біологічних циклів риб, наслідком чого є порушення процесів відтворення, зокрема нормального розвитку гонад і статевих клітин. Представлено основні шляхи потрапляння важких металів до організму риб. Узагальнено дані щодо топології накопичення важких металів в органах і тканинах риб відповідно до їх акумулятивного потенціалу, а також відомості щодо ключових фізико-хімічних параметрів середовища, які впливають на реакцію організму при дії важких металів, зазначено, що чутливість до іонів важких металів у гідробіонтів знижується зі зниженням температури навколишнього середовища. Наведено приклади патологічних змін, які виникають в організмі гідробіонтів за умови інтоксикації важкими металами, окремо розглянуто порушення репродуктивних функцій: асиметричний розвиток гонад, їх структурна деформація; раннє статеве визрівання; зміна тривалості періоду розвитку гонад; резорбція статевих клітин самиць і самців на всіх фазах розвитку, у тому числі й зрілих; збільшення кількості особин, які пропускають нерест; зниження плодючості.

[1] доктор біологічних наук, член-кореспондент НАН України
ORCID: 0000-0002-8165-8802
[2] доктор біологічних наук, старший дослідник,
завідувач відділу біологічних основ екологічного менеджменту
(ДУ «Інститут морської біології НАН України», м. Одеса)
e-mail: demvik.fish@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0225-3207
[3] кандидат біологічних наук, науковий співробітник
(ДУ «Інститут морської біології НАН України», м. Одеса)
e-mail: bibkadem@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6469-760X
[4] аспірант відділу біологічних основ екологічного менеджменту
(ДУ «Інститут морської біології НАН України», м. Одеса)
e-mail: vklim@i.ua
ORCID: 0000-0002-4252-3059

Зазначено, що для побудови моделі інтенсивності природного відновлення ресурсних видів риб у водоймах Дніпровсько-Бузької естуарної екосистеми після деокупації регіону необхідно здійснити оцінку накопичення важких металів в організмі риб і врахувати стан їх репродуктивної функції.

Ключові слова: *Дніпровсько-Бузький лиман, руйнація Каховської ГЕС, важкі метали, репродуктивна функція риб, інтоксикація риб важкими металами.*

REVIEW OF POTENTIAL CHANGES IN THE REPRODUCTIVE FUNCTION OF FISH IN THE DNIPRO-BUG ESTUARY UNDER THE INFLUENCE OF HEAVY METALS FOLLOWING THE DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA HYDROELECTRIC POWER PLANT

M. Yu. Yevtushenko, V. O. Demchenko, N. A. Demchenko, V. M. Klymenko

The publication presents the results of a review of potential changes in the reproductive function of fish within the ichthyocenosis of the Dnipro-Buh estuarine ecosystem under conditions of increased concentrations of heavy metal ions, which is a consequence of the destruction of the Kakhovka hydrotechnical complex.

The response of fish organisms to a biologically perceptible increase in the quantitative indicators of heavy metal ions in water is multifaceted and depends on the chemical nature of the metal, its concentration in the aquatic environment, and the organism's physiological demand for it. It has been noted that changes in the hydrochemical regime of water bodies lead to modifications of the annual biological cycles of fish, resulting in disruptions of reproductive processes, particularly the normal development of gonads and gametes. The main pathways of heavy metal entry into fish organisms are presented. Data on the topology of heavy metal accumulation in fish organs and tissues according to their accumulative potential are generalized, as well as information on key physicochemical environmental parameters that influence the organism's response to heavy metal exposure. It is indicated that the sensitivity of hydrobionts to heavy metal ions decreases with decreasing ambient temperature. Examples of pathological changes that occur in hydrobiont organisms under heavy metal intoxication are provided, with particular attention given to reproductive dysfunctions, such as asymmetric gonadal development, structural deformation of the gonads, premature sexual maturation, alterations in the duration of the gonadal development period, resorption of female and male gametes at all stages of development, including mature ones, an increase in the proportion of individuals skipping spawning, and a decrease in fecundity.

It is stated that, for the construction of a model assessing the intensity of natural recovery of resource fish species in the water bodies of the Dnipro-Buh estuarine ecosystem after the de-occupation of the region, it is necessary to evaluate heavy metal accumulation in fish organisms and consider the state of their reproductive function.

Key words: *Dnipro-Bug Estuary, destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant, heavy metals, reproductive function of fish, fish intoxication by heavy metals.*

Вступ

Екологічний стан Дніпровсько-Бузької естуарної екосистеми в значній мірі визначається впливом прісноводного стоку Дніпра й Південного Бугу. В умовах зарегульованості Дніпра фізико-хімічний режим його поверхневих вод виявився достатньо сформованим і досить стабільним (Кутіщев та ін., 2021). Разом із тим трансформація стоку на фоні з антропогенним впливом призводить до поступового погіршення гідрологічного та гідрохімічного режимів водойми (Pichura et al., 2018), що мало негативний вплив не лише на існування, а й на умови розмноження представників різних видів риб (Вітюков, 2011; Лянзберг, 2013; Ситник та ін., 2016; Кутіщев та ін., 2021). Згідно з даними цих авторів, за мінералізацією води, умістом іонів хлору, амонійного азоту, нітратного та нітритного азоту, фосфору, фосфатів якість води в Дніпровсько-Бузькому лимані змінюється від категорії «чистої» до «дуже брудної» води, залежно від сезону та району.

Значно змінилась екологічна ситуація в Дніпровсько-Бузькій естуарній системі в період тимчасової окупації Херсонської області, особливо після підриву окупантами Каховської гідроелектростанції (рис. 1). Із затоплених територій, у тому числі міст і населених пунктів, були змиті й потрапили до водойм регіону паливно-мастильні мате-

ріали (нафтові вуглеводні), пестициди й інші небезпечні хімічні речовини, сполуки важких металів включно з тими, що надходили з викидами промислових підприємств міст Запорізької та Дніпропетровської областей і тривалий час накопичувалися не лише у водній товщі, а й у донних відкладах і гідробіонтах, які населяли Каховське водосховище (Тучковенко і Степаненко, 2023). Як наслідок, токсичні речовини, які привнесені стоком Дніпра, у значній мірі могли зосередитися в донних відкладах лиману, суттєво погіршуючи якість води та стан його екосистеми у цілому (Пічура та ін., 2025; Shumilova et al., 2025). Сучасні дослідження після підриву греблі демонструють перевищення нормативів у воді для таких показників: pH, розчинений кисень, ХСК, $БСК_5$, сульфати, хлориди, мінералізація, рубідій, літій, натрій, алюміній, берилій, магній, марганець, залізо, бор, барій, цинк, ртуть, бенз(а)пірен, дибутилфталат (Калініченко та ін., 2023).

Просторова модель розподілу завислих частинок (див. рис. 1), побудована на даних за перші дні після підриву дамби Каховської ГЕС і до того, демонструє загальні закономірності розподілу водних мас, які вивільнилися внаслідок руйнації Каховського гідровузла, і локалізацію місць седиментації нерозчинних часток у межах Дніпровсько-Бузької естуарної екосистеми та прилеглих акваторій. За нею, осідання часток і формування зон із підвищеним рівнем забруднення відбувалося на ділянках, для яких у силу гідродинамічних особливостей характерне формування зворотної течії та мілководдя, зокрема такі ділянки відіграють важливу роль у процесах відтворення й нагулу структурних елементів іхтіоценозу. При цьому звертає увагу те, що за низького рівня води й високої температури, які характерні для літньої-осінньої межені на цій території, може значно підвищитися ступінь токсичності води на тлі

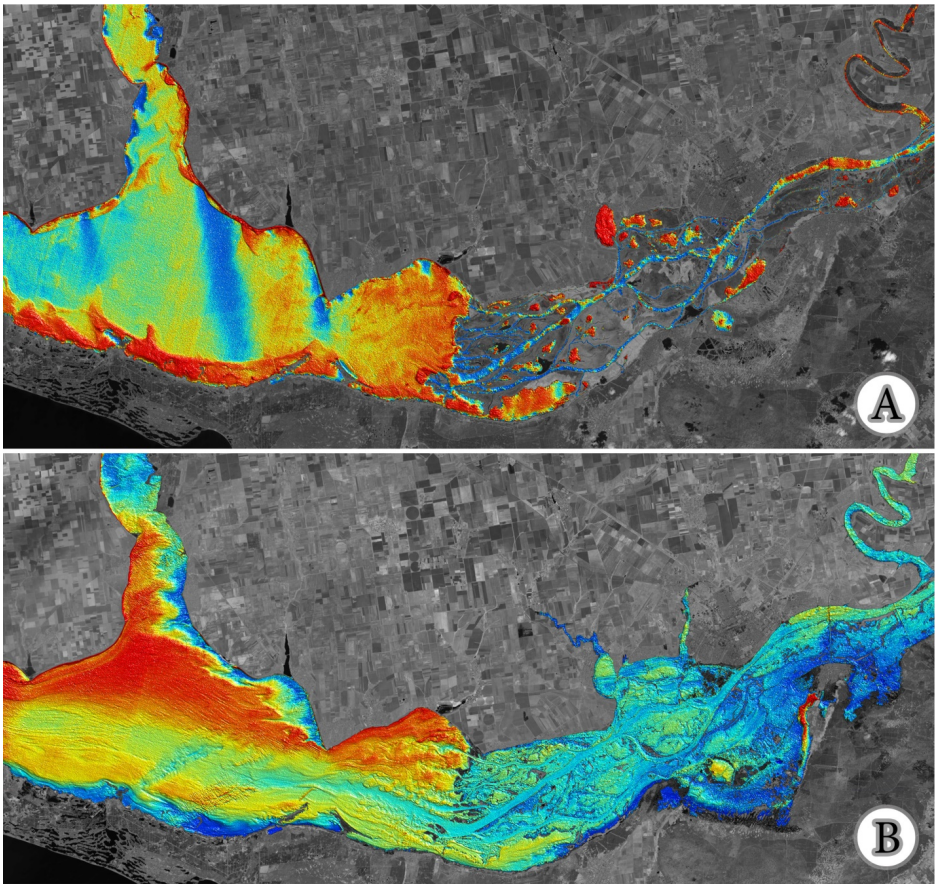


Рис. 1. Картосхема розподілу водних мас і завислих речовин на основі розрахунку індексу TSS (A – 01.06.2023; B – 09.06.2023). Більш теплими тонами позначено забруднені ділянки

Джерело: сформовано автором за даними Earth Resources Observation and Science (EROS).

зниження концентрації кисню (Максимова і Шевченко, 2020).

Бурхливі потоки води та значні затоплення територій призвели до пошкоджень і загибелі ряду представників водної й повітряно-водної рослинності (Давидова та ін., 2023; Дзеркаль та ін., 2024) (рис. 2). Цей компонент екосистеми бере активну участь у формуванні показників якості води та загального рівня здоров'я екосистем, будучи залученим у процеси біологічного очищення водойм.

Хронологічна ретроспектива даних фотосинтетичної активності автотрофного компонента екосистем пониззя Дніпра показує, значні зниження індексу NDVI в літній період 2023 року для цієї території. Такі показники опосередковано вказують на втрату або суттєве зменшення потенціалу аквальних систем до саморегуляції та нормалізації низки екологічних параметрів, які в певній мірі є визначальними для іхтіологічних угруповань цієї території та для водних об'єктів як середовища існування.

Серед численних токсикантів, поширених у водному середовищі, найбільшу тенденцію до накопичення в живих організмах виявляють важкі метали (Zeitoun & Mehana, 2014). Саме тому треба зрозуміти всі ключові аспекти потрапляння, накопичення та впливу на організми риб цих забруднюючих речовин. Важливою особливістю важких металів є те, що, потрапивши одного разу в екосистему, вони нікуди не зникають, тільки перерозподіляються по її компонентах (Арсан та ін., 2001). Вивчення впливу забруднюючих речовин на живі організми – один із напрямів, які активно розробляються вченими, але це питання ще недостатньо вивчене та потребує перманентної актуалізації. Потреба в цій інформації гостро відчувається у зв'язку зі збільшенням різноманітних забруднень водних екосистем, які призводять до загибелі чи погіршення стану іхтіоценозів. Саме тому важливість робіт щодо оцінки значення важких металів у гідроекосистемах стає все більш актуальною (Yevtushenko et al., 2021; Taslima et al., 2022; Євтушенко та ін., 2022).

Забруднення водойм полютантами, які потрапили до лиману після підриву дамби Каховської ГЕС, може не лише призвести до суттєвих змін видового складу риб (Шахман і Бистрянцева, 2021), а й порушити окремі фізіологічні процеси. У межах цього напряму варто звернути увагу на важливість вивчення потенційного впливу важких металів на відтворювальну здатність риб Дніпровсько-Бузької естуарної системи як однієї з ключових передумов підтримки

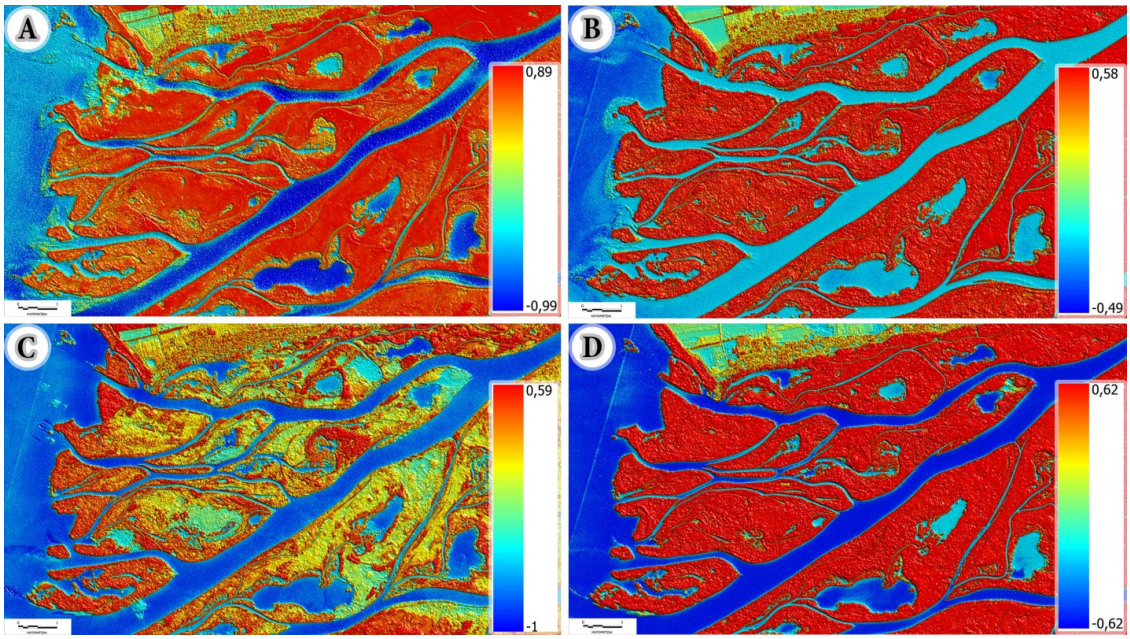


Рис. 2. Картосхема фотосинтетичної активності водної та повітряно-водної рослинності частини дельти річки Дніпро (A – 18.07.2021; B – 18.07.2022; C – 08.07.2023; D – 07.07.2024)

Джерело: сформовано автором за даними Copernicus Sentinel-2 (processed by ESA).

динамічної стійкості структури іхтіологічного ценозу водойми та його видового різноманіття. Для цього проведено огляд можливих впливів та узагальнено основні негативні зміни у фізіологічному стані риб. Цей аналіз дасть змогу зрозуміти ймовірні наслідки для іхтіологічних угруповань, що, звісно, є важливим та актуальним в умовах післявоєнного збереження й відновлення гідроекосистем регіону.

Матеріал і методи

Для написання роботи та формування достовірних висновків ми використовували методи когнітивного аналізу й експертного оцінювання наукової та методичної літератури, а також геопросторове моделювання з використанням програм геоінформаційних систем. Для побудови моделі розподілу водних мас і завислих речовин, а також моделі фотосинтетичної активності водної та повітряно-водної рослинності частини дельти р. Дніпро використовували дані супутників Sentinel-2 та Landsat 8-9 (Crippen, 1990; ... Zhang et al., 2021).

Результати та їх обговорення

Історично збідніння іхтіофауни Дніпровського-Бузької системи відбувалося на фоні зростання ступеня забруднення дніпровських вод і трансформації річкового стоку, що призвело до зникнення реофільного комплексу та значного скорочення прохідних і напівпрохідних видів (Демченко, 2019). Водночас критичним у цих умовах є залпові, неконтрольовані скиди забруднюючих вод, які можуть призводити до значних змін у структурі іхтіофауни. В умовах інтенсивного забруднення водойм у них зустрічаються лише окремі особини малоцінних видів риб, але й ці представники іхтіофауни можуть покинути забруднені ділянки або загинути безпосередньо в тій водоймі, де з водами надходять високотоксичні сполуки.

Найбільш витривалими до дії антропогенного навантаження є еврибіонтні види риб, які характеризуються широкою екологічною валентністю, і близькі до них види лімнофільного комплексу. Саме останні сьогодні є найбільш численними для Дніпровського-Бузької системи (Verlatiy et al., 2009; Демченко, 2019).

Шляхи проникнення важких металів до організму риб. Токсичність металів залежить від твердості води, pH середовища, іонної сили розчину, наявності хелатоутворюючих агентів у воді. Це зумовлено тим, що в більшості випадків найбільш токсичними є незв'язані й іонні форми металів як такі, що краще проникають в організм риб.

Загалом для гідробіонтів найбільш розповсюджені метали-забруднювачі, рівень їх токсичності можна подати таким рядом:

Hg >Cd >Cu >Pb >Zn >Ni >Mn >Cr.

У процесі взаємодії важких металів з організмами риб можна виділити щонайменше два етапи: перший – проникнення, другий – накопичення. На першому етапі проходить відносно швидке поглинання елемента з водного середовища. Існує чотири головні шляхи надходження важких металів у організм риб: хемосорбція іонів слизовими оболонками; механічне захоплення завислих часток, які містять важкі метали; надходження з їжею та водою; поглинання зябрами при диханні. Характер і фізико-хімічні особливості першого етапу є погано вивченими. Однак можна сказати, що його інтенсивність зумовлена питомою поверхнею поглинання організму гідробіонта (Курант та ін., 2011).

Другий етап характеризується утворенням стійких сполук важких металів з органічними молекулами організму. Лімітується він іншими факторами, такими як проникність металу через мембранні структури, обмін речовин у самому організмі, швидкістю екскреції тощо. При певній концентрації металу в організмі настає динамічна рівновага між його надходженням та виведенням (Дудник і Євтушенко, 2013). Найзначніше накопичення важких металів має місце в поверхневих органах і тканинах. Наприклад, уміст заліза, цинку, марганцю, нікелю, кобальту, виявлених у зябрах ляща, на порядок перевищує показники, виявлені в м'язах і печінці (Литвинова та ін., 2005). Низкою авторів показано, що досить активно важкі метали акумулюються в гонадах, що пояснюється активним накопиченням у них білкових і ліпідних резервів, тоді як процеси екскреції в них сповільнені (Євтушенко і Данилко, 1996; Колесник, 2014).

За здатністю концентрувати метали (за винятком ртуті, яка найбільше накопичується в м'язовій тканині) органи й тканини можна розмістити в такому порядку – внутрішні: скелет > печінка, селезінка, нирки > кишківник, мозок, гонади, серце > червоні м'язи> білі м'язи; зовнішні: слиз > луска > шкіра > зябра. Основна частина абсолютного запасу металу локалізована в м'язовій тканині й скелеті. Концентрація металу

в ліпідній і білковій фракціях приблизно рівна (Venuto & Irefry, 1983; Євтушенко і Данилко, 1996; Курант та ін., 2011; Мельник та ін., 2011).

Особливості механізму впливу важких металів на організм риб. Основний механізм прояву токсичної дії металів і фізіолого-біохімічної адаптації до них полягає в морфо-структурних змінах на субклітинному, клітинному, тканинному й органному рівнях; модифікації основних фізіологічних функцій; взаємодії між токсикантами та біологічно активними молекулами (білки, нуклеїнові кислоти, полісахариди, фосфоліпіди тощо); зміні активності функціонування окремих біохімічних реакцій, ферментних комплексів і метаболічних систем.

Важкі метали поряд із прямою токсичною дією викликають небезпечні віддалені наслідки, а саме: мутагенний, ембріотоксичний, гонадотоксичний та інші типи взаємодії (Taslima et al., 2022; Jamil Emon et al., 2023).

Найбільш токсичними для риб є солі кадмію, міді, ртуті, свинцю, цинку, срібла та тривалентного хрому. Токсична дія спостерігається вже при концентрації 0,02–0,004 мг\л (мідь, ртуть, срібло). Токсичність солей одних і тих же металів різна: нітрати цинку, міді, кадмію й нікелю більш токсичні, ніж сульфати.

При отруєнні комплексом важких металів у риб на шкірі й зябрах утворюється товста оболонка з коагуляційного слизу. Біла оболонка з шару слизу з'являється внаслідок хімічної реакції між іонами металів і секретом слизу. Гістологічні дослідження зябер і тканин отруєних риб показують значну руйнацію респіраторного епітелію.

Зворотність отруєння риб солями важких металів досить незначна. Риби, перенесені в чисту воду в стані перевертання, майже завжди гинуть (Malhotra et al., 2020; Naz et al., 2023).

Риби, знаходячись у розчинах солей важких металів, потребують великої кількості розчиненого у воді кисню (120–150% нормальної необхідності). На токсичність солей впливає також уміст у воді мінеральних солей, особливо карбонатна твердість, так як деякі солі утворюють із ними нерозчинні комплекси, у результаті чого їх токсичність значно знижується. Відповідно, у м'якій воді їх токсичність підвищується.

Вплив важких металів на репродуктивну функцію риб. Різні типи важких металів, що накопичуються в організмі риби з навколишнього середовища, і їх постійне накопичення порушують формування й діяльність різних тканин та органів, включаючи репродуктивні органи (Jezierska et al., 2000; Jezierska et al., 2009).

Серед органів і тканин риб особливе місце займають гонади. Поступаючись за рівнем умісту полютантів майже всім органам і тканинам риб, які населяють чисті водойми, за зміни техногенної ситуації гонади інтенсивно нагромаджують метали. Значне зростання вмісту мікроелементів у гонадах зв'язують з їх фізіологічними особливостями, уся діяльність яких зосереджена на нагромадженні речовин білкового й ліпідного походження, тоді як процеси екскреції в цих органах відбуваюся більш повільно (Munkittick & Dixon, 1989; Євтушенко і Данилко, 1996). Автори вважають, що на ділянках водойм із високою концентрацією важких металів зниження чисельності іхтіофауни й окремих її видів, які постійно знаходяться в цих місцях, відбувається через неякісні статеві продукти плідників, що призводить до зниження рівня виживання личинок у ранньому онтогенезі.

Дослідження самиць коропа під час нересту й ікри на різних стадіях ембріонального розвитку під впливом марганцю й міді в модельних експериментах показали, що в дорослих особин у період нересту практично не зареєстровано накопичення важких металів в ікрі, так як вони значною мірою мобілізують адаптогенні можливості, за яких іде посилене виведення важких металів з організму та їх значний міжорганний перерозподіл. Для запліднені ікри на стадіях дроблення й органогенезу зафіксовано накопичення іонів міді та марганцю прямо пропорційне їх концентрації у воді. Установлено чіткий дозозалежний ефект дії важких металів на перекисне окислення ліпідів (Jezierska et al., 2000; Jezierska et al., 2009).

Як уже відмічалося раніше (Horning & Neiheisel, 1979), відтворювальна здатність риб після відносно нетривалої дії на них важких металів, зокрема іонів міді, може відновлюватися. Підтвердженням цих висновків є також результати досліджень, якими встановлено, що витримування пунтіуса протягом 2–4-х місяців у воді з концентрацією міді в 1/3 $ЛД_{50}$ викликало лише тимчасове порушення перебігу сперматогенезу, а також артезію в яєчниках (Kumar & Pant, 1984).

Установлено, що період визрівання ооцитів супроводжується накопиченням у яєч-

никах риб міді, марганцю, заліза, цинку. Цей процес проходить особливо інтенсивно на III стадії зрілості яєчників, коли розпочинається так званий період «великого росту» ооцитів у зв'язку з формуванням жовтка. Високий уміст мікроелементів спостерігається в плітки навіть в останній стадії, тобто перед нерестом. Установлено, що в процесі ікрометання організм самок утрачає значну частину накопичених полютантів (Riggio et al., 2003).

У багатьох видів риб, які населяють водойми Середньої Азії (лящ, сазан, судак, плітка, аральський вусач, білизна, білий товстолоб тощо), що забруднені переважно пестицидами, гербіцидами й мінеральними добривами, що надходять із поверхневими водами й дренажним стоком, виявлено більш раннє статеве визрівання особин, аномальний розвиток гонад і різні порушення репродуктивного циклу. Частина самок у водоймах пониззя Амудар'ї взагалі пропускала нерестовий сезон (Zholdasova & Guseva, 1987; Pavlovskaya, 2025).

У риб, які населяють водойми з певними коливаннями показників гідрохімічного складу води, гідрологічного режиму, із забрудненням її важкими металами, пестицидами та гербіцидами, зареєстровані суттєві зміни в обміні речовин і у функціонуванні репродуктивної системи. Поширеним явищем є асиметричний розвиток гонад, такі ж аномалії виявлені й у самців білого та строкатого товстолобів, яких вирощували в ставках Молдови, розташованих у пониззі Дністра (Sapozhnikova et al., 2005; Romanescu, et al., 2022).

Дослідженнями, проведеними в акваріальних умовах, установлено, що іони міді в концентраціях від 0,01 мкг/л до 1мкг/л та іони марганцю в концентраціях від 0,05 мкг/л до 1 мкг/л викликають токсичну дію на ооцити коропових риб навіть за короткий (21 доба) термін впливу.

Експериментально встановлено, що в риб (*Pimephales notatus*), які піддавалися дії іонів міді, відмічалися суттєві порушення відтворювальної здатності. Кількість ікри, отриманої від однієї самки, зменшувалося вже за концентрації міді рівній 18 мкг/л (Horning & Neiheisel, 1979).

Перенесення ж риб із контрольного акваріуму в дослідний із концентрацією міді 119,4 мкг/л супроводжувалося повним припиненням ікрометання в представників роду *Pimephales*. Відновлення ікрометання в риб відбувалося лише через 60 діб після їх перенесення з дослідного до контрольного акваріуму з чистою водою. На основі зниження функції відтворення риб установлена гранично припустима концентрація міді, яка знаходиться між 4,3 (контроль) і 18,0 мкг/л іонів міді (Horning & Neiheisel, 1979).

У водоймах із зміненим гідрологічним і гідрохімічним режимами в багатьох видів риб відмічається резорбція статевих клітин. Резорбція зрілих статевих клітин, як правило, приводить до зниження коефіцієнта зрілості риб (гонадосоматичних індексів), а також до зниження індивідуальної абсолютної плодючості деяких видів риб на 20–25%.

Реакція репродуктивної системи риб на різні антропогенні впливи досить різноманітна (Khanam et al., 2022). Найбільш загальними й надзвичайно поширеними видами порушень відтворювальної функції риб є асиметричний розвиток гонад і їх структурна деформація; раннє статеве дозрівання; зміна тривалості періодів розвитку статевих залоз; резорбції статевих клітин самок і самців на всіх фазах розвитку, у тому числі й зрілих; збільшення числа риб, які пропускають нерест, зниження плодючості.

Отже, загалом дія важких металів має багатогранний і різновекторний характер. Виходячи із цього, можна відмітити, що, хоча активність сорбційних процесів і накопичення важких металів в організмі не завжди відображає істинну токсичність того чи іншого металу, рівень акумулювання є одним із основних показників токсичної дії важких металів. Разом із тим для встановлення чіткішої характеристики функціонально-фізіологічного стану водних організмів виникає необхідність у більш складних та інформативних тестах. Таким чином, в умовах післявоєнного відновлення екологічного стану водойм необхідно буде враховувати особливості накопичення важких металів в організмах гідробіонтів і риб зокрема, так як вони впливають на репродуктивну функцію. Це, у свою чергу, пов'язано з темпами відновлення рідкісних і промислових видів риб, які є важливими елементами природоохоронних і рибогосподарських територій регіону.

Висновки

Отже, з урахуванням викладеного вище можемо резюмувати таке:

1. Зміни гідрохімічного режиму водойм призводять до модифікації річних біоло-

гічних циклів риб, наслідком чого є порушення процесів відтворення, зокрема нормального розвитку гонад і статевих клітин. Біологічний відгук риб на збільшення концентрації іонів металів у воді багатогранний і залежить від хімічної природи металу, його концентрації, потреби організму в ньому, а також від фізико-хімічних параметрів навколишнього середовища.

2. Головними фізико-хімічними факторами, які впливають на реакцію організму при дії важких металів, є температура, pH середовища, твердість води, наявність у воді хелатоутворюючих агентів і домішок. Відмічено, що чутливість до іонів важких металів у гідробіонтів знижується зі зниженням температури навколишнього середовища.

3. Іони важких металів проникають із навколишнього середовища в організм гідробіонтів і, накопичуючись в їхніх органах і тканинах, суттєво впливають на протікання фізіолого-біохімічних процесів. Ступінь тканинного акумулювання металів визначається їх концентрацією у воді, тривалістю дії, а також метаболічними потребами організму в тому чи іншому елементі. Підвищені концентрації іонів важких металів у воді призводять до посилення катаболічних процесів, які призводять до патологічних змін в організмі гідробіонтів.

4. Забруднення водойм полютантами різної природи викликає значні зміни у функціонуванні різних систем організму риб, у тому числі й у репродуктивній. Найбільш часто зустрічаються такі порушення репродуктивної функції, як асиметричний розвиток гонад і їх структурна деформація, раннє статеве визрівання, зміна тривалості періоду розвитку гонад, резорбція статевих клітин, самиць і самців на всіх фазах розвитку, у тому числі й зрілих, збільшення кількості особин, які пропускають нерест, і зниження плодючості.

5. Для відновлення популяцій промислових і другорядно промислових риб Дніпровсько-Бузького лиману після деокупації регіону необхідно здійснити оцінку накопичення важких металів в організмі риб і врахувати стан їхньої репродуктивної функції. Це дасть змогу спрогнозувати інтенсивність природного відновлення ресурсних видів риб у водоймах регіону.

Список використаної літератури

Арсан О.М., Ситник Ю.М., Шаповал Т.М., Кукля І.Г., Пасічна О.О., Магомедова З.Б. Екологотоксикологічні дослідження внутрішніх водойм Києва. *Наукові записки Тернопільського педуніверситету ім. В. Гнатюка. Серія «Біологія». Спец. випуск «Гідроекологія».* Тернопіль, 2001. Вип. 3(14). С. 176–177.

Вітюков Ю.Є. Абіотичні умови існування іхтіофауни в Дніпровсько-Бузькій гирловій ділянці і перспективи раціонального використання біопродуктивного потенціалу. *Рибогосподарська наука України.* 2011. № 1. С. 110–115. [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rnu_2011_1_21 (дата звернення: 01.09.2025).

Давидова А.О., Дзеркаль В.М., Клименко В.М. Сучасний стан та оцінка прогнозованих втрат вищої водної та повітряно-водної рослинності НПП «Нижньодніпровський» (Херсонська обл., Україна). *Актуальні проблеми ботаніки та екології :* матеріали міжнар. конф. молодих учених (Івано-Франківськ, 27–30 вересня 2023 р.). Івано-Франківськ : Супрун В.П., 2023. С. 37.

Демченко Н.А. Особливості іхтіоценозу акваторій НПП «Нижньодніпровський». *Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології :* матеріали XII іхтіологічної наук.-практ. конф. (Дніпро, 26–28 вересня 2019 р.) / за заг. ред. Р.О. Новіцького. Дніпро : Акцент ПП, 2019. С. 86–90.

Дзеркаль В.М., Давидова А.О., Клименко В.М. Вплив військових дій на екосистеми національного природного парку «Нижньодніпровський». *Функціонування об'єктів природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану: шляхи відновлення та розвитку :* збірник матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф. (Київ, 4–5 липня 2024 р.). Київ : Центр екол. освіти та інформації, 2024. С. 64–66.

Дудник С.В., Євтушенко М.Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне застосування: монографія. Київ : Вид-во Українського фітосоціологічного центру, 2013. 297 с.

Євтушенко М.Ю., Данилко О.В. Особливості накопичення важких металів в тканинах риб Кременчуцького водосховища. *Гідробіологічний журнал.* 1996. Т. 32. № 4. С. 58–66.

Євтушенко М.Ю., Рудик-Леуська Н.Я., Хижняк М.І. Екологічний стан та фізіологічний статус риб за впливу теплового забруднення водойм : монографія. Київ, 2022. 103 с.

Калініченко О.О., Мельников А.Ю., Нікітіна С.В., Волков Ю.В., Мартинюк Д.Т. Стан водних об'єктів Миколаївської та Херсонської областей у зв'язку з надзвичайною ситуацією, спричиненою підривом греблі та ГЕС Каховського водосховища. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення :* збірник наук. статей XIX Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 14–15 вересня 2023 р.). Харків : УКРНДІЕП, 2023. С. 225–230.

Колесник Н.Л. Розподіл важких металів серед компонентів прісноводних екосистем (огляд). *Рибогосподарська наука України.* 2014. № 3. С. 35–54.

Курант В.З., Хоменчук В.О., Бияк В.Я. Шляхи проникнення та вміст важких металів в організмі риб (огляд). *Наукові записки Тернопільського нац. пед. ун-ту ім. В. Гнатюка. Серія «Біологія».* Тернопіль, 2011. Вип. 2(47). С. 262–269.

Кутіщев П.С., Коржов Є.І., Гончарова О.В., Козлов Л.В. Екологічна оцінка якості води Дніпровсько-Бузької естуарної екосистеми за гідрохімічними показниками. *Таврійський науковий вісник. Серія «Сільськогосподарські науки».* 2021. Вип. 120. С. 323–335. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.120.41

Литвинова Т.Г., Мельник А.П., Стецюк З.А. та ін. Фактори накопичення важких металів в екосистемі Дніпровських водосховищ. *Рибне господарство.* 2005. Вип. 64. С. 131–143.

Лянзберг О.В. Екологічна оцінка пониззя Дніпра у зв'язку з антропогенним навантаженням. *Таврійський науковий вісник. Серія «Екологія, іхтіологія та аквакультура».* 2013. Вип. 88. С. 287–293.

Максимова Н.М., Шевченко І.О. Екологічна оцінка води ріки Самара за категоріями. Дніпро : ДДАЕУ, 2020. С. 53–55.

Мельник А.П., Власова Н.М., Захарченко І.Л. Розподіл та накопичення важких металів в органах і тканинах промислових видів риб Каховського водосховища. *Рибогосподарська наука України.* 2011. № 1. С. 75–80.

Пічура В.І., Потравка Л.О., Білошкуренко О.С. Дослідження наслідків руйнації Каховської дамби та осушення водосховища для населення України. *Водні біоресурси та аквакультура.* 2025. Т. 9. № 1. С. 218–247. https://doi.org/10.32782/wba.2025.1.20.

Ситник Ю., Пилипенко Ю., Шевченко П., Плугатарьов В., Колесник Н. П., Симон М., Мельник А., Дорофєй Н. Важкі метали в органах і тканинах стерлят (Acipenser ruthenus L.) у Дніпровсько-Бузькому морському муловині. *Рибогосподарська наука України.* 2016. № 3(37). С. 5–21. http://dx.doi.org/10.15407/fsu2016.03.005.

Тучковенко Ю., Степаненко С. Вплив руйнування греблі Каховської ГЕС на екологічний стан Одеського району Чорного моря. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки.* 2023. № 44. С. 71–80. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80.

Шахман І.О., Бистрянцева А.М. Вплив якості річкової води на динаміку промислу у Дністровському лимані та в Кучурганському водосховищі. *Екологічні науки.* 2021. № 4(37). С. 60–64.

Copernicus Sentinel-2 (processed by ESA). MSI Level-2A BOA Reflectance Product. Collection 1. European Space Agency, 2021. https://doi.org/10.5270/S2_-znk9xsj.

Crippen R.E. Calculating the Vegetation Index Faster. *Remote Sensing of Environment.* 1990. Vol. 34. P. 71–73.

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Landsat 8–9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey, 2020. https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6.

Horning W.B., Neiheisel T.W. Chronic effect of copper on the bluntnose minnow, Pimephales notatus (Rafinesque). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology.* 1979. Vol. 8. P. 545–552.

Jamil Emon F., Rohani M.F., Sumaiya N., Tuj Jannat M.F., Akter Y., Shahjahan M., Abdul Kari Z., Tahiluddin A.B., Goh K.W. Bioaccumulation and Bioremediation of Heavy Metals in Fishes – A Review. *Toxics.* 2023. Vol. 11(6). P. 510. https://doi.org/10.3390/toxics11060510.

Jezierska B., Ługowska K., Witeska M., Sarnowski P. Malformations of newly hatched common carp larvae. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities.* 2000. Vol. 3. [Електронний ресурс]. URL: http://www.ejpau.media.pl/volume3/issue2/fisheries/art-01.html (дата звернення: 01.09.2025).

Jezierska B., Ługowska K., Witeska M. The effects of heavy metals on embryonic development of fish (a review). *Fish Physiology and Biochemistry.* 2009. Vol. 35(4). P. 625–640. https://doi.org/10.1007/s10695-008-9284-4.

Khanam T., Al-Emran M., Rahman M.S., Hasan J., Ferdous Z., Rohani M.F., Shahjahan M. Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish – A review. *Toxicology Reports.* 2022. Vol. 9. P. 858. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.04.013.

Kumar S., Pant S.C. Comparative effects of the sublethal poisoning of zinc, copper and lead on the gonads of the teleost Puntius conchonius Ham. *Toxicology Letters.* 1984. Vol. 23. P. 189–194.

Malhotra N., Ger T.R., Uapipatanakul B., Huang J.C., Chen K.H., Hsiao C.D. Review of Copper and Copper Nanoparticle Toxicity in Fish. *Nanomaterials.* 2020. Vol. 10(6). P. 1126. https://doi.org/10.3390/nano10061126.

Munkittick K.R., Dixon D.G. Reproductive impairment and biochemical changes in fish exposed to contaminants. *Hydrobiologia.* 1989. Vol. 188/189. P. 123–135.

Naz S., Chatha A.M.M., Téllez-Isaías G., Ullah S., Ullah Q., Khan M.Z., Shah M.K., Abbas G., Kiran A., Mushtaq R. A Comprehensive Review on Metallic Trace Elements Toxicity in Fishes and Potential Remedial Measures. *Water.* 2023. Vol. 15. P. 3017. https://doi.org/10.3390/w15163017.

Pavlovskaya L.P. Fishery in the Lower Amu-Darya under the Impact of Irrigated Agriculture. *FAO Corporate Document Repository*. Karakalpak Branch, Academy of Sciences of Uzbekistan. [Електронний ресурс]. URL: http://www.fao.org/docrep/v9529e/v9529E04.htm (дата звернення: 08.09.2025).

Pichura V.I., Shakhman I.A., Bystriantseva A.N. Spatial and temporal regularities of water quality formation in the Dnieper River. *Biological Resources and Nature Management.* 2018. Vol. 10. № 1–2. P. 44–57.

Riggio M., Filosa S., Parisi E., Scudiero R. Changes in zinc, copper and metallothionein contents during oocyte growth and early development of the teleost Danio rerio (zebrafish). *Comparative Biochemistry and Physiology C: Toxicology and Pharmacology.* 2003. Vol. 135(2). P. 191–196. https://doi.org/10.1016/s1532-0456(03)00107-8.

Romanescu V., Moshu A., Trombitsky I. Changes in the Fish Biodiversity of the Lower Dniester River (Moldova). *Biodiversity Online Journal.* 2022. Vol. 3(3). BOJ.000561. https://doi.org/10.31031/BOJ.2022.03.000561.

Sapozhnikova Y., Zubcov N., Hungerford S., Roy L.A., Boicenco N., Zubcov E., Schlenk D. Evaluation of pesticides and metals in fish of the Dniester River, Moldova. *Chemosphere.* 2005. Vol. 60(2). P. 196–205. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.061.

Shumilova O., et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science.* 2025. Vol. 387. P. 1181. https://doi.org/10.1126/science.adn8655.

Taslima K., Al-Emran M., Rahman M.S., Hasan J., Ferdous Z., Rohani M. F., Shahjahan M. Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish – A review. *Toxicology Reports.* 2022. Vol. 9. P. 858–868. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.04.013.

Venuto C., Irefry J.K. Fraguency distribution patterns and partitioning of copper, iron and zinc in selected tissues of the black mullet (Mugil cephalus). *Florida Scientist.* 1983. Vol. 46. № 3–4. P. 346–355.

Yevtushenko N.Yu., Dudnyk S.V., Rudyk-Leuska N.Ya., Khuzhniak M.I. Factors determining the degree of toxicity of heavy metals to fish (review). *Journal of Gidrobiology.* 2021. Vol. 57. P. 75–85.

Zeitoun M.M., Mehana E.S.E. Impact of heavy metal water pollution on fish health: a review and update. *Global Veterinaria.* 2014. Vol. 12. P. 219–231. https://doi.org/10.5829/idosi.gv.2014.12.02.82219.

Zhang X., Song Y., Chen J., Huang J. Landsat Image-Based Retrieval and Analysis of Spatiotemporal Variation of Total Suspended Solid Concentration in Jiaozhou Bay, China. *Remote Sensing.* 2021. Vol. 13. P. 4796. https://doi.org/10.3390/rs13234796.

Zholdasova I.M., Guseva L.N. Ichthyofauna. The reaction of freshwater systems to man-induced impacts. Tashkent : FAN, 1987. P. 76–108.

References

Arsan, O.M., Sytnyk, Yu.M., Shapoval, T.M., Kuklia, I.H., Pasichna, O.O., & Mahomedova, Z.B. (2001). Ekolohotoksykolohichni doslidzhennia vnutrishnikh vodoim Kyieva [Ecotoxicological studies of inland water bodies of Kyiv]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho pedahohichnoho universytetu im. V. Hnatiuka. Seriia: Biolohiia. Spetsialnyi vypusk: Hidroekolohiia [Scientific Notes of Ternopil Pedagogical University named after V. Hnatiuk. Series: Biology. Special Issue: Hydroecology],* 3(14), 176–177 [in Ukrainian].

Vitiukov, Yu.Ye. (2011). Abiotychni umovy isnuvannia ikhtiofauny v Dniprovsko-Buzkii hyrlovii diliantsi i perspektyvy ratsionalnoho vykorystannia bioproduktyvnoho potentsialu [Abiotic

conditions of ichthyofauna existence in the Dnipro–Buh estuarine area and prospects for rational use of bioproductive potential]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy [Fisheries Science of Ukraine],* 1, 110–115. [Electronic resource] URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rnu_2011_1_21 (access date 01.09.2025) [in Ukrainian].

Davydova, A.O., Dzerkal, V.M., & Klymenko, V.M. (2023). Suchasnyi stan ta otsinka prohnozovanykh vtrat vyshchoi vodnoi ta povitria-vodnoi roslynnosti NPP "Nyzhniodniprovs'kyi" (Khersonska oblast, Ukraina) [Current state and assessment of predicted losses of higher aquatic and air–aquatic vegetation of the "Nyzhniodniprovs'kyi" National Nature Park (Kherson region, Ukraine)]. In *Aktualni problemy botaniky ta ekolohii: Materialy mizhnarodnoi konferentsii molodykh uchenykh* (Ivano-Frankivsk, September 27–30, 2023) [*Current issues of botany and ecology: Proc. of the Int. Conf. of young scientists*] (p. 76). Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. [in Ukrainian].

Demchenko, N.A. (2019). Osoblyvosti ikhtiozhenozu akvatorii NPP "Nyzhniodniprovs'kyi" [Features of the ichthyocenosis of water areas of the "Nyzhniodniprovs'kyi" National Nature Park]. In R.O. Novitskyi (Ed.), *Suchasni problemy teoretychnoi ta praktychnoi ikhtiolohii: Materialy XII ikhtiolohichnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Dnipro, September 26–28, 2019) [*Modern problems of theoretical and applied ichthyology: Proc. of the XII scientific–practical conf.*] (pp. 86–90). Dnipro: Aktsent PP [in Ukrainian].

Dzerkal, V.M., Davydova, A.O., & Klymenko, V.M. (2024). Vplyv viiskovykh dii na ekosystemy Natsionalnoho pryrodnoho parku "Nyzhniodniprovs'kyi" [Impact of military actions on the ecosystems of the "Nyzhniodniprovs'kyi" National Nature Park]. In *Funktsionuvannia obiektiv pryrodno-zapovidnoho fondu Ukrainy v umovakh voiennoho stanu: shliakhy vidnovlennia ta rozvytku: Zbirnyk materialiv Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Kyiv, July 4–5, 2024) [*Functioning of nature reserve objects of Ukraine under martial law: ways of restoration and development: Proc. of the All-Ukrainian scientific–practical conf.*] (pp. 64–66). Kyiv: Tsentr ekolohichnoi osvity ta informatsii [in Ukrainian].

Dudnyk, S.V., & Yevtushenko, M.Yu. (2013). *Vodna toksykolohiia: osnovni teoretychni polozhennia ta yikhnie praktychne zastosuvannia* [Aquatic toxicology: basic theoretical principles and their practical application]. Kyiv: Ukrainian Phytosociological Centre [in Ukrainian].

Yevtushenko, M.Yu., & Danylko, O.V. (1996). Osoblyvosti nakopychennia vazhkykh metaliv v tkanynakh ryb Kremenchutskoho vodoskhovyshcha [Peculiarities of heavy metal accumulation in fish tissues of the Kremenchuk Reservoir]. *Hidrobiolohichnyi zhurnal [Hydrobiological Journal],* 32(4), 58–66 [in Ukrainian].

Yevtushenko, M.Yu., Rudyk-Leuska, N.Ya., & Khyzhniak, M.I. (2022). Ekolohichnyi stan ta fiziolohichnyi status ryb za vplyvu teplovoho zabrudnennia vodoim [Ecological state and physiological status of fish under the influence of thermal pollution of water bodies]. Kyiv [in Ukrainian].

Kalinichenko, O.O., Melnykov, A.Yu., Nikitina, S.V., Volkov, Yu.V., & Martyniuk, D.T. (2023). Stan vodnykh obiektiv Mykolaivskoi ta Khersonskoi oblastei u zv'iazku z nadzvychainoiu sytuatsiieiu, sprychynenoiu pidryvom hrebli ta HES Kakhovskoho vodoskhovyshcha [Condition of water bodies of Mykolaiv and Kherson regions in connection with the emergency caused by the destruction of the Kakhovka Dam and HPP]. *Ekolohichna bezpeka: problemy i shliakhy vyrishennia: Zbirnyk naukovykh statei XIX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Kharkiv, September 14–15, 2023) [*Environmental safety: problems and solutions: Proc. of the XIX Int. scientific–practical conf*]. (pp. 225–230). Kharkiv: UKRNDIEP [in Ukrainian].

Kolesnyk, N.L. (2014). Rozpodil vazhkykh metaliv sered komponentiv prisnovodnykh ekosystem (ohliad) [Distribution of heavy metals among components of freshwater ecosystems (review)]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy [Fisheries Science of Ukraine],* (3), 35–54 [in Ukrainian].

Kurant, V.Z., Khomenchuk, V.O., & Byiak, V.Ya. (2011). Shliakhy pronyknennia ta vmist vazhkykh metaliv v orhanizmi ryb (ohliad) [Ways of penetration and content of heavy metals in the organism of fish (review)]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni V. Hnatiuka. Seriia: Biolohiia [Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University named after V. Hnatiuk. Series: Biology],* 2(47), Spec. iss., 262–269. Ternopil [in Ukrainian].

Kutishchev, P.S., Korzhov, Ye.I., Honcharova, O.V., & Kozlov, L.V. (2021). Ekolohichna otsinka yakosti vody Dniprovsko-Buzkoi estuarnoi ekosystemy za hidrohimichnymy pokaznykamy [Ecological assessment of water quality in the Dnipro–Buh estuarine ecosystem based on hydrochemical indicators]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Silskohospodarski nauky* [*Tavria Scientific Bulletin. Agricultural Sciences],* 120, 323–335. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.120.41 [in Ukrainian].

Lytvynova, T.H., Melnyk, A.P., & Stetsiuk, Z.A., et al. (2005). Faktory nakopychennia vazhkykh metaliv v ekosystemi Dniprovs'kykh vodoskhovyshch [Factors of heavy metal accumulation in the ecosystem of the Dnipro reservoirs]. *Rybne hospodarstvo [Fisheries],* 64, 131–143 [in Ukrainian].

Lianzberh, O.V. (2013). Ekolohichna otsinka ponyzzia Dnipra u zv'iazku z antropohennym navantazhenniam [Ecological assessment of the Lower Dnipro in relation to anthropogenic pressure]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Ekolohiia, ikhtiolohiia ta akvakultura [Tavria Scientific Bulletin. Ecology, Ichthyology and Aquaculture],* 88, 287–293 [in Ukrainian].

Maksymova, N.M., & Shevchenko, I.O. (2020). Ekolohichna otsinka vody riky Samara za katehoriiamy [Ecological assessment of the Samara River water by categories]. Dnipro: DDAEU. pp. 53–55 [in Ukrainian].

Melnyk, A.P., Vlasova, N.M., & Zakharchenko, I.L. (2011). Rozpodil ta nakopychennia vazhkykh metaliv v orhanakh i tkanynakh promyslovykh vydiv ryb Kakhovskoho vodoskhovyshcha [Distribution and accumulation of heavy metals in organs and tissues of commercial fish species of the Kakhovka Reservoir]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy [Fisheries Science of Ukraine],* 1, 75–80 [in Ukrainian].

Pichura, V.I., Potravka, L.O., & Biloshkurenko, O.S. (2025). Doslidzhennia naslidkiv ruinatsii Kakhovskoi damby ta osushennia vodoskhovyshcha dlia naselennia Ukrainy [Study of the consequences of the Kakhovka Dam destruction and reservoir drainage for the population of Ukraine]. *Vodni bioresursy ta akvakultura [Aquatic Bioresources and Aquaculture],* 9(1), 218–247. https://doi.org/10.32782/wba.2025.1.20 [in Ukrainian].

Sytnyk, Yu., Pylypenko, Yu., Shevchenko, P., Pluhatarov, V., Kolesnyk, N. P., Symon, M., Melnyk, A., & Dorofei, N. (2016). Vazhki metaly v orhanakh i tkanynakh sterliat (*Acipenser ruthenus* L.) u Dniprovsko-Buzkomu morskomu mulovyni [Heavy metals in organs and tissues of sterlet (*Acipenser ruthenus* L.) in the Dnipro–Buh marine estuary]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy [Fisheries Science of Ukraine],* 3(37), 5–21. https://doi.org/10.15407/fsu2016.03.005 [in Ukrainian].

Tuchkovenko, Yu., & Stepanenko, S. (2023). Vplyv ruinuvannia hrebli Kakhovskoi HES na ekolohichnyi stan Odeskoho raionu Chornoho moria [Impact of the Kakhovka HPP dam destruction on the ecological state of the Odesa region of the Black Sea]. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky [Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulics],* 44, 71–80. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80 [in Ukrainian].

Shakhman, I.O., & Bystryantseva, A.M. (2021). Vplyv yakosti richkovoi vody na dynamiku promyslu u Dnistrovskomu lymani ta v Kuchurhanskomu vodoskhovyshchi [Influence of river water quality on fishery dynamics in the Dniester Estuary and the Kuchurhan Reservoir]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences],* 4(37), 60–64 [in Ukrainian].

Copernicus Sentinel-2 (processed by ESA). *MSI Level-2A BOA Reflectance Product. Collection 1.* – European Space Agency, 2021. https://doi.org/10.5270/S2_-znk9xsj [in English].

Crippen, R.E. (1990). Calculating the Vegetation Index Faster. *Remote Sensing of Environment,* 34, 71–73 [in English].

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. *Landsat 8–9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2* [dataset]. – U.S. Geological Survey, 2020. https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6 [in English].

Horning, W.B., & Neiheisel, T.W. (1979). Chronic effect of copper on the bluntnose minnow, *Pimephales notatus* (Rafinesque). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology,* 8, 545–552 [in English].

Jamil, Emon F., Rohani, M.F., Sumaiya, N., Tuj, Jannat M.F., Akter, Y., Shahjahan, M., Abdul, Kari Z., Tahiluddin, A.B., & Goh, K.W. (2023). Bioaccumulation and Bioremediation of Heavy Metals in Fishes – A Review. *Toxics,* 11(6), 510. https://doi.org/10.3390/toxics11060510 [in English].

Jezierska, B., Ługowska, K., Witeska, M., & Sarnowski, P. (2000). Malformations of newly hatched common carp larvae. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities,* 3. [Electronic resource] URL: http://www.ejpau.media.pl/volume3/issue2/fisheries/art-01.html (access date 01.09.2025) [in English].

Jezierska, B., Ługowska, K., & Witeska, M. (2009). The effects of heavy metals on embryonic development of fish (a review). *Fish Physiology and Biochemistry,* 35(4), 625–640. https://doi.org/10.1007/s10695-008-9284-4 [in English].

Khanam, T., Al-Emran, M., Rahman, M.S., Hasan, J., Ferdous, Z., Rohani, M. F., & Shahjahan, M. (2022). Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish – A review. *Toxicology Reports,* 9, 858. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.04.013 [in English].

Kumar, S., & Pant, S.C. (1984). Comparative effects of the sublethal poisoning of zinc, copper and lead on the gonads of the teleost *Puntius conchonius Ham. Toxicology Letters,* 23, 189–194 [in English].

Malhotra, N., Ger, T.R., Uapipatanakul, B., Huang, J.C., Chen, K.H., & Hsiao, C.D. (2020). Review of Copper and Copper Nanoparticle Toxicity in Fish. *Nanomaterials,* 10(6), 1126. https://doi.org/10.3390/nano10061126 [in English].

Munkittick, K.R., & Dixon, D.G. (1989). Reproductive impairment and biochemical changes in fish exposed to contaminants. *Hydrobiologia,* 188/189, 123–135 [in English].

Naz, S., Chatha, A.M.M., Téllez-Isaías, G., Ullah, S., Ullah, Q., Khan, M.Z., Shah, M.K., Abbas, G., Kiran, A., & Mushtaq, R. (2023). A Comprehensive Review on Metallic Trace Elements Toxicity in Fishes and Potential Remedial Measures. *Water,* 15, 3017. https://doi.org/10.3390/w15163017 [in English].

Pavlovskaya, L.P. (n.d.). Fishery in the Lower Amu-Darya under the Impact of Irrigated Agriculture. FAO Corporate Document Repository. Karakalpak Branch, Academy of Sciences of Uzbekistan. [Electronic resource] URL: http://www.fao.org/docrep/v9529e/v9529E04.htm (access date 08.09.2025) [in English].

Pichura, V.I., Shakhman, I.A., & Bystriantseva, A.N. (2018). Spatial and temporal regularities of water quality formation in the Dnieper River. *Biological Resources and Nature Management,* 10(1–2), 44–57 [in English].

Riggio, M., Filosa, S., Parisi, E., & Scudiero, R. (2003). Changes in zinc, copper and metallothionein contents during oocyte growth and early development of the teleost *Danio rerio* (zebrafish). *Comparative Biochemistry and Physiology C: Toxicology and Pharmacology,* 135(2), 191–196. https://doi.org/10.1016/s1532-0456(03)00107-8 [in English].

Romanescu, V., Moshu, A., & Trombitsky, I. (2022). Changes in the Fish Biodiversity of the Lower Dniester River (Moldova). *Biodiversity Online Journal,* 3(3), BOJ.000561. https://doi.org/10.31031/BOJ.2022.03.000561 [in English].

Sapozhnikova, Y., Zubcov, N., Hungerford, S., Roy, L.A., Boicenco, N., Zubcov, E., & Schlenk, D. (2005). Evaluation of pesticides and metals in fish of the Dniester River, Moldova. *Chemosphere,* 60(2), 196–205. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.061 [in English].

Shumilova, O., et al. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science,* 387, 1181. https://doi.org/10.1126/science.adn8655 [in English].

Taslima, K., Al-Emran, M., Rahman, M.S., Hasan, J., Ferdous, Z., Rohani, M. F., & Shahjahan, M. (2022). Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish – A review. *Toxicology Reports,* 9, 858–868. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.04.013 [in English].

Venuto, C., & Irefry, J.K. (1983). Fraguency distribution patterns and partitioning of copper, iron and zinc in selected tissues of the black mullet (*Mugil cephalus*). *Florida Scientist,* 46(3–4), 346–355 [in English].

Yevtushenko, N.Yu., Dudnyk, S.V., Rudyk-Leuska, N.Ya., & Khuzhniak, M.I. (2021). Factors determining the degree of toxicity of heavy metals to fish (review). *Journal of Gidrobiology,* 57, 75–85 [in English].

Zeitoun, M.M., & Mehana, E.S.E. (2014). Impact of heavy metal water pollution on fish health: a review and update. *Global Veterinaria,* 12, 219–231. https://doi.org/10.5829/idosi.gv.2014.12.02.82219 [in English].

Zhang, X., Song, Y., Chen, J., & Huang, J. (2021). Landsat Image-Based Retrieval and Analysis of Spatiotemporal Variation of Total Suspended Solid Concentration in Jiaozhou Bay, China. *Remote Sensing,* 13, 4796. https://doi.org/10.3390/rs13234796 [in English].

Zholdasova, I.M., & Guseva, L.N. (1987). Ichthyofauna. The reaction of freshwater systems to man-induced impacts. Tashkent: FAN, 76–108 [in English].

Отримано: 21.10.2025
Прийнято: 17.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 636.01.04:636.7
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.5

АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ СЛУЖБОВИХ СОБАК В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ: ДОСВІД УКРАЇНИ

І. І. Ковальчук[1]

У статті подано узагальнений теоретичний аналіз щодо поведінки службових собак в умовах воєнних дій на території України. Аналізується робота кінологічних підрозділів Збройних Сил України, Національної поліції України, Державної прикордонної служби України, Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Мета дослідження полягала у вивченні ключових стрес-факторів і механізмів адаптації тварин до бойового стресу. Сформульована мета передбачала розв'язання завдання з оцінки ефективності роботи службових собак при виконанні критичних завдань, таких як розмінування та пошук поранених. Український досвід свідчить, що собаки стикаються з комплексом стресорів – вибухи, обстріли, вогонь, руйнування, перепади температур, загазованість тощо. Ці чинники провокують різні поведінкові реакції: від виникнення тимчасової тривожності, зниження концентрації уваги до розвитку стану «посттравматичного стресового розладу в собак». Критичними механізмами адаптації, що забезпечують стійкість тварин, визначено міцний емоційний зв'язок і довіру між службовим собакою та кінологом, поглиблене фокусування тварини через підкріплення навички й застосування поступової десенсибілізації. Оцінка ефективності роботи кінологічних підрозділів на основі даних, розміщених у відкритих джерелах інформації, підтверджує, що службові собаки демонструють високу результативність щодо виконання поставлених завдань, що доводить важливість їх використання під час бойових дій. Практичні результати дослідження ґрунтуються на узагальненні отриманих даних з метою їх подальшого використання в освітніх програмах при підготовці спеціалістів профільних спеціальностей. Акцентується увага на необхідності забезпечення належної психологічної підтримки й подальшої реабілітації службових собак з метою відновлення їхнього фізичного та «ментального» здоров'я.

Ключові слова: *етологія, службові собаки, поведінка, здоров'я, травма, бойові дії.*

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF SERVICE DOGS IN WAR CONDITIONS: THE EXPERIENCE OF UKRAINE

I. I. Kovalchuk

The article presents a generalized theoretical analysis of the behavior of service dogs in conditions of military operations on the territory of Ukraine. The work of the canine units of the Armed Forces

[1] кандидат ветеринарних наук, доцент кафедри зоології,
біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: kovalchuk_ira0982@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2421-7533

of Ukraine, the National Police of Ukraine, the State Border Service of Ukraine, and the State Emergency Service of Ukraine is analyzed. The aim of the study was to examine the key stress factors and mechanisms of adaptation of animals to combat stress. The stated goal involved assessing the effectiveness of service dogs in performing critical tasks, such as demining and searching for the wounded. Ukrainian experience shows that dogs face a complex set of stressors – explosions, shelling, fire, destruction, temperature changes, gas contamination, etc. These factors provoke various behavioral reactions: from temporary anxiety and decreased concentration to the development of post-traumatic stress disorder in dogs. Critical adaptation mechanisms that ensure animal resilience include a strong emotional bond and trust between the service dog and the dog handler, deepening the animal's focus through reinforcement of skills and the use of gradual desensitization. An assessment of the effectiveness of canine units based on data from open sources confirms that service dogs demonstrate high performance in carrying out their tasks, proving the importance of their use in combat operations. The practical results of the study are based on the generalization of the data obtained for further use in educational programs for the training of specialists in relevant fields. Emphasis is placed on the need to provide adequate psychological support and further rehabilitation of service dogs in order to restore their physical and mental health.

Key words: *ethology, service dogs, behavior, health, trauma, combat operations.*

Вступ

Собака – перша приручена людиною тварина. Точне походження та місце перебування першого одомашненого собаки донині є предметом дискусій, але беззаперечним залишається вплив людини на формування собаки свійського. Зокрема, сучасні генетичні й археологічні дані свідчать про множинні центри одомашнення. Свійський собака *(Canis lupus familiaris)* одомашнений у кількох регіонах Євразії, зокрема в Східній Азії, Близькому Сході та Центральній Європі. Собаки відіграють безліч ролей у людському суспільстві: «рятувальники», «поводирі», «пошуковці», «поліцейські», «компаньйони», собаки-терапевти, собаки-дектектори, мають здатність конкурувати навіть з новітніми технологіями.

Розуміння анатомічних і фізіологічних особливостей собак має теоретичне та практичне значення, оскільки сприяє більш глибокому дослідженню питань філо- й онтогенезу, морфології, вищої нервової діяльності, селекції цих тварин тощо. У сучасному собаківництві зростає роль використання даних біоінформатики, біотехнології, фізіології, відтворення, що дає можливість поєднувати біогенетичний потенціал із пристосованістю до різноманітної експлуатації, а також удосконалити методики дресирування собак для різних підрозділів: Міністерства внутрішніх справ, Збройних сил України, Державної прикордонної служби, Митної служби, Служби безпеки України, Міністерства надзвичайних ситуацій, охорони тощо (Приліпко та ін., 2021; Євстафієва і Бучковська, 2021). Застосування теоретичних і прикладних положень зоології хребетних, ветеринарної анатомії та фізіології, генетики й кінології в практиці користувального собаківництва знаходить підтвердження у використанні біохіміко-фізіологічних методів аналізу рефлекторної діяльності, що дають змогу оцінити формування пошукової поведінки та стресових реакцій у собак з урахуванням їхніх породних особливостей (O'Haire & Rodriguez, 2018). Варто зазначити, що поведінкові та функціональні характеристики, які є бажаними в межах однієї кінологічної спеціалізації, можуть виявитися неефективними або навіть контрпродуктивними в іншому напрямі службового використання собак. Зокрема, виражена орієнтованість собак-компаньйонів на людину та їхня залежність від зовнішнього керівництва можуть обмежувати здатність собак-рятувальників до автономного прийняття рішень у ситуаціях, коли провідник перебуває поза межами їхнього поля зору (Miklósi et al., 2005; Holopura et al., 2024). Відбір собак для виконання спеціалізованих завдань потребує врахування як породної специфіки, так й індивідуальних особливостей розвитку тварини. Здатність до навчання, рівень самостійності, чутливість до керівництва людиною та інші поведінкові характеристики можуть суттєво варіювати залежно від генетичних передумов і середовищного впливу. Отже, чим ширшим є обсяг достовірних даних про поведінкові реакції собак, тим більш цілеспрямованим і результативним буде процес їх дресирування й функціональної адаптації (Udell & Wynne, 2008).

Використання службових собак поширене здавна в усьому світі. Уперше службове використання собак зафіксовано

в поліцейських підрозділах Бельгії. На території сучасної України їх практичне залучення до правоохоронної діяльності розпочалося в 1904 році (собаки були залучені до роботи карного розшуку міста Києва). У роки Першої світової війни вони застосовувалися як зв'язківці, санітари; Другої – як міношукачі, підривники тощо (Приліпко та ін., 2021; Євстафієва і Бучковська, 2021).

На сучасному етапі в умовах активних бойових дій в Україні етологічний аналіз поведінки службових собак є актуальним питанням. Повномасштабна збройна агресія рф створила унікальний і трагічний емпіричний матеріал для вивчення поведінкових реакцій тварин у надзвичайних умовах. У практичній діяльності кінологів і фахівців ветеринарної медицини фіксуються нетипові випадки, зумовлені як специфікою виконуваних завдань, так і тривалістю перебування службових собак у зоні підвищеного ризику. Наявні у відкритих джерелах дослідження здебільшого зосереджені на загальних аспектах функціонування кінологічних підрозділів, цивільному застосуванні службових собак, а також на статистичних даних щодо їх захворюваності (Геращенко і Залєвська, 2024). Водночас комплексний етологічний аналіз поведінкових змін, адаптаційних механізмів і методів корекції поведінки собак, які тривалий час перебувають у зоні бойових дій, залишається недостатньо розробленим. Це створює потребу в міждисциплінарному підході до вивчення психофізіологічного стану тварин, що виконують службові функції в умовах підвищеного стресового навантаження.

Метою дослідження є дослідити провідні стресогенні чинники й механізми адаптації службових собак до умов бойового стресу з урахуванням специфіки їх функціонального навантаження в зоні активних бойових дій. Завданнями дослідження є оцінка ефективності роботи службових собак під час виконання критичних завдань, зокрема розмінування та пошуку поранених; аналіз поведінкових реакцій тварин у контексті тривалого перебування в умовах воєнного конфлікту; визначення особливостей адаптації собак до стресових ситуацій на основі практичного досвіду кінологічних служб України; узагальнення емпіричних даних для подальшого вдосконалення методів підготовки й поведінкової корекції службових тварин у надзвичайних умовах.

Матеріал і методи

Матеріалом для досліджень слугували емпіричні дані кінологічних підрозділів різних силових структур України, що виконували завдання в зоні бойових дій.

Методи аналізу сучасних даних щодо основних стресогенних чинників і механізмів адаптації службових собак до умов бойового стресу з урахуванням специфіки їх функціонального навантаження в зоні активних бойових дій, синтезу й узагальнення емпіричних даних для подальшого вдосконалення методів підготовки та поведінкової корекції службових тварин у надзвичайних умовах.

Результати та їх обговорення

У сучасних воєнних конфліктах, які характеризуються високим рівнем інтенсивності й використанням різноманітних засобів ураження, службові собаки відіграють важливу роль, виконуючи широкий спектр завдань – патрулювання, виявлення вибухівки й тіл загиблих, пошуково-рятувальні операції, штурмові дії – робота в спецпідрозділі КОРД. Їх ефективність залежить від інтенсивності тренувань, здатності адаптуватися до екстремальних умов, які відбуваються в зоні бойових дій (Udell & Wynne, 2008; Білан, 2025).

Серед порід собак, які несуть службу в силових структурах України, найбільш поширеними є німецькі вівчарки, бельгійські вівчарки малінуа (відзначаються надзвичайною стресостійкістю, умотивованістю, легко піддаються дресируванню), лабрадори, джек-рассел-тер'єри, спанієлі.

Кінологічна служба функціонує в різних підрозділах Національної поліції України, станом на вересень 2025 року на службі перебувало 913 собак (В Нацполіції…, 2024). Від початку повномасштабної війни кінологи зі службовими собаками виконували службово-бойові завдання 12192 рази; службові собаки виявили 7419 одиниць зброї, 127428 набоїв, 157 кг вибухових речовин (Юсупов та ін., 2023; Білан, 2025). У кінологічній службі ЗСУ перебуває близько тисячі службових собак. Кінологічні розрахунки є в складі саперних груп, охорони військових аеродромів, баз, складів, арсеналів зі зброєю (Задубіна, 2023). У ДСНС працює 13 кінологічних підрозділів, у яких утримується 66 собак, із яких 39 – пошуково-рятувальні, 9 – мінно-пошукові, 5 – пошук тіл загиблих, 10 – становлять резерв, 1 – племінна собака та 2 цуценят. Упродовж 2022–2025 років кінологи ДСНС залуча-

лися до виконання службових завдань 812 разів, серед яких 317 – пошук людей (урятовано 73 людини), 435 – пошук вибухівки (знешкоджено 917 одиниць боєприпасів) (В Нацполіції…, 2024; Знаходять…, 2025).

За спостереженнями міжнародних кінологічних підрозділів, військові собаки піддаються травматичному впливу, що сприяє розвитку стійкого стану «посттравматичничного стресового розладу в собак». Зокрема, кінологи та ветеринари з авіабази Лакленд у штаті Техас, США, уважають, що собаки, які повертаються зі служби, мають посттравматичний розлад, вони характеризуються раптовими змінами поведінки, утрачають здатність виконувати елементарні завдання. Частина службових собак, які зазнали впливу бойових дій, підлягає реабілітації з використанням методів цільового дресирування та медикаментозної підтримки (Tony, 2012). Водночас існують випадки, коли психофізіологічний стан тварини не дає їй змоги надалі виконувати службові функції, що зумовлює необхідність її виведення зі складу підрозділу. Цю тезу підтверджують й українські фахівці. Так, у публікації Т. Білан (2025) зазначається, що в умовах повномасштабної війни понад сто службових собак, які перебувають у підпорядкуванні Національної поліції, отримали різні типи травм, як фізичні (ураження кінцівок, тулуба, органів чуття), так і психологічні, що є наслідком дії вибухових хвиль, тривалого стресу й перевантаження. У низці випадків саме посттравматичні поведінкові розлади стають критичним фактором, що унеможливлює подальше залучення тварини до виконання службових завдань (Білан, 2025).

Досвід українських кінологічних підрозділів показує, що деякі собаки демонструють не лише високу працездатність, а й психологічну стійкість, швидко адаптуються до різних стрес-факторів (шуму, вибухів, пострілів, сирен, вібрації, диму, зміни робочого середовища) (Юсупов, 2023). Проте ця адаптація не є миттєвою, а залежить від попередньої підготовки, що базується на обов'язковій імітації реальних бойових умов. Собаки, які пройшли спеціалізовані тренінги з поступовим підвищенням інтенсивності стресового навантаження, краще концентруються на виконанні завдання та менше відволікаються на дію стресорів (Кінологи…, 2025).

Одним із видів зброї, що застосовуються під час активних бойових дій, є різноманітні вибухові пристрої. Сучасні вибухові речовини потужні й дають змогу здійснювати дистанційний підрив. У світі розроблено багато різних приладів, які використовуються для їх пошуку за прямими чи похідними ознаками (детектори нейронного аналізу, хроматографи газові, детектори рентгено-телевізійні, прилади на основі радіохвиль і магнітного поля). Проте, за висновками експертів у галузі безпеки, найкращим детектором різноманітних речовин, зброї, боєприпасів є нюхова сенсорна система службових собак. Собаки виявляють вибухові речовини будь-яких видів незалежно від кількості й маскування, вони здатні відчути їх запах на відстані кількох метрів (лабрадор-ретривер виявляє вибухівку на відстані 50 м на відкритій місцевості й 10 м, якщо вона замаскована) (Афанасьєв і Серховець, 2015).

Відповідно до положень Настанови «З підготовки мінно-розшукових собак та вартових (сторожових) собак кінології збройних сил України», «при виконанні службових завдань дозволяється використовувати службових собак, які пройшли відповідний курс дресирування, визнані комісією придатними для службового використання і перебувають у штаті кінологічних підрозділів», спорядження для собак закуповується відповідно до Інструкції про забезпечення речового забезпечення військовослужбовців ЗСУ (Настанова…, 2020). Для службових собак виготовляють спеціалізоване спорядження: бронежилети з кевларовими або титановими пластинами, шоломи, навушники, окуляри, «налапники». Призначення спорядження – захист собаки під час виконання бойового завдання. Проте шолом може бути призначений не лише для захисту голови тварини, як правило, у нього вмонтовують відеокамеру, яка проводить відеофіксацію місцевості, щоб допомогти кінологам і саперам оцінити ситуацію (Настанова…, 2020; Шевчук і Парубок, 2023).

Тренування собак щодо мінно-розшукової діяльності триває щонайменше шість місяців. При відборі порід для цього виду діяльності звертають увагу на характеристики, які можуть бути максимально задіяні в пошуку вибухових речовин (темперамент, характер, біологічні характеристики породи тощо). Після завершення навчання обов'язковим етапом у службовій «кар'єрі» собак є їх адаптація до стресових ситуацій в умовах бойових дій, але над закріпленням цієї навички необхідно системно працювати та підтримувати її на відповід-

ному рівні з метою забезпечення стресостійкої форми та мотивації. Саме тому із собаками, які після навчання продовжують службу в реальних бойових умовах, повинен працювати досвідчений кінолог, що вміє знайти беззаперечний контакт із твариною, адже протягом секунди він має прийняти рішення, щоб віддати правильну команду, яку собака виконає, урахувавши всі якості свого підлеглого: характер, стан здоров'я, темперамент, настрій тощо (Кінологи …, 2025). Тому поведінка службових собак під час виконання мінно-пошукових завдань базується на тісному зв'язку з кінологом. Спостереження військових кінологів показують, що рівень взаємин між провідником і собакою має вирішальний вплив на роботу команди. Тварини з надійним наставником менш схильні до прояву тривожності, довше підтримують рівень працездатності в небезпечних зонах. Ще одним фактором, що впливає на ефективність їхньої роботи, є чергування активної діяльності й відпочинку, оскільки тривале перебування в стані надвисокого нервового напруження викликає поступове накопичення втоми та різке зниження працездатності, що є критично загрозливим для життя тварини й кінолога. Військові, що перебувають поряд із собаками, зазначають, що спостерігаються випадки, коли собаки, які успішно працювали впродовж тривалого часу, починають демонструвати нетипову поведінку (відмову від роботи, апатію або підвищену збудливість). Такі ситуації підтверджують необхідність упровадження моніторингу психоемоційного стану собак (Службові…, 2020; Кінологи…, 2025).

Поширена думка, що під час розмінування собака йде першою, але це не так. Спочатку починають працювати механізовані системи розмінування та вибухотехніки, вони обстежують територію за допомогою щупів і металодетекторів, перевіряють наявність розтяжок і датчиків. Це важлива складова, оскільки території заміновані хаотично, є безліч замаскованих розтяжок і пасток із датчиками руху. Собака може їх не помітити й підірватися разом із кінологом. Тому собак застосовують після того, як ділянку очистили механізованими та ручними засобами, оскільки вони можуть виявити вибухівку, яку інші засоби пропустили (наприклад, міну в пластиковому маскуванні) (Білан, 2025).

Одним із прикладів високої сенсорної чутливості й професійної підготовки українських службових собак є їхня здатність виявляти залишки вибухових речовин, локалізовані в ґрунтовому середовищі. Така діяльність є надзвичайно ризикованою, оскільки пов'язана з потенційною детонацією прихованих боєприпасів. Крім того, зафіксовано випадки, коли собаки демонструють здатність передчувати небезпеку або наближення обстрілу з боку противника, своєчасно попереджаючи людей про загрозу (Білан, 2025). Ці феномени свідчать про унікальні адаптаційні механізми та високий рівень інтеграції службових тварин у систему безпеки в умовах бойових дій. Ще одним завданням собак у зоні бойових дій є пошук поранених або загиблих військових. Натреновані собаки відчувають людський запах під завалами – шарами бетону, ґрунту. У теперішніх реаліях ця незамінна навичка має критично важливе значення, адже собаки відшуковують не лише поранених, а й тіла або рештки загиблих.

Окрім виконання прямих службових завдань, «військові» собаки виконують важливу соціально-емоційну функцію. Вони стають моральною та психологічною підтримкою для військовослужбовців, допомагають знизити рівень стресу й емоційного виснаження. Цей аспект поведінки хоч і не є основним завданням, але підвищує загальну цінність кінологічних підрозділів в умовах війни (Megan R. LaFollette et al., 2019; Задубіна, 2023).

Нині кінологічні служби із сектору оборони та безпеки нашої держави активно узгоджують свою діяльність зі стандартами та вимогами НАТО (STANAG), зокрема зі Стандартом AMWDP-1 «Здібності робочої військової собаки» і Стандартом AMedP-8.4 «Догляд та утримання тварин і ветеринарне забезпечення протягом усіх етапів військового розгортання» (Стандарт НАТО AMedP-8.4; Стандарт НАТО AMWDP-1), працюють над удосконаленням нормативно-правових актів, які регулюють її діяльність; вивчають системи впорядкування кінологічних розрахунків мінно-розшукових собак; розробляють нові програми підготовки кінологів і методики дресирування собак.

Поведінка та виконувана робота службових собак у бойових умовах суттєво відрізняються від поведінки й завдань повсякденного життя. Так, В. Юсупов та ін. (2023), Т. Білан (2025) зазначають, що тварини під час роботи в умовах воєнних конфліктів стикаються з постійним стресом та іншими травматичними факторами, які вимагають належної

фізичної підготовки, адаптивних навичок, співпраці з провідником (кінологом), уваги до їхнього психологічного стану, а в подальшому належного рівня реабілітації. Зокрема, наголошується на важливості розробки програм тренувань і підтримки тварин, що будуть максимально адаптовані до реалій воєнного стану, забезпечення добробуту тварин і спрямовані на ефективність виконання завдань (Юсупов та ін., 2023; Білан, 2025).

Практичне значення аналізу поведінки службових собак в умовах воєнних дій полягає в можливості вдосконалення чинних програм підготовки як кінологів, так і службових тварин. Крім того, дослідження може слугувати поштовхом для розробки методів профілактики та ранньої діагностики посттравматичного стресового розладу в собак і програм реабілітації тварин, а також сприяє покращенню стандартів їхнього добробуту.

Висновки

Отже, на основі викладеного вище можемо резюмувати таке:

1. Системна тренувальна підготовка, що моделює бойові умови, а також цілеспрямована увага до психоемоційного стану службових собак є визначальними чинниками їхньої функціональної ефективності в умовах підвищеного ризику.

2. Поведінкові реакції службових собак у зоні бойових дій формуються під впливом генетичних передумов, спеціалізованої підготовки, ефективної взаємодії з кінологом та індивідуальної здатності до адаптації.

3. Досвід українських кінологів засвідчує, що за умови професійної та науково обґрунтованої організації кінологічних розрахунків діяльність службових собак є ефективною як у бойових умовах, так і в мирний період. Набуті навички кінологічних підрозділів та окремих фахівців мають унікальний характер і становлять цінність для майбутніх досліджень і практики.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку діагностичних критеріїв виявлення посттравматичного стресового розладу в собак.

Список використаної літератури

Афанасьєв А.О., Серховець С.В. Основи підготовки інспекторів-кінологів зі службовими собаками до пошуку вибухових речовин, зброї, боєприпасів : навчально-методичний посібник. Хмельницький : НАДПСУ, 2015. 148 с.

Білан Т. Вони врятували не одне життя: як поліцейські службові собаки працюють під час війни. 2025. [Електронний ресурс]. URL: https://surl.li/gvrdxq (дата звернення: 10.09.2025).

Використання службових собак кінологічними підрозділами Національної поліції України для виявлення вибухових речовин в умовах воєнного стану : методичні рекомендації / В.В. Юсупов, А.О. Антощук, Ю.П. Приходько та ін. ; Нац. акад. внутр. справ. Київ, 2023. 46 с.

В Нацполіції працює понад 900 службових собак. *Українські національні новини.* 2024. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/jVWPGl6Nk (дата звернення: 10.09.2025)

Геращенко О.С., Залєвська І.І. Застосування поліцейськими службових собак при виявленні вибухонебезпечних предметів (речовин, механізмів) та при реагуванні правоохоронців на злочини із застосуванням вибухівки. *Південноукраїнський правничий часопис.* 2024. №. 2. P. 41–47. https://doi.org/10.32850/sulj.2024.2.8.

Задубіна Я. Кінологічна служба в ЗСУ налічує близько тисячі службових собак. *АрміяInform – Інформаційне агентство АрміяInform.* 2023. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/k4kja9QNL (дата звернення: 10.09.2025).

Знаходять людей під завалами та вибухівку: рятувальники розповіли про собак, які «служать» у ДСНС. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/9eoPkBKVp (дата звернення: 10.09.2025).

Євстафієва Ю.М., Бучковська В.І. Особливості використання службових собак під час оперативно-розшукових та профілактичних заходів. *Таврійський науковий вісник.* 2021. № 121. С. 127–132. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.121.18.

Кінологи у силах ТРО. *Сили територіальної оборони ЗСУ.* 2024. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/MVwoE7jVz (дата звернення: 10.09.2025).

З підготовки мінно-розшукових собак та вартових (сторожових) собак кінології збройних сил України : Настанова ВКДП 10-157(03).01 від 17.12.2020. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/aVp9GAoND (дата звернення: 10.09.2025).

Службові собаки – спецзасоби чи вірні напарники українських захисників? 2020. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/x4LXRkB4n (дата звернення: 10.09.2025).

Догляд та утримання тварин і ветеринарне забезпечення протягом усіх етапів військового розгортання : Стандарт НАТО AMedP-8.4. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/xVm8GAoev (дата звернення: 10.09.2025).

Здібності робочої військової собаки : Стандарт НАТО AMWDP-1. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/QV0k85Qeg (дата звернення 10.09.2025)

Приліпко Т.М., Косташ В.Б., Коваль Т.В. Біологічні особливості, годівля і утримання службових собак : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти аграрних вищих навчальних закладів III–IV рівнів акредитації. Кам'янець-Подільський, 2021. 240 с.

Шевчук К., Парубок С. Військове спорядження для собак. Яке воно і навіщо. *Суспільне Хмельницький.* 2023. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/Y4Q93ky49 (дата звернення: 10.09.2025).

Holopura S., Boiko N., Nemova T., Tsvilikhovskiy M. Impact of stress on the body of service dogs and alleviation methods: *Literature overview Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. P. 138–150. https://doi.org/10.31548/dopovidi/6.2024.138.

Megan R. LaFollette, Kerri E. Rodriguez, Niwako Ogata, Marguerite E. O'Haire. Military Veterans and Their PTSD Service Dogs: Associations Between Training Methods, PTSD Severity, Dog Behavior, and the Human-Animal Bond. Frontiers in Veterinary Science. 2019. № 6. P. 23. https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00023.

Miklósi Á., Pongracz P., Lakatos G., Topál J., Csányi V. A comparative study of the use of visual communicative signals in interactions between dogs (Canis familiaris) and humans and cats (Felis catus) and humans. Journal of Comparative Psychology. 2005. № 119. P. 179–186. https://doi.org/10.1037/0735-7036.119.2.179.

O'Haire M.E., Rodriguez K.E. Preliminary efficacy of service dogs as a complementary treatment for posttraumatic stress disorder in military members and veterans. Journal of *Consult Clin Psychol.* 2018. № 86(2). P. 179–188. https://doi.org/10.1037/ccp0000267.

Tony Perry. Canine post-traumatic stress recognized as disorder. *Animal Health Foundation.* 2012. [Електронний ресурс]. URL: https://lnk.ua/x4LXRxA4n (дата звернення: 10.09.2025).

Udell M.A., Wynne C.D. A Review of Domestic Dogs' (*Canis Familiaris*) Human-Like Behaviors: Or Why Behavior Analysts Should Stop Worrying and Love Their Dogs. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*. 2008. № 89(2). P. 247–261. https://doi.org/10.1901/jeab.2008.89-247.

References

Afanasjjev, A.O. & Serkhovecj, S.V. (2015). Osnovy pidghotovky inspektoriv-kinologhiv zi sluzhbovymy sobakamy do poshuku vybukhovykh rechovyn, zbroji, bojeprypasiv : navchaljno-metodychnyj posibnyk [Basics of training dog handlers with service dogs to search for explosives, weapons, and ammunition: teaching manual]. Khmelnytskyi. NADPSU, 148 p. [in Ukrainian].

Bilan, T. (2025). Vony vrjatuvaly ne odne zhyttja: jak policejsjki sluzhbovi sobaky pracjujutj pid chas vijny [They have saved many lives: how police service dogs work during wartime]. [Electronic resource] URL: https://surl.li/gvrdxq (access date: 10.09.2025) [in Ukrainian].

Jusupov, V.V., (ed.) (2023). Vykorystannja sluzhbovykh sobak kinologhichnymy pidrozdilamy Nacionaljnoji policiji Ukrajiny dlja vyjavlennja vybukhovykh rechovyn v umovakh vojennogho stanu : metod. rek. [Use of service dogs by canine units of the National Police of Ukraine to detect explosives in conditions of martial law: method. rec.]. Nac. akad. vnutr. sprav. Kyiv, 46 p. [in Ukrainian].

V Nacpoliciji pracjuje ponad 900 sluzhbovykh sobak. Ukrajinsjki nacionaljni novyny [More than 900 service dogs work for the National Police. Ukrainian national news]. [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/jVWPGl6Nk (access date: 10.09.2025) [in Ukrainian].

Gherashhenko O.S., & Zaljevsjka I.I. (2024). Zastosuvannja policejsjkymy sluzhbovykh sobak pry vyjavlenni vybukhonebezpechnykh predmetiv (rechovyn, mekhanizmiv) ta pry reaghuvanni pravookhoronciv na zlochyny iz zastosuvannjam vybukhivky [The use of police dogs to detect explosive objects (substances, mechanisms) and when responding to crimes involving explosives]. *Pivdennoukrajinsjkyj pravnychyj chasopys [South Ukrainian Law Journal],* 2, 41–47. https://doi.org/10.32850/sulj.2024.2.8 [in Ukrainian].

Zadubina, Ja. (2023). Kinologhichna sluzhba v ZSU nalichuje blyzjko tysjachi sluzhbovykh sobak. ArmijaInform – Informacijne aghentstvo ArmijaInform [The canine service in the Armed Forces of Ukraine has about a thousand service dogs. ArmyInform – ArmyInform Information Agency]. [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/k4kja9QNL (access date: 10.09.2025) [in Ukrainian].

Znakhodjatj ljudej pid zavalamy ta vybukhivku: rjatuvaljnyky rozpovily pro sobak, jaki «sluzhatj» u DSNS [Finding people under rubble and explosives: rescuers talk about dogs that «serve» in the State Emergency Service]. [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/9eoPkBKVp (access date: 10.09.2025) [in Ukrainian].

Jevstafijeva, Ju.M., & Buchkovsjka, V.I. (2021). Osoblyvosti vykorystannja sluzhbovykh sobak pid chas operatyvno-rozshukovykh ta profilaktychnykh zakhodiv [Features of the use of service dogs during

operational-search and preventive measures]. *Tavrijsjkyj naukovyj visnyk [Tavriya Scientific Bulletin],* 121, 127–132. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.121.18 [in Ukrainian].

Kinologhy u sylakh TRO (2024). Syly terytorialjnoji oborony ZSU [Dog handlers in the Territorial Defense Forces. Territorial Defense Forces of the Armed Forces of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/MVwoE7jVz (access date 10.09.2025) [in Ukrainian].

Nastanova «Z pidghotovky minno-rozshukovykh sobak ta vartovykh (storozhovykh) sobak kinologhiji zbrojnykh syl Ukrajiny». VKDP 10-157(03).01. vid 17.12.2020 [Instruction «On the training of mine detection dogs and guard dogs (watchdogs) by the Ukrainian Armed Forces' canine unit». VKDP 10-157(03).01. dated 17.12.2020]. [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/aVp9GAoND (access date: 10.09.2025) [in Ukrainian].

Sluzhbovi sobaky – speczasoby chy virni naparnyky ukrajinsjkykh zakhysnykiv [Service dogs – special tools or loyal partners of Ukrainian defenders]. [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/x4LXRkB4n/ (access date 10.09.2025) [in Ukrainian].

Standart NATO AMedP-8.4 «Doghljad ta utrymannja tvaryn i veterynarne zabezpechennja protjaghom usikh etapiv vijsjkovogho rozghortannja» [NATO Standard AMedP-8.4 «Care and Maintenance of Animals and Veterinary Support during All Phases of Military Deployment»]. [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/xVm8GAoev (access date 10.09.2025) [in Ukrainian].

Standart NATO AMWDP-1 «Zdibnosti robochoji vijsjkovoji sobaky» [NATO Standard AMWDP-1 «Working Military Dog Capabilities»]. [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/QV0k85Qeg (access date 10.09.2025) [in Ukrainian].

Prylipko, T.M., Kostash, V.B. & Kovalj, T.V. (2021). Biologhichni osoblyvosti, ghodivlja i utrymannja sluzhbovykh sobak : navch. posib. dlja zdobuvachiv vyshhoji osvity aghrarnykh vyshhykh navchaljnykh zakladiv III–IV rivniv akredytaciji [Biological characteristics, feeding, and keeping service dogs: a textbook for students of agricultural higher education institutions of III–IV accreditation levels]. Kam'janecj-Podiljsjkyj, 240 p. [in Ukrainian].

Shevchuk, K., & Parubok, S. (2023). Vijsjkove sporjadzhennja dlja sobak. Jake vono i navishho [Military equipment for dogs. What is it and why is it needed?]. *Suspiljne Khmeljnycjkyj [Social Khmelnytskyj].* [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/Y4Q93ky49 (access date 10.09.2025) [in Ukrainian].

Holopura, S., Boiko, N., Nemova, T., & Tsvilikhovskiy, M. (2024). Impact of stress on the body of service dogs and alleviation methods: Literature overview *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,* 138–150. https://doi.org/10.31548/dopovidi/6.2024.138 [in English].

Megan R., LaFollette, Kerri E. Rodriguez, Niwako Ogata & Marguerite E. O'Haire (2019). Military Veterans and Their PTSD Service Dogs: Associations Between Training Methods, PTSD Severity, Dog Behavior, and the Human-Animal Bond. Frontiers in Veterinary Science, 6, 23. https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00023 [in English].

Miklósi, Á., Pongracz, P., Lakatos, G., Topál, J., & Csányi, V. (2005). A comparative study of the use of visual communicative signals in interactions between dogs (Canis familiaris) and humans and cats (Felis catus) and humans. Journal of Comparative Psychology, 119, 179–186. https://doi.org/10.1037/0735-7036.119.2.179 [in English].

O'Haire, M.E, & Rodriguez, K.E. (2018). Preliminary efficacy of service dogs as a complementary treatment for posttraumatic stress disorder in military members and veterans. *Journal Consult Clin Psychol.*, 86(2), 179–188. https://doi.org/10.1037/ccp0000267 [in English].

Tony Perry (2012). Canine post-traumatic stress recognized as disorder. *Animal Health Foundation.* [Electronic resource] URL: https://lnk.ua/x4LXRxA4n (access date: 10.09.2025) [in English].

Udell, M.A, & Wynne, C.D. (2008). A Review of Domestic Dogs' (*Canis Familiaris*) Human-Like Behaviors: Or Why Behavior Analysts Should Stop Worrying and Love Their Dogs. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior,* 89(2), 247–261. https://doi.org/10.1901/jeab.2008.89-247 [in English].

Отримано: 29.10.2025
Прийнято: 15.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 636.74:636.083
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.6

БІОЛОГІЧНІ ТА ПОВЕДІНКОВІ ОСОБЛИВОСТІ РЯТУВАЛЬНО-ПОШУКОВИХ СОБАК

В. Ю. Мамченко[1]

У статті розглянуто біологічні та поведінкові особливості рятувально-пошукових собак, які відіграють важливу роль у виявленні постраждалих під завалами природного або техногенного походження. Зростання значення цих тварин у рятувальних операціях зумовлене їхньою здатністю до швидкого й ефективного пошуку, що значно перевищує можливості професійних рятувальників: одна тренована собака здатна обстежити площу, яку зазвичай досліджують 20–30 осіб. Метою оглядової роботи є аналіз біологічних механізмів, що забезпечують високу ефективність пошукової діяльності собак, а також характеристика поведінкових якостей, які формуються в процесі спеціалізованої підготовки.

Основною біологічною перевагою собак є надзвичайно розвинений нюховий епітелій (до 300 мільйонів рецепторів), що в сотні разів перевищує аналогічні показники людини. Завдяки цьому собаки здатні виявляти запах живої людини навіть у складних умовах: крізь товщу снігу (до 5 м), ґрунту чи бетону. Собаки здатні розрізняти індивідуальний запах людини, який формується на основі генетичних особливостей, зокрема комплексу головної гістосумісності (MHC). Водночас на характер запаху тіла людини можуть впливати зовнішні чинники – харчування, стан шкіри, мікробіом, використання косметичних засобів, тоді як базовий запах залишається стабільним. Високий рівень сенсорної чутливості пошукових собак корелюється із психологічною стійкістю, мотивацією до пошуку та здатністю до тісної співпраці з кінологом.

Ефективність роботи собаки на завалі залежить не лише від її нюхових здібностей, а й від специфічного набору поведінкових та психофізіологічних характеристик, які формуються під час тренувань. Популярними породами для рятувально-пошукової діяльності є німецька вівчарка, бельгійський малінуа та лабрадор. Особлива увага приділяється значенню «золотої години» – критичного періоду для порятунку життя, коли швидкість і точність виявлення постраждалих мають вирішальне значення. Успішне застосування собак у таких умовах базується на поєднанні біологічних, поведінкових і тактико-оперативних чинників.

Ключові слова: *біологічні особливості, рятувально-пошукові собаки, кінологічна підготовка, ефективність роботи службових собак, техногенні завали.*

[1] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: 79mamchenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7208-6363

BIOLOGICAL AND BEHAVIORAL FEATURES OF SEARCH AND RESCUE DOGS

V. Yu. Mamchenko

The article examines the biological and behavioral features of rescue and search dogs, which play an important role in identifying victims under natural or man-made rubble. The growing importance of these animals in rescue operations is due to their ability to quickly and effectively search, which significantly exceeds the capabilities of professional rescuers: one trained dog is able to examine an area that is usually examined by 20–30 people. The purpose of the review is to analyze the biological mechanisms that ensure the high efficiency of search activities of dogs, as well as the characteristics of behavioral qualities that are formed in the process of specialized training. The main biological advantage of dogs is an extremely developed olfactory epithelium (up to 300 million receptors), which is hundreds of times higher than similar indicators in humans. Thanks to this, dogs are able to detect the smell of a living person even in difficult conditions: through a layer of snow (up to 5 m), soil or concrete. Dogs are able to distinguish the individual smell of a person, which is formed on the basis of genetic characteristics, in particular the major histocompatibility complex (MHC). At the same time, the nature of a person's body odor can be influenced by external factors – nutrition, skin condition, microbiome, use of cosmetics, while the basic odor remains stable. The high level of sensory sensitivity of search dogs is correlated with psychological resilience, motivation to search and the ability to work closely with a dog handler.

The effectiveness of a dog's work in a blockage depends not only on its olfactory abilities, but also on a specific set of behavioral and psychophysiological characteristics that are formed during training. Popular breeds for search and rescue activities are the German Shepherd, Belgian Malinois and Labrador. Special attention is paid to the importance of the "golden hour" – a critical period for saving lives, when the speed and accuracy of identifying victims are crucial. The successful use of dogs in such conditions is based on a combination of biological, behavioral, and tactical-operational factors.

Key words: *biological characteristics, search and rescue dogs, canine training, work efficiency of service dogs, man-made blockages.*

Вступ

У контексті стрімкого зростання кількості природних і техногенних катастроф, зокрема землетрусів, промислових аварій, а також руйнувань, спричинених воєнними діями, особливої актуальності набуває проблема оперативного виявлення та порятунку постраждалих. Одним із критично важливих чинників, що визначає ефективність рятувальних заходів, є часовий інтервал. За даними клінічної медицини, ймовірність виживання осіб, які опинилися під завалами, суттєво знижується після завершення так званої золотої години (перші 60 хвилин) і критично падає протягом наступних 24–48 годин (Ящук, 2022).

У складних посткатастрофічних умовах традиційні методи пошуку, що базуються на візуальному обстеженні території або застосуванні важкої техніки, часто виявляються недостатньо ефективними та створюють додаткові ризики для рятувального персоналу. Техногенні завали являють собою складні багатокомпонентні структури, сформовані з фрагментів бетону, металевих елементів, ґрунту та побутових матеріалів, що ускладнює доступ до постраждалих. Візуальний контакт із людиною, яка перебуває під завалами, зазвичай відсутній, а використання механізованих засобів може призвести до вторинного обвалення конструкцій. Процес ручного розбирання таких завалів є тривалим, фізично виснажливим і потребує значних ресурсів, що додатково обмежує оперативність рятувальних дій.

Актуальність аналізу інформаційних джерел щодо біологічних і поведінкових особливостей рятувально-пошукових собак зумовлена зростаючою потребою в ефективних засобах оперативного реагування на надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру. У контексті глобального зростання кількості катастроф, зокрема землетрусів, зсувів, вибухів і терористичних актів, використання спеціально навчених собак набуває особливого значення. Їхня здатність до швидкого виявлення постраждалих під завалами, у снігових лавинах або в умовах обмеженої видимості робить їх незамінними учасниками рятувальних операцій.

Систематичний аналіз наукових і прикладних джерел дає змогу узагальнити сучасні уявлення щодо анатомо-фізіологічних особливостей сенсорних систем собак, зокрема нюхової, а також про поведінкові

характеристики, що визначають їхню ефективність у пошуковій діяльності. Вивчення чинників, які впливають на формування навичок, стресостійкість, мотивацію та взаємодію з кінологом, є критично важливим для вдосконалення методів підготовки рятувально-пошукових пар.

Крім того, аналіз літератури сприяє виявленню прогалин у знаннях, порівнянню підходів до дресирування в різних країнах, а також інтеграції новітніх досягнень з етології, нейрофізіології та ветеринарної медицини в практику підготовки службових собак. Це створює підґрунтя для підвищення ефективності рятувальних заходів, особливо в межах «золотої години», коли своєчасне виявлення постраждалих є вирішальним для збереження життя.

Метою оглядової статті було проаналізувати на основі літературних джерел біологічні та поведінкові особливості рятувально-пошукових собак.

Основними завданнями є: опис біологічних і поведінкових передумов ефективного використання собак у рятувальних операціях; систематизація методик спеціалізованої підготовки собак-рятувальників пошукової служби; аналіз тактики застосування кінологічних підрозділів у структурі рятувальних операцій; окреслення основних проблем і перспектив розвитку кінологічних служб в умовах сучасних викликів: ведення пошуково-рятувальних робіт у зонах бойових дій, масштабних техногенних аварій та стихійних лих (повені, пожежі, зсуви).

Матеріал та методи

Матеріалом для проведення досліджень були: накази МНС України № 597 (11.07.2018), № 234 (26.03.2018), № 765ДСК (29.07.2002), № 480 (09.06.2025); FEMA Search and Rescue Dog Training Manual (FEMA, 2018); річні звіти ДСНС про роботу кінологічних підрозділів (2022–2023); наукові статті про нюхову систему собак; дані з воєнних рятувальних операцій.

У статті використовували методи аналізу сучасних даних щодо використання собак у рятувально-пошукових операціях (РПО), синтезу даних з акцентом на виявлення ключових факторів ефективності, проблем і перспектив розвитку кінологічної служби в рятувальних операціях.

Результати та їх обговорення

Біологічні передумови залучення тварин виду Canis lupus familiaris. Головною біологічною особливістю, яка робить собак незамінними у рятувально-пошуковій роботі, є надзвичайно розвинена нюхова система (Kokocińska-Kusiak et al., 2021).

Собаки здатні виявляти та розрізняти широкий спектр запахів навіть за надзвичайно низьких концентрацій. Згідно з даними, їхній нюх дає змогу виявити наявність однієї молекули пахучої речовини в одному літрі повітря або одному мілілітрі рідини (Kokocińska-Kusiak et al., 2021). Така надзвичайна чутливість обумовлена специфікою анатомічної будови та фізіологічних механізмів нюхової системи собак.

Кількість нюхових рецепторів у собак варіює залежно від породи – від приблизно 125 мільйонів до 300 мільйонів, причому найвищі показники спостерігаються у таких порід, як бладгаунд та німецька вівчарка. Це забезпечує здатність до високоточної диференціації запахових сигналів (Kokocińska-Kusiak et al., 2021).

Площа нюхового епітелію у собак може сягати 150 см², що суттєво перевищує аналогічний показник у людини (2,5–4 см²) (Kokocińska-Kusiak et al., 2021). Збільшена площа рецепторної поверхні сприяє ефективнішому захопленню й обробці молекул пахучих речовин (Косенко, 2023).

У собак анатомічно розмежовані механізми газообміну та нюхання (ольфакції) (Kokocińska-Kusiak et al., 2021). Під час інспірації (вдиху) повітряний потік диференціюється: основна фракція прямує до нижніх дихальних шляхів для респіраторної функції, тоді як спеціалізований повітряний струмінь через складчасті структури носових раковин (конх) безпосередньо досягає нюхового епітелію. Анатомічна будова носової порожнини собак забезпечує функціональне розділення потоків повітря, що надходить під час вдиху (Kokocińska-Kusiak et al., 2021).

Для інтенсифікації нюхової діяльності собака виконує серію швидких, коротких вдихів із частотою до 5–7 циклів за секунду (Євстафієва і Бучковська, 2021а). Такий ритм сприяє активній циркуляції повітря в нюховій зоні, підвищує концентрацію пахучих речовин на рецепторній поверхні та дає можливість тварині здійснювати триангуляцію джерела запаху, тобто визначати його просторове розташування (Kokocińska-Kusiak et al., 2021).

У процесі підготовки до пошуково-тренувальних робіт собак навчають виявляти ароматний «конус» або «шлейф» запаху живої людини (FEMA …, 2018). Запах людини являє собою складну суміш тисяч летких органіч-

них сполук, які постійно виділяються через шкіру, потовиділення, дихання та метаболічні процеси (зокрема, продукти розпаду) (Басай і Кириченко, 2002; Косенко, 2023).

Собаки здатні розрізняти індивідуальний запах людини, який, згідно із сучасними уявленнями, має генетичну детермінацію (Юсупов та ін., 2023a). Кожна спеціально навчена собака здатна виявляти запах людини навіть за складних умов (Barletta, 2019).

Зокрема, окремі породи, спеціалізовані на пошуково-рятувальних роботах, можуть виявляти запах людини крізь товщу снігу (наприклад, лавинні собаки – до 5 метрів) або в умовах техногенних завалів, ефективно диференціюючи запах людини від запахів тварин (Beebe et al., 2016).

Стандартом для службового використання є міцний або міцно-сухий тип конституції, що характеризується гармонійною будовою тіла, добре розвиненою мускулатурою та витривалістю (Браташ та ін., 2007). Для забезпечення ефективної роботи собаки у службових умовах необхідним є сильний, врівноважений і рухливий тип вищої нервової діяльності (Кузнєцов, 2023). Представники цього типу демонструють високу стресостійкість, стабільну поведінкову реакцію на зовнішні подразники, зокрема гучні звуки (Приходько та ін., 2023; Кузнєцов, 2023), а також добре піддаються дресируванню, швидко засвоюють навички та чітко виконують команди (Виноград, 2011).

Порівняльна характеристика порід службових собак. Породи службових собак відрізняються фізіологічними, біологічними особливостями, які дають змогу розвивати їх службові функції та використовувати в рятувальних роботах (Рувін, 1999; Яценко, 2022).

Німецька вівчарка: собака середньо-великого розміру, міцної, мускулистої статури; з високою витривалістю, працездатністю; тип ВНД врівноважений, з яскраво вираженим захисним інстинктом. Службові функції: використовується в поліції, армії, рятувальних службах, як собака-поводир (Укрінформ, 2025).

Лабрадор-ретрівер: велика, мускулиста собака з міцною статурою, короткою подвійною шерстю та характерним «хвостом видри»; має природну схильність до води, м'яку хватку пащі та схильність до ожиріння; доброзичлива, енергійна, розумна, легко піддається дресируванню. Службові функції: водний рятувальник, пошукова собака, собака-терапевт, поводир (Юсупов та ін., 2023b).

Бельгійська вівчарка (малінуа): тварини середнього розміру, сухого та міцного типу конституції, з короткою шерстю; швидкі та витривалі, спритні, з тривалою працездатністю, здатні самостійно приймати рішення (Євстафієва і Бучковська, 2021b). Службові функції: робота в поліції, пошуково-рятувальних службах, на митниці, в охороні та армії (Косенко, 2023).

Сенбернар: великі, масивні собаки із широкою головою та потужним корпусом; існують довгошерсті та короткошерсті різновиди; характеризуються значною вагою, повільними темпами росту (до 2–3 років); тип ВНД – врівноважений, характер доброзичливий. Службові функції: гірський рятувальник, собака-компаньйон (Barletta, 2019).

Ньюфаундленд: собака великого розміру з масивним скелетом, довгою густою водонепроникною шерстю; характерними анатомо-фізіологічними ознаками є наявність міжпальцевих перетинок, добре розвинені легені та вроджена здатність до плавання; спокійна, смілива, доброзичлива, вірна (Потушинська і Жданова, 2014). Службові функції: водний рятувальник (Селюков, 2020).

Службові собаки навчаються різних способів сигналізації про виявлення людини (FEMA …, 2018). Залежно від умов роботи та спеціалізації вони можуть демонструвати одну з таких поведінкових моделей:

– Локалізаційна індикація – собака зупиняється безпосередньо на місці знахідки та голосно гавкає, привертаючи увагу кінолога (FEMA …, 2018).

– Пошуково-провідникова поведінка – після виявлення джерела запаху собака повертається до кінолога та веде його до місця знахідки (характерно для лавинних собак) (Training…, 2012).

– Стійка з голосовим сигналом – тварина фіксує положення тіла в напрямку джерела запаху та подає голосовий сигнал (FEMA …, 2018).

Невід'ємною рисою ефективної службової собаки є відсутність страху перед незнайомими об'єктами, людьми, різкими звуками та нестабільними або складними поверхнями. Така поведінкова стійкість є критично важливою для роботи в екстремальних умовах.

Особливості професійної підготовки службових собак. Спеціалізована підготовка

є ключовим етапом формування цілеспрямованої пошукової поведінки у службових собак, під час якого їхній природний нюх трансформується у високоточний інструмент для виявлення джерел запаху (Training …, 2012). У роботі на завалах розрізняють два основні, принципово різні напрями тренувань, що ґрунтуються на типі запаху, який має бути виявлений (FEMA …, 2018; Martin et al., 2020).

1. Пошук живих людей (Live Find Dogs). Пріоритетний напрям у перші дні після надзвичайної ситуації та спрямований на виявлення живих, заблокованих постраждалих (Наказ …, 2018a). Собаки навчаються ідентифікувати специфічний запах живої людини – складну суміш летких органічних сполук, що виділяються з потом, диханням та через шкірні покриви, – і водночас ігнорувати сторонні запахи, зокрема запахи розкладання або тваринного походження (Косенко, 2023).

Ключовим елементом тренувального процесу є робота з фігурантом (тренером або асистентом), який імітує постраждалого, перебуваючи в завалах, під конструктивними елементами або в обмежених просторах (Training…, 2012; Dickinson & Feuerbacher, 2025). Поступово ускладнюються умови приховування (збільшення глибини завалу, кількості перешкод, дистанції до джерела запаху), що стимулює концентрацію уваги й активність пошукової поведінки собаки (FEMA …, 2018).

Після виявлення джерела запаху собака повинна чітко сигналізувати про знахідку, використовуючи заздалегідь сформовану умовну поведінкову реакцію. Найпоширенішим і водночас найбезпечнішим способом індикації на завалах є локалізаційний гавкіт – собака інтенсивно гавкає безпосередньо біля місця виявлення запаху, не залишаючи його (FEMA …, 2018). Інші форми сигналізації, зокрема повернення до кінолога з подальшим приведенням до місця знахідки, можуть застосовуватися як додаткові. Проте на нестабільних або потенційно небезпечних завалах така поведінка вважається менш бажаною, оскільки пересування собаки може спричинити обвал конструкцій. У таких випадках альтернативні сигнали використовуються обмежено або лише після первинної індикації гавкотом.

2. Пошук тіл (Cadaver Dogs). Цей напрям підготовки є окремим, високоспеціалізованим і психологічно складним, оскільки застосовується у випадках, коли надія на виявлення живих осіб вичерпана, а також для пошуку жертв кримінальних злочинів або військових дій (Martin et al., 2020; Селюков, 2023).

Собаки навчаються виявляти запах продуктів розкладу людських тканин. Цей запах якісно відрізняється від запаху живої людини, оскільки формується внаслідок мікробіологічних процесів і супроводжується виділенням специфічних хімічних сполук, зокрема путресцину та кадаверину (Martin et al., 2020).

Тренування здійснюється із застосуванням спеціально підготовлених матеріалів, які імітують або містять запах людських останків (Афанасьєв і Серховець, 2015). У різних країнах використовуються різні підходи: від анатомічних зразків до синтетичних аналогів або медичних відходів (Фурман та ін., 2016; Martin et al., 2020).

Собака, навчена на пошук живих осіб, не повинна залучатися до пошуку тіл загиблих, і навпаки (Training …, 2012). Змішування цих завдань створює так званий конфлікт запахів, що може призвести до зниження точності пошуку та втрати мотивації у тварини (Training …, 2012; Martin et al., 2020).

Для собак, спеціалізованих на виявленні людських останків (Cadaver Dogs), характерна пасивна форма індикації, що дає змогу уникнути пошкодження тендітних біологічних матеріалів та зберегти цілісність місця події – це особливо важливо в криміналістичних розслідуваннях (Martin et al., 2020). Найпоширенішими формами сигналу є: лежання – собака тихо лягає у місці локалізації запаху; сидіння – собака сідає, після чого кінолог позначає місце для подальшого обстеження (FEMA …, 2018).

Обидва напрями – пошук живих осіб та тіл загиблих – вимагають регулярних, реалістичних тренувань у максимально наближених до реальних умов завалів. Це критично важливо для забезпечення високої точності, надійності й оперативності роботи (Наказ…, 2018b).

Саме в екстремальних умовах надзвичайних ситуацій пошуково-рятувальні собаки демонструють найвищу ефективність, поєднуючи фізичну витривалість, нюхову чутливість та адаптивну поведінку (Greatbatch et al., 2015).

Тактика застосування кінологічних підрозділів у структурі рятувальних операцій. Застосування собак у рятувальних операціях має глибокі історичні корені, що беруть початок із практики пошуку людей, які

потрапили під снігові лавини. Класичним прикладом є використання собак породи сенбернар у гірських рятувальних службах (Цвігун та ін., 2020).

У сучасній практиці кінологічні підрозділи є невід'ємною складовою діяльності Міжнародної пошуково-рятувальної консультативної групи (INSARAG) при Організації Об'єднаних Націй, а також національних рятувальних служб у багатьох країнах світу (FEMA ..., 2018). В Україні кінологічні підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) поряд із волонтерськими організаціями систематично залучаються до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, включно з військовими обстрілами. Це підкреслює високу практичну значущість та ефективність їхньої роботи (Кінологічний..., 2023; Селюков, 2023).

Важливість оперативного й ефективного виявлення постраждалих у межах так званої золотої години (або золотого часу виживання) зумовлена трьома ключовими факторами: медичним, тактичним і психологічним (FEMA, 2018).

1. Медичний фактор: максимізація шансів на виживання. Поняття «золотої години» описує критичний період, що настає безпосередньо після отримання травми (зокрема, внаслідок обвалу, землетрусу чи іншої надзвичайної ситуації), протягом якого надання невідкладної медичної допомоги є найбільш ефективним. Своєчасне виявлення й евакуація постраждалих з-під завалів, а також оперативне надання кваліфікованої медичної допомоги є вирішальними чинниками, що суттєво підвищують імовірність виживання (Селюков, 2023). Швидке реагування дає змогу запобігти або мінімізувати розвиток травматичного шоку, масивної крововтрати та гіпотермії – основних причин летальних випадків у зоні завалів.

2. Тактичний фактор: стан завалу. Перші години після катастрофи вважаються найбільш сприятливими для проведення пошуково-рятувальних робіт з погляду структури завалу та загальних умов доступу (Наказ..., 2002). Попри наявні ризики, у цей період завал зазвичай є відносно нестабільним і ще не зазнав впливу зовнішніх чинників, як-от атмосферні опади, вторинні обвали чи техногенні зміни. Це створює умови для більш ефективної роботи рятувальників і службових собак. Запах живої людини, який є мішенню для пошукових собак, має найвищу концентрацію та чіткість саме в перші години після події. Із часом леткі органічні сполуки, що формують індивідуальний запах, розсіюються, змішуються із запахами будівельних матеріалів, ґрунту, палива й інших домішок, що значно ускладнює ідентифікацію джерела запаху (Косенко, 2023).

3. Психологічний фактор. Швидкий початок пошуково-рятувальної операції та оперативне виявлення перших постраждалих має критичне значення для психологічного стану як самих постраждалих, так і рятувальників. У перші години після катастрофи своєчасне виявлення ознак життя сприяє зниженню рівня тривоги, підтримує мотивацію рятувальних команд і формує надію на успішне завершення операції (Євсюков, 2007; Миронець і Тимченко, 2008). У цьому контексті роль пошуково-рятувальних собак на початковому етапі полягає у максимально швидкому первинному обстеженні великих площ завалу з метою негайної локалізації постраждалих. Це дає змогу оперативно визначити пріоритетні ділянки для подальших рятувальних дій, що відповідає концепції «золотої години» виживання (Greatbatch et al., 2015).

Проблема обмеженості людських сенсорних і фізичних можливостей у пошуку постраждалих під завалами є одним із ключових аргументів на користь залучення пошуково-рятувальних собак (Потушинська і Жданова, 2014). Ця обмеженість проявляється в кількох критичних аспектах:

1. Нюхова чутливість. Людський нюх є надзвичайно неефективним для виявлення запаху живої людини, заблокованої під товщею бетону, металу чи ґрунту. Натомість собаки здатні розпізнавати запахи в концентраціях, які є недоступними для людини (Kokocińska-Kusiak et al., 2021).

2. Акустичне сприйняття. Людський слух не здатен ідентифікувати слабкі звуки, як-от стогін або дихання, на великій відстані чи крізь багатошарові перешкоди, що значно обмежує ефективність аудіального пошуку.

3. Візуальні обмеження. У більшості випадків потенційні місця перебування постраждалих на завалах є прихованими. Людина-рятувальник має доступ лише до поверхневих шарів, що суттєво знижує імовірність виявлення заблокованих осіб без допомоги спеціалізованих засобів (Потушинська і Жданова, 2014).

Таким чином, службові собаки компенсують критичні сенсорні обмеження людини, забезпечуючи високу ефективність пошуку

в умовах обмеженої видимості, акустичної ізоляції та складної структури завалу.

Ще одним важливим моментом під час проведення пошукових і рятувальних робіт є обмеження простору та доступу. Завали, що утворюються внаслідок катастроф, часто містять вузькі щілини, порожнини та нестабільні конструктивні елементи, проникнення в які є небезпечним або фізично неможливим для людини-рятувальника. Завдяки компактним розмірам, гнучкості та високій маневровості службові собаки здатні ефективно обстежувати такі важкодоступні ділянки (Іванов, 2022). Крім того, людина змушена проводити обстеження завалу повільно та методично, що потребує значних часових ресурсів. Натомість собака, орієнтуючись на повітряні потоки, здатна швидко сканувати великі площі з метою первинної локалізації джерел запаху, що значно прискорює процес пошуку (Greatbatch et al., 2015).

Варто зауважити, що під час рятувально-пошукових заходів постійно існує ризик вторинного обвалу. Працюючи на завалі, рятувальники ризикують травмуватися від гострих уламків або потрапити під вторинний обвал. Залучення собак мінімізує ризик для людей на етапі первинної розвідки (Наказ …, 2025). Тривала робота в екстремальних умовах, під психологічним тиском і фізичним навантаженням, швидко виснажує людські ресурси. Застосування пошуково-рятувальних собак дає змогу нівелювати обмеження людських можливостей під час пошукових операцій.

В умовах збройної агресії та систематичних руйнувань об'єктів цивільної інфраструктури, зокрема на території України, пошуково-рятувальні собаки, як-от бельгійська вівчарка малінуа та німецька вівчарка, відіграють ключову роль у швидкому виявленні ознак життя під завалами. Висока фізична витривалість, сенсорна чутливість і здатність до роботи в екстремальних умовах роблять собак незамінним інструментом у складі рятувальних підрозділів, особливо в перші години після обстрілів або техногенних катастроф (Суспільне…, 2022; Селюков, 2023).

Тактика застосування пошуково-рятувальних собак на завалі (Rubble Search). Ефективність кінологічного підрозділу на місці значною мірою залежить від роботи, яка враховує особливості запаху, середовища та технічні можливості (Наказ…, 2025). Зокрема, запахові молекули, що виділяються постраждалим, піднімаються вгору або виходять на поверхню завалу через найдрібніші мікротріщини, щілини та пори в будівельних матеріалах (бетон, ґрунт) (Косенко, 2023). На завалах і руїнах запахові молекули часто переносяться тепловими потоками (навіть невелике тепло тіла людини під завалами створює висхідний потік повітря) або вітром. Собака вчиться працювати саме із цими повітряними потоками (FEMA …, 2018).

Спеціально навчена собака фокусується суто на запаху живої людини, ігноруючи при цьому сторонні запахи, запахи їжі, тварин, розкладання чи палива. Це дає їй можливість із високою точністю виявити, навіть якщо джерело запаху перебуває під кількома метрами твердих матеріалів, що є неможливим завданням для людини чи більшості технічних сенсорів (Barletta, 2019).

Тактика організації пошукових робіт на завалах. Для забезпечення повноти, систематичності й ефективності обстеження зони руйнувань у пошуково-рятувальних операціях застосовується принцип зонування, що передбачає чітку організацію роботи кінологічних пар (кінолог + службова собака). Основні тактичні елементи такі:

– розбивка території завалів на зони (сектори, квадрати). Керівник операції ділить територію завалу на менші, керовані ділянки – квадрати або сектори. Це дає змогу призначити кожній кінологічній парі чітко визначену зону відповідальності, що сприяє уникненню дублювання та пропусків (FEMA …, 2018);

– метод «естафети» (подвійна перевірка). Для підвищення надійності пошуку застосовується стратегія повторного обстеження: після завершення роботи однієї кінологічної пари ту саму ділянку обстежує інша пара (іноді з іншої організації). Такий підхід мінімізує ризик пропуску постраждалих, зумовлений втомою собаки або складною конфігурацією повітряних потоків (Greatbatch et al., 2015);

– стратегія руху собаки. Службова собака працює проти вітру або впоперек його напрямку, що дає змогу нюховим рецепторам ефективно захоплювати запаховий шлейф, який переноситься повітряним потоком від джерела запаху. Кінолог коригує напрямок руху, не використовуючи поводець, забезпечуючи свободу обстеження території (FEMA …, 2018; Косенко, 2023);

– сигналізація та маркування місця знахідки. У разі виявлення запаху живої

людини собака подає чіткий голосовий сигнал (гавкіт). Кінолог негайно маркує місце знахідки (за допомогою прапорця, фарби або спеціального маячка), фіксує GPS-координати та передає інформацію до штабу. Після цього робота собаки на цій точці припиняється з метою збереження її мотивації та уникнення повторного навантаження (Training..., 2012).

Екіпірування собаки та кінолога. Застосування спеціального екіпірування є важливою умовою забезпечення безпеки службової собаки та підвищення ефективності її роботи в екстремальних умовах, зокрема на завалах:

– спеціальні шлейки. Замість нашийника використовуються шлейки, які щільно охоплюють корпус собаки. Їхнє призначення полягає не в керуванні, а в можливості оперативного підхоплення або підняття собаки у випадку її падіння чи застрягання в небезпечній порожнині. На шлейках часто закріплюються сигнальні елементи для візуальної ідентифікації (Наказ..., 2025);

– захисне взуття (черевики): застосовується в зонах із високим ризиком травмування – на завалах, де присутні уламки скла, гострий метал та інші небезпечні матеріали. Попри те що деякі кінологи вважають взуття фактором зниження тактильної чутливості та порушення балансу, воно є необхідним засобом захисту лап від серйозних пошкоджень (Гайдук, 2017);

– біттери (Beeper/Signaling Devices): компактні світлові або звукові маячки, що кріпляться до шлейки. Вони дають можливість кінологу відстежувати переміщення собаки та її місцезнаходження в умовах обмеженої видимості, задимлення або темряви (FEMA, 2018);

– GPS-трекери: використовуються для фіксації маршруту пошуку (трекінгу), що дає змогу оперативному штабу аналізувати обстежені зони, виявляти прогалини та планувати повторну перевірку ділянок.

Формування поведінкових і психологічних якостей під час навчання службових собак забезпечує в подальшому успіх роботи собаки на завалі (Training..., 2012).

1. Для ефективного функціонування в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема на завалах, пошуково-рятувальна собака повинна демонструвати інтеграцію низки ключових поведінкових моделей, що забезпечують її витривалість, мотивацію та адаптивність:

– витривалість і фізична підготовка. Робота на завалі є фізично виснажливою: стрибки, лазіння, пересування серед гострих уламків. Собака має перебувати у відмінній фізичній формі, щоб працювати безперервно протягом тривалого часу з короткими перервами, не втрачаючи концентрації (Браташ та ін., 2007; Гайдук, 2017);

– мотивація. Це базовий рушійний чинник ефективної роботи. Для собаки пошук не є рутинною діяльністю, а сприймається як високомотивована гра (Dickinson & Feuerbacher, 2025);

– ігрова мотивація. Більшість службових собак працюють заради винагороди у вигляді улюбленої іграшки (м'ячика, ганчірки, каната). У процесі тренування знайдена людина асоціюється з джерелом цієї винагороди, що підтримує азарт і бажання продовжувати пошук (Training..., 2012);

– харчова мотивація. Може застосовуватися для окремих порід або на специфічних етапах тренувального процесу як додатковий стимул (Була, 2009);

– стійкість до стресу й адаптивність. Собака повинна демонструвати здатність ігнорувати сильні відволікальні чинники, характерні для зони катастроф: гучні звуки (техніка, вибухи, сирени), вібрації, нестабільні поверхні, дим, запахи пального чи вибухових речовин. Важливо, щоб тварина зберігала впевненість і не панікувала в нових, небезпечних умовах (Кузнєцов, 2023).

2. Ефективність роботи пошуково-рятувального дуету критично залежить від міцного взаєморозуміння між кінологом і його чотирилапим партнером (Виноград, 2011). Взаємна довіра є фундаментом цієї взаємодії: кінолог повинен повністю покладатися на нюхові здібності собаки, а собака – беззастережно довіряти кінологу як джерелу захисту, рішень і винагороди (Training..., 2012). Кінолог має володіти навичками інтерпретації поведінки собаки, тобто вміти «читати» її реакції. Це передбачає розпізнавання:

– прямих сигналів – чітких поведінкових проявів, як-от інтенсивний гавкіт у зоні локалізації запаху;

– непрямих сигналів – зміни темпу дихання, раптові зупинки, перемикання уваги, які можуть свідчити про наявність запаху, недостатнього для остаточного спрацювання (FEMA ..., 2018).

Кінолог також несе відповідальність за підтримку мотивації собаки та її психоемо-

ційного стану під час виснажливої роботи. У хаотичних умовах завалу він виступає єдиним стабілізуючим чинником, що дає змогу собаці зосередитися на пошуку (Євсюков, 2007).

Функціонально собака виконує роль високочутливого біологічного сенсора, а кінолог – оператора цього сенсора, який забезпечує його ефективне функціонування, інтерпретує отримані дані та приймає рішення щодо подальших дій рятувальної команди.

Основні проблеми та перспективи розвитку кінологічних служб в умовах сучасних викликів. Одним із ключових механізмів забезпечення ефективності кінологічних служб є регулярна атестація службових пар (кінолог + службова собака), яка зазвичай проводиться щорічно або раз на два роки. Вона виконує низку критично важливих функцій, що мають прямий вплив на готовність до реагування в умовах надзвичайних ситуацій (Інструкція з організації діяльності кінологічних підрозділів ДСНС):

1. Підтримка професійних навичок (Maintenance). Навички пошуку, послуху та взаємодії можуть поступово погіршуватися без систематичного тренування. Регулярна атестація стимулює кінолога підтримувати високий рівень підготовки протягом усього року (Training ..., 2012).

2. Підтвердження оперативної надійності. Катастрофи мають непередбачуваний характер. Сертифікація засвідчує, що кінологічна пара готова до негайного розгортання та здатна ефективно працювати під тиском часу, у складних і небезпечних умовах (FEMA ..., 2018).

3. Моніторинг змін у функціональному стані собаки. З віком, унаслідок травм або зниження мотивації робочі якості собаки можуть змінюватися. Атестація дає можливість об'єктивно оцінити її готовність до подальшого виконання службових завдань (Barletta, 2019).

4. Гарантії професійної придатності для керівництва операцій. Сертифікація кінологічної команди є об'єктивним критерієм її професійної компетентності, що підвищує рівень довіри з боку керівника рятувального штабу до оперативної інформації, яку надає кінолог (Тімченко та ін., 2014).

Ризики використання службових собак у пошуково-рятувальних операціях. Попри високу ефективність, застосування пошуково-рятувальних собак (ПРС) на завалах супроводжується низкою серйозних обмежень і викликів, які повинні системно враховувати як кінологи, так і оперативні штаби (Barletta, 2019).

1. Одним із ключових ризиків є вплив фізичного та психологічного виснаження на мотивацію та працездатність тварини.

– Фізична та сенсорна втома. Робота на завалі є надзвичайно виснажливою: собака змушена долати нестабільні поверхні, витримувати шумове навантаження та безперервно обробляти мільйони запахових молекул. Такий сенсорний і фізичний стрес призводить до зниження концентрації, втрати точності та підвищення ризику пропуску постраждалих (Dickinson & Feuerbacher, 2025).

– Зниження мотивації («депресія надії»). У випадках, коли собака протягом тривалого часу не знаходить живих людей або всі виявлені особи є загиблими (особливо якщо тварина навчена на пошук живих), може виникнути різке падіння ігрової мотивації. Оскільки пошук для собаки є формою гри з очікуваною винагородою, її відсутність формує асоціацію з негативним або безрезультатним досвідом. Це може призвести до втрати інтересу до роботи й емоційного виснаження. Для запобігання цьому кінолог повинен регулярно підтримувати мотивацію собаки, зокрема через контрольовані «успішні» знахідки, навіть у формі імітації (Training ..., 2012; Dickinson & Feuerbacher, 2025).

2. Ризики травматизму службових собак у зоні завалів. Завал є надзвичайно небезпечним середовищем, що становить серйозну загрозу для здоров'я та життя службової собаки. Ризики травматизму мають бути системно враховані під час планування та проведення пошуково-рятувальних робіт (Кінологів ..., 2025). Основні типи травм такі:

– порізи та проколи. Найпоширенішими ушкодженнями є порізи подушечок лап, міжпальцевого простору й інших ділянок тіла, спричинені гострими уламками скла, арматурою, металевими предметами або краями зруйнованих конструкцій. Для запобігання таким травмам необхідне використання захисного взуття та регулярний ветеринарний огляд (Гайдук, 2017);

– падіння та переломи. Нестабільність конструкцій, слизькі поверхні, приховані порожнини та різкі перепади висот створюють ризик падінь, вивихів і переломів. Для зниження цього ризику кінолог повинен використовувати спеціальну страхувальну шлейку, що дає змогу оперативно втрути-

тися в разі небезпеки (Інструкція з організації діяльності кінологічних підрозділів ДСНС);

– перегрів (тепловий удар). Під час роботи в умовах високої температури, особливо під прямим сонячним промінням, собака зазнає значного фізіологічного навантаження. Це підвищує ризик перегріву, що може призвести до теплового удару. Потрібно забезпечити контроль температурного стану тварини, періодичні перерви та доступ до води (Євстафієва і Бучковська, 2020).

3. Ризик помилкових спрацьовувань (False Alerts). Надійність індикації службової собаки ніколи не досягає абсолютного значення (100 %), оскільки існує низка факторів, здатних спричинити помилкове спрацювання – ситуацію, коли собака подає сигнал за відсутності цільового об'єкта (Dickinson & Feuerbacher, 2015). Основні причини таких спрацьовувань:

– запах раніше присутньої людини (Ghost Scent). У зонах катастроф запах людини може зберігатися на одязі, ґрунті або уламках навіть після її евакуації. Собака, реагуючи на залишковий запах, може подати сигнал, помилково інтерпретуючи його як актуальну присутність. Для зниження цього ризику кінолог має навчати собаку розрізняти інтенсивність, напрямок і свіжість запахового шлейфу (Басай і Кириченко, 2002);

– запахове забруднення (Contamination). Сторонні сильні запахи – витоки газу, пального, хімічних речовин – можуть тимчасово пригнічувати нюх собаки або викликати плутанину в ідентифікації джерела запаху. Це особливо актуально в умовах техногенних аварій або обстрілів (Косенко, 2023);

– зниження точності через емоційне виснаження. Після кількох виявлень загиблих осіб собака, навчена на пошук живих, може почати подавати сигнали на запах тіл через втому, фрустрацію або зниження мотивації. У таких випадках рекомендовано негайно вивести кінологічну пару із зони пошуку для відновлення емоційного стану тварини (Martin et al., 2020).

Особливості використання службових собак в умовах воєнного конфлікту. У контексті сучасних збройних конфліктів, зокрема на території України, кінологічні підрозділи стикаються з додатковими, надзвичайно високими ризиками, які суттєво ускладнюють проведення пошуково-рятувальних операцій (Іванов, 2022; Селюков, 2023). Основні загрози:

– шумове навантаження та загроза повторних атак. Постійна небезпека повторних обстрілів, повітряних тривог, вибухів та шуму артилерії створює екстремальний рівень стресу як для собаки, так і для кінолога. Це потребує підвищеної стресостійкості, адаптивності та спеціальної підготовки до роботи в умовах бойових дій (Кузнєцов, 2023);

– мінна небезпека. У зонах руйнувань можуть бути присутні нездетоновані боєприпаси, міни або вибухонебезпечні предмети, що становлять пряму загрозу життю кінологічної пари. Робота в таких умовах потребує координації із саперними підрозділами та дотримання протимінних протоколів (Селюков, 2023);

– необхідність засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). У випадках роботи в зонах хімічного забруднення, підвищеної фрагментаційної небезпеки або ризику ураження уламками, виникає потреба у використанні спеціальних захисних засобів – бронежилетів, окулярів, масок. Хоча такі засоби можуть частково обмежувати рухливість собаки, вони є критично важливими для збереження її життя та працездатності (Наказ…, 2025).

Висновки

1. Пошуково-рятувальні собаки (ПРС) відіграють критично важливу роль у виявленні та порятунку осіб, заблокованих під завалами внаслідок техногенних катастроф, природних лих або воєнних дій. Їхнє застосування є стратегічно обґрунтованим на всіх етапах рятувальної операції – від первинної розвідки до локалізації постраждалих.

2. Ефективність ПРС ґрунтується на унікальному поєднанні біологічних, поведінкових і тактичних чинників:

– біологічна перевага. Собаки мають надзвичайно чутливий нюх, здатний виявляти леткі органічні сполуки (ЛОС) живої людини навіть крізь щільні перешкоди (бетон, ґрунт), що недоступно для більшості технічних сенсорів;

– спеціалізована підготовка. Успішна робота можлива лише за умови багатоетапного тренування, що передбачає ранню соціалізацію, формування мотиваційної бази (ігрової, харчової), адаптацію до екстремальних умов та чітке розмежування типів пошуку (живі особи vs тіла загиблих);

– тактична ефективність. Службова собака здатна швидко обстежити великі площі завалу, проникати у важкодоступні ділянки та замінити десятки рятувальників на етапі первинного сканування.

3. Попри технологічний прогрес (дрони, тепловізори, акустичні сенсори), ПРС залишаються незамінним компонентом у критичній фазі рятувальної операції, особливо в межах «золотої години». Вони поєднують високу швидкість обробки території, здатність до біоідентифікації (розпізнавання живої людини) та адаптивність до динамічного, небезпечного середовища.

4. Кінологічний розрахунок не може бути замінений технікою, а лише доповнений нею. Собака виступає першим сенсором, який оперативно локалізує точку інтересу, після чого до роботи залучаються рятувальники та важке обладнання. Такий комплексний підхід забезпечує максимальну ефективність пошуку та порятунку.

Список використаної літератури

Афанасьєв А.О., Серховець С.В. Основи підготовки інспекторів кінологів зі службовими собаками до пошуку вибухових речовин, зброї, боєприпасів : навчально-методичний посібник. Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2015. 148 с.

Басай В.Д., Кириченко О.А. Основи одорології : монографія. Івано-Франківськ : Плай, 2002. 576 с.

Браташ І.І., Гомзар В.Ю. Денисенко В.В. Методичні рекомендації щодо підготовки кінологічних розрахунків та утримання службових собак у кінологічних підрозділах МНС України. Ромни, 2007.

Була Л.В. Оцінка службових собак, які дресируються по пошуку наркотичних засобів та зброї : дис. канд. с/г наук : спец. 06.02.01 «Розведення та селекція тварин». Чубинське : УААН, 2009. 171 с.

Виноград О.В. Основи службової кінології : навч. посіб. Хмельницький : Меркьюріті-Поділля, 2011. 192 с.

Гайдук С.В. Основи дресирування, гігієни та годівлі службових собак : навч. посіб. Київ : 2017. 176 с.

Євстафієва Ю.М., Бучковська В.І. Особливості використання службових собак під час оперативно-розшукових та профілактичних заходів. *Таврійський науковий вісник*. 2021a. № 121. С. 127–132. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.121.18.

Євстафієва Ю.М., Бучковська В.І. Використання службових собак для забезпечення публічної безпеки і порядку та протидії злочинності. Актуальні проблеми кримінального права, процесу, криміналістики та оперативно-розшукової діяльності. Хмельницький : Вид-во Національної академії державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, 2021b. С. 85–88.

Євстафієва Ю.М., Бучковська В.І. Теоретичні аспекти організації годівлі службових собак. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2020. Вип. 116. Ч. 1. С. 148–153. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.116.1.20.

Євсюков О.П. Психологічне прогнозування надійності діяльності працівників аварійно-рятувальних підрозділів МНС України : монографія. Харків : УЦЗУ, 2007. 288 с.

Іванов П. Один день із життя собаки-рятувальника. Репортаж з єдиного кінологічного центру ДСНС в Україні, 2022 [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/MSi0LB (дата звернення 10.10.2025).

Кінологів ДСНС та їхніх собак нагородили за порятунок життів та розмінування. Київ, 2025 [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/cjy1wE (дата звернення 10.10.2025).

Косенко С.Ю. Особливості використання службових собак в умовах воєнного часу. Сучасна кінологія: стан, проблеми, перспективи : матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції. Харків, 2023 [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/Jd0Jhz (дата звернення 10.10.2025).

Кузнєцов О.Р. Психологічна стійкість пошуково-рятувальних собак в умовах підвищеного ризику. *Проблеми екстремальної та кризової психології.* 2023. Вип. 18. С. 98–108.

Миронець С.М., Тимченко О.В. Негативні психічні стани рятувальників в умовах надзвичайної ситуації : монографія. Київ : ТОВ «Видавництво Консультант», 2008. 232 с.

Наказ «Про затвердження Інструкції з організації діяльності кінологічних підрозділів ДСНС» № 597 від 11.07.2018. К., 2018a. [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/dfuqwG (дата звернення 10.10.2025).

Наказ «Про затвердження Інструкції з організації кінологічного забезпечення в Державній прикордонній службі України» № 234 від 26.03.2018. К., 2018b. [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/2O67de (дата звернення 10.10.2025).

Наказ «Про затвердження Інструкції з організації розшуку осіб органами внутрішніх справ України» № 765ДСК від 29.07.2002. К., 2002. [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/z3bOZU (дата звернення 10.10.2025).

Наказ «Про затвердження Інструкції про утримання та використання службових собак в Управлінні державної охорони України» № 480 від 09.06.2025. К., 2025. [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/5mHxSw (дата звернення 10.10.2025).

Потушинська О.П., Жданова В.П. Характеристика кінологічного забезпечення окремих правоохоронних органів України. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2014. № 4. С. 141–146.

Приходько Ю.П., Івасишин Т.М., Кульчицький А.Б., Мунчак В.М. Деякі аспекти ситуаційної вибухотехнічної експертизи. *Криміналістика і судова експертиза.* 2023. Вип. 68. С. 450–459. https://doi.org/10.33994/kndise.2023.68.44.

Рувін О.Г. Методичний посібник для навчання фахівців-кінологів з пошуку вибухових пристроїв та вибухівки, вогнепальної зброї та боєприпасів. Київ : ДНДЕКЦ МВС України, 1999.

Селюков В.С. Зародження та розвиток службової кінології в сучасній Україні. *Адміністративне право та поліцейська діяльність*. 2020. № 1. С. 292–298. https://doi.org/10.32631/pb.2020.1.12.

Селюков В.С. Проблеми діяльності кінологічних підрозділів Національної поліції в умовах воєнних дій. *Вісник Харківського національного університету внутрішніх справ*. 2023. № 4. Т. 103. С. 292–298. https://doi.org/10.32631/v.2023.4.31

Суспільне. Новини. Собаки-рятувальники з Дніпропетровщини допомагають шукати живих та загиблих людей. 2022 [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/4rvLof (дата звернення 10.10.2025).

Тімченко О.В., Мордюшенко С.М., Снісаренко А.Г. Професіографічний аналіз діяльності кінологів-рятувальників ДСНС України : монографія. Харків : НУЦЗУ, 2014. 184 с.

Укрінформ. Рятують чотирилапі: надзвичайники показали, як собаки допомагають шукати людей під завалами. 2025 [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/ZsRL8Q (дата звернення 10.10.2025).

Фурман Я.В., Юсупов В.В., Котляренко Л.Т., Дмитрук Р.С. Особливості збирання у досудовому провадженні біологічних слідів людини. Київ : НАВС, 2016. 44 с.

Цвігун А.Т., Бучковська В.І., Євстафієва Ю.М. До історії кінології. Наукові доповіді НУБіП України. 2020. № 2 (84). https://doi.org/10.31548/dopovidi2020.02.016.

Юсупов В.В., Антощук А.О. Збирання запахових слідів на місці події: шляхи удосконалення. *Юридичний науковий електронний журнал.* 2023a. № 3. С. 478–481. https://doi.org/10.32782/2524-0374/2023-3/110.

Юсупов В.В., Антощук А.О., Приходько Ю.П., Копча В.В., Красьоха Я.В., Філіпов Ю.Є. Використання службових собак кінологічними підрозділами Національної поліції України для виявлення вибухових речовин в умовах воєнного стану. Київ : Нац. акад. внутр. справ, 2023b. 46 с.

Яценко І. Судово-ветеринарний експерт як суб'єкт процесуальних правовідносин і судово-експертної діяльності. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики.* 2022. Вип. 3 (28). С. 64–97. https://doi.org/10.32353/khrife.3.2022.05.

Ящук В.О. Дослідження запахових слідів під час розслідування кримінальних правопорушень, що вчиняються із використанням вибухонебезпечних пристроїв, предметів, речовин. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2022. № 9. С. 623–626. https://doi.org/10.32782/2524-0374/2022-9/153.

Barletta M. Local Anesthetics: Pharmacology and Special Preparations. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*. 2019. Vol. 49. No. 6. P. 1109–1125. https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2019.07.004.

Beebe S.C., Howell T.J., Bennett P.C. Using Scent Detection Dogs in Conservation Settings. *Frontiers in Veterinary Science.* 2016. Vol. 3. P. 96. https://doi.org/10.3389/fvets.2016.00096.

Dickinson S., Feuerbacher E.N. Frustration and its impact on search and rescue canines. *Frontiers in Veterinary Science*. 2025. Vol. 12. 546412. https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1546412.

FEMA. Search and Rescue Dog Training Manual. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2018.

Greatbatch, I., Gosling, R.J., Allen, S. Quantifying Search Dog Effectiveness in a Terrestrial Search and Rescue Environment. *Wilderness & Environmental Medicine.* 2015. Vol. 26 (3). P. 327–333. https://doi.org/10.1016/j.wem.2015.02.009.

Kokocińska-Kusiak A., Woszczyło M., Zybala M., Maciocha J., Barłowska K., Dzięcioł M. Canine Olfaction: Physiology, Behavior, and Possibilities for Practical Applications. *Animals*. 2021. Vol. 11 (8). 2463. https://doi.org/10.3390/ani11082463.

Martin C., Diederich C., Verheggen F. Cadaver Dogs and the Deathly Hallows – a survey and review. *Animals*. 2020. Vol. 10 (7). 1219. https://doi.org/10.3390/ani10071219.

Training and Supporting the Search Dog. Dena Foundation, 2012. 400 p.

References

Afanasiev, A.O., & Serkhovets, S.V. (2015). Osnovy pidhotovky inspektoriv kinolohiv zi sluzhbovymy sobakamy do poshuku vybuKhovykh rechovyn, zbroi, boieprypasiv: navchalno-metodychnyi posibnyk [Fundamentals of training K9 inspectors with service dogs for detection of explosives, weapons, and ammunition: A training manual]. Vydavnytstvo NADPSU [in Ukrainian].

Basai, V.D., & Kyrychenko, O.A. (2002). Osnovy odorolohii: monohrafiia [Fundamentals of odorology: A monograph]. Plai [in Ukrainian].

Bratash, I.I., Homzar, V.Yu., & Denysenko, V.V. (2007). Metodychni rekomendatsii shchodo pidhotovky kinolohichnykh rozrakhunkiv ta utrymannia sluzhbovykh sobak u kinolohichnykh pidrozdilakh MNS Ukrainy [Methodological recommendations for the training of K9 units and the maintenance of service dogs in the K9 units of the Ministry of Emergency Situations of Ukraine]. Romny [in Ukrainian].

Bula, L.V. (2009). Otsinka sluzhbovykh sobak, yaki dresyruiutsia po poshuku narkotychnykh zasobiv ta zbroi [Evaluation of service dogs trained to search for narcotic drugs and weapons] Dis. kand. s.-g nauk [Candidate of Agricultural Sciences Dissertation]. UAAN [in Ukrainian].

Vinograd, O.V. (2011). Osnovy sluzhbovoyi kinolohiyi: navch. posib. [Fundamentals of service dog training: A Textbook]. Khmelnytskyi : Merkyuriti-Podillya [in Ukrainian].

Hayduk, S.V. (2017). Osnovy dresyruvannya, higiyeny ta hodivli sluzhbovykh sobak [Fundamentals of Training, Hygiene and Feeding of Service Dogs]. Kyiv : Vyd-vo FOP Marchenko T.V [in Ukrainian].

Yevstafiieva, Yu.M., & Buchkovska, V.I. (2021a). Osoblyvosti vykorystannya sluzhbovykh sobak pid chas operatyvno-rozshukovykh ta profilaktychnykh zakhodiv [Features of Using Service Dogs during Operational Search and Prevention Measures]. *Tavriyskyy naukovyy visnyk. Seriya: Silskohospodarski nauky [Tavriya Scientific Bulletin. Series: Agricultural Sciences],* 121, 127–132. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.121.18 [in Ukrainian].

Yevstafiieva, Yu.M., & Buchkovska, V.I. (2021b). Vykorystannia sluzhbovykh sobak dlia zabezpechennia publichnoyi bezpeky i poriadku ta protydii zlочynnosti [Use of Service Dogs for Ensuring Public Safety and Order and Counteracting Crime]. Aktualni problemy kryminalnoho prava, procesu, kryminalistyky ta operatyvno-rozshukovoi diialnosti]. Khmelnytskyi: Natsionalna akademiia derzhavnoi pryordonnoi sluzhby Ukrainy imeni Bohdana Khmelnytskoho [in Ukrainian].

Yevstafiieva, Yu.M., & Buchkovska, V.I. (2020). Teoretychni aspekty organizatsii hodivli sluzhbovykh sobak [Theoretical Aspects of the Organization of Feeding Service Dogs]. *Tavriyskyy naukovyy visnyk. Seriya: Silskohospodarski nauky [Tavriya Scientific Bulletin. Series: Agricultural Sciences],* 116 (1), 148–153. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.116.1.20 [in Ukrainian].

Yevsyukov, O.P., & Timchenko, O.V. (2007). Psikholozhne prohnozuvannya nadiynosti diyalnosti pratsivnykiv avariyno-ryatuvalnykh pidrozdiliv MNS Ukrayiny [Psychological Forecasting of the Reliability of the Activities of Employees of Emergency Rescue Units of the Ministry of Emergency Situations of Ukraine]. Kharkiv: UCUZ [in Ukrainian].

Ivanov, P. (2022). Odin den iz zhyttya sobaky-ryatuvalnyka. Reportazh z yedynoho kinolohichnoho tsentru DSNS v Ukrayini [One Day from the Life of a Rescue Dog. Report from the Only Cynological Center of the State Emergency Service in Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://is.gd/MSi0LB (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Kinolohiv DSNS ta yikhnikh sobak nagorodyly za poryatunok zhyttiv ta rozmynu vannia (2025). [DSNS cynologists and their dogs awarded for saving lives and demining]. [Electronic resource] URL: https://is.gd/cjy1wE (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Kosenko, S.Yu. (2023). Osoblyvosti vykorystannya sluzhbovykh sobak v umovakh voyennoho chasu [Features of Military Working Dogs Employment During Wartime]. *Suchasna kinolohiia: stan, problemy, perspektyvy : materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii [Modern cynology: status, problems, prospects: materials of the All-Ukrainian scientific and practical internet conference].* [Electronic resource] URL: https://is.gd/Jd0Jhz (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Kuznetsov, O.R. (2023). Psikholozhna stiikist poshukovo-ryatuvalnykh sobak v umovakh pidvyshchenoho ryzyku [Psychological Resilience of Search and Rescue Dogs in Conditions of Increased Risk]. *Problemy ekstremalnoi ta kryzovoi psykholohii [Problems of Extreme and Crisis Psychology]*, 18, 98–108 [in Ukrainian].

Myronets, S.M., & Tymchenko, O.V. (2008). Nehatyvni psykhichni stany riatuvalnykiv v umovakh nadzvychainoi sytuatsii: monohrafiia [Negative mental states of rescuers in emergency situations: A monograph]. Consultant Publishing House [in Ukrainian].

Ministry of Internal Affairs of Ukraine (2018a). «Pro zatverdzhennia Instruktsii z orhanizatsii diialnosti kinolohichnykh pidrozdiliv DSNS» № 597 vid 11.07.2018 [Order "On Approval of the Instructions for Organizing the Activities of DSNS Cynological Units" No. 597 dated July 11, 2018]. [Electronic resource]. URL: https://is.gd/dfuqwG (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Ministry of Internal Affairs of Ukraine (2018b). «Pro zatverdzhennia Instruktsii z orhanizatsii kinolohichnoho zabezpechennia v Derzhavnii prykordonnij sluzhbi Ukrainy» № 234 vid 26.03.2018 [Order "On Approval of the Instructions for Organizing Cynological Support in the State Border Guard Service of Ukraine" No. 234 dated March 26, 2018]. [Electronic resource]. URL: https://is.gd/2O67de (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Ministry of Internal Affairs of Ukraine (2002). «Pro zatverdzhennia Instruktsii z orhanizatsii rozshuku osib orhanamy vnutrishnikh sprav Ukrainy» № 765DSK vid 29.07.2002. [Order "On Approval of the Instructions for Organizing the Search for Persons by Internal Affairs Bodies of Ukraine" No. 765DSK dated July 29, 2002]. [Electronic resource]. URL: https://is.gd/z3bOZU (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Ministry of Internal Affairs of Ukraine (2025). «Pro zatverdzhennia Instruktsii pro utrymannia ta vykorystannia sluzhbovykh sobak v Upravlinni derzhavnoi okhorony Ukrainy» № 480 vid 09.06.2025. [Order "On Approval of the Instructions on Maintenance and Use of Service Dogs in the State Security Administration of Ukraine" No. 480 dated June 9, 2025]. [Electronic resource]. URL: https://is.gd/5mHxSw (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Potushynska, O.P., & Zhdanova, V.P. (2014). Kharakterystyka kinolohichnoho zabezpechennia okremykh pravookhoronnykh orhaniv Ukrainy [Characteristics of K9 support of certain law enforcement agencies of Ukraine]. *Yurydychnyi naukovyi elektronnyi zhurnal [Legal Scientific Electronic Journal]*, 4, 141–146 [in Ukrainian].

Prykhodko, Yu.P., Ivasyshyn, T.M., Kulchytskyi, A.B., & Munchak, V.M. (2023). Deiaki aspekty sytuatsiinoi vybuKhotekhnichnoi ekspertyzy [Some aspects of situational explosive expertise]. *Kryminalistyka i sudova ekspertyza [Criminalistics and Forensic Expertise],* 68, 450–459. https://doi.org/10.33994/kndise.2023.68.44 [in Ukrainian].

Ruvin, O.H. (1999). Metodychnyi posibnyk dlia navchannia fakhivtsiv-kinolohiv z poshuku vybuKhovykh prystroiv ta vybuKhivky, vohne-palnoi zbroi ta boieprypasiv [Methodological manual for training K9 specialists in the search for explosive devices, explosives, firearms, and ammunition]. DNDEKC MVS Ukrainy [in Ukrainian].

Seliukov, V.S. (2020). Zarodzhennia ta rozvytok sluzhbovoi kinolohii v suchasnii Ukraini [The emergence and development of service cynology in modern Ukraine]. *Administratyvne pravo ta politseiska diyalnist [Administrative Law and Police Activities],* 1 (1). https://doi.org/10.32631/pb.2020.1.12 [in Ukrainian].

Seliukov, V.S. (2023). Problemy diialnosti kinolohichnykh pidrozdiliv Natsionalnoi politsii v umovakh voiennykh dii [Problems of activities of K9 units of the National Police in conditions of military actions]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu vnutrishnikh sprav [Bulletin of Kharkiv National University of Internal Affairs]*, 4 (103). https://doi.org/10.32631/v.2023.4.31 [in Ukrainian].

Suspilne News (2022). Sobaky-riatuvalnyky z Dnipropetrovshchyny dopomahayut shukaty zhyvykh ta zahyblykh liudei [Rescue dogs from Dnipropetrovsk region help search for living and dead people]. [Electronic resource]. URL: https://is.gd/4rvLof (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Timchenko, O.V., Mordiushenko, S.M., & Snisarenko, A.H. (2014). Profesiografichnyi analiz diialnosti kinolohiv-riatuvalnykiv DSNS Ukrainy: monohrafiia [Professiographic analysis of the activities of SESU K9 rescuers: A monograph]. NUCZU [in Ukrainian].

Ukrinform (2025). Riatuiut chotyry-lapi: nadzvychainyky pokazaly, yak sobaky dopomahayut shukaty liudei pid zavalamy [Four-legged rescuers: Emergency workers showed how dogs help search for people under the rubble]. [Electronic resource]. URL: https://is.gd/ZsRL8Q (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Furman, Ya. V., Yusupov, V. V., Kotliarenko, L. T., & Dmytruk, R. S. (2016). Osoblyvosti zbyrannia u dosudovomu provadzhenni biolohichnykh slidiv liudyny [Features of collecting human biological traces in pre-trial proceedings]. NAVS [in Ukrainian].

Tsvihun, A.T., Buchkovska, V.I., & Yevstafiieva, Yu.M. (2020). Do istorii kinolohii [To the History of Cynology]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrayiny [Scientific Reports of NUBiP Ukraine],* 2 (84). https://doi.org/10.31548/dopovidi2020.02.016 [in Ukrainian].

Yusupov, V.V., & Antoshchuk, A.O. (2023a). Zbyrannia zapakhovykh slidiv na mistsi podii: shliakhy udoskonalennia [Collecting odor traces at the scene: Ways to improve]. *Yurydychnyy naukovyy elektronnyy zhurnal [Legal Scientific Electronic Journal],* 3, 478–481. https://doi.org/10.32782/2524-0374/2023-3/110 [in Ukrainian].

Yusupov, V.V., Antoshchuk, A.O., Prykhodko, Yu.P., Kopcha, V.V., KrasioKha, Ya.V., & Filipov, Yu.Ye. (2023b). Vykorystannia sluzhbovykh sobak kinolohichnymy pidrozdilamy Natsionalnoi politsii Ukrainy dlia vyiavlennia vybuKhovykh rechovyn v umovakh voiennoho stanu [The use of service dogs by the K9 units of the National Police of Ukraine for detecting explosives under martial law]. NAVS [in Ukrainian].

Yatsenko, I. (2022). Sudovo-veterynarnyi ekspert yak subiekt protsesualnykh pravovidnosyn i sudovo-ekspertnoi diialnosti [Forensic veterinary expert as a subject of procedural legal relations and forensic expert activity]. *Teoriya ta praktyka sudovoyi ekspertyzy i kryminalistyky [Theory and Practice of Forensic Expertise and Criminalistics],* 3 (28), 64–97. https://doi.org/10.32353/khrife.3.2022.05 [in Ukrainian].

Yashchuk, V.O. (2022). Doslidzhennia zapakhovykh slidiv pid chas rozsliduvannia kryminalnykh pravoporushen [Research of odor traces during the investigation of criminal offenses]. *Yurydychnyy naukovyy elektronnyy zhurnal [Legal Scientific Electronic Journal],* 9, 623–626. https://doi.org/10.32782/2524-0374/2022-9/153 [in Ukrainian].

Barletta, M. (2019). Local Anesthetics: Pharmacology and Special Preparations. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 49 (6), 1109–1125. https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2019.07.004 [in English].

Beebe, S.C., Beebe, S.C., Howell, T.J., & Bennett, P.C. (2016). Using Scent Detection Dogs in Conservation Settings. *Frontiers in Veterinary Science*, 3 (9), 6. https://doi.org/10.3389/fvets.2016.00096 [in English].

Dickinson, S., & Feuerbacher, E.N. (2025). Frustration and its impact on search and rescue canines. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 546412. https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1546412 [in English].

FEMA. Search and Rescue Dog Training Manual. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency [in English].

Greatbatch, I., Gosling, R.J., & Allen, S. (2015). Quantifying Search Dog Effectiveness in a Terrestrial Search and Rescue Environment. *Wilderness & Environmental Medicine*, 26 (3), 327–333. https://doi.org/10.1016/j.wem.2015.02.009 [in English].

Kokocińska-Kusiak, A., Woszczyło, M., Zybala, M., Maciocha, J., Barłowska, K., & Dzięcioł, M. (2021). Canine Olfaction: Physiology, Behavior, and Possibilities for Practical Applications. *Animals*, 11 (8), 2463. https://doi.org/10.3390/ani11082463 [in English].

Martin, C., Diederich, C., & Verheggen, F. (2020). Cadaver Dogs and the Deathly Hallows – a survey and review. *Animals*, 10 (7), 1219. https://doi.org/10.3390/ani10071219 [in English].

Training and Supporting the Search Dog (2012). Dena Foundation [in English].

Отримано: 29.10.2025
Прийнято: 24.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 613.83:159.9.072:378.014.6 + 504.05 + 534.83
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.7

ВПЛИВ ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА АДАПТАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ В УМОВАХ НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

І. П. Онищук[1]

У статті розглянуто проблему шумового навантаження як одного із ключових несприятливих чинників навчального середовища, що впливає на психофізіологічний стан здобувачів вищої освіти. Метою дослідження було визначення рівня еквівалентного шумового навантаження в навчальних приміщеннях і оцінювання його впливу на адаптаційний потенціал студентів за формулою Р.М. Баєвського.

У дослідженні взяли участь 20 студентів віком від 19 до 22 років. Вимірювання рівнів шуму проводилися в різних типах приміщень (лекційні аудиторії, лабораторії, коридори) як під час занять, так і в періоди їх відсутності. Для оцінювання адаптаційного потенціалу використовували комплекс фізіологічних показників: частоту серцевих скорочень, артеріальний тиск, масу тіла, зріст і вік. Додатково застосовано анкетування для виявлення суб'єктивного рівня шумового дискомфорту та психоемоційного стану (шкала тривожності Спілбергера).

Результати дослідження показали, що в більшості навчальних приміщень рівень шуму перевищує допустимі санітарні норми, особливо під час занять (до 62 дБА в лекційних аудиторіях і до 70 дБА в коридорах). Установлено статистично значуще зростання адаптаційного потенціалу після перебування в умовах підвищеного шумового навантаження, що свідчить про напруження біологічних механізмів адаптації. Виявлено кореляцію між рівнем шумового дискомфорту та підвищеним рівнем ситуативної тривожності.

Отримані результати підтверджують необхідність врахування акустичних характеристик навчального середовища під час організації освітнього процесу. Запропоновано рекомендації щодо зниження шумового навантаження та підвищення акустичного комфорту в закладах вищої освіти.

Ключові слова: *шумове навантаження, адаптаційний потенціал, еквівалентний рівень шуму, психофізіологічний стан, акустичний дискомфорт, серцево-судинна адаптація, екологія навчального простору.*

[1] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Onyshchuk-I@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2847-8570

IMPACT OF NOISE EXPOSURE ON THE ADAPTIVE POTENTIAL OF HIGHER EDUCATION STUDENTS IN THE EDUCATIONAL ENVIRONMENT

I. P. Onyshchuk

This study investigates noise exposure as a critical environmental stressor within higher education settings, emphasizing its impact on students' psychophysiological adaptation. The objective was to quantify equivalent noise levels in various educational spaces and assess their influence on students' adaptive potential using R.M. Baevsky's formula.

A cohort of 20 undergraduate students aged 19–22 participated in the study. Noise measurements were conducted in lecture halls, laboratories, and corridors during instructional periods and non-teaching hours. Adaptive potential was evaluated through a composite of physiological indicators, including heart rate, blood pressure, body mass, height, and age. Additionally, subjective noise discomfort and psycho-emotional status were assessed via a standardized questionnaire and the Spielberger anxiety scale.

Findings revealed that noise levels in most educational facilities exceeded permissible sanitary thresholds, reaching up to 62 dBA in lecture halls and 70 dBA in corridors during active sessions.

A statistically significant increase in adaptive potential was observed following exposure to elevated noise conditions, indicating heightened strain on biological adaptation mechanisms. A positive correlation was identified between perceived noise discomfort and elevated situational anxiety.

The results underscore the necessity of integrating acoustic considerations into the design and management of educational environments. The study proposes targeted recommendations to mitigate noise exposure and enhance acoustic comfort in higher education institutions.

Key words: *noise exposure, adaptive potential, equivalent noise level, psychophysiological state, acoustic discomfort, cardiovascular adaptation, educational environment ecology.*

Вступ

У сучасних наукових дослідженнях дедалі більше уваги приділяється вивченню впливу факторів навколишнього середовища на адаптаційні можливості організму людини. Одним із таких факторів є шумове навантаження, яке, згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, визнано серйозною загрозою для здоров'я населення, зокрема молоді (World …, 2018). Шумове забруднення є однією з найменш помітних, проте надзвичайно впливових форм екологічного навантаження. На відміну від хімічних забруднювачів, шум не має матеріальної форми, оскільки є фізичним явищем (звукові коливання, що поширюються повітряним середовищем) та чинить безпосередній вплив на фізіологічні та психоемоційні процеси в організмі людини. Шум, як форма фізичного забруднення, є результатом акустичних коливань, частина яких потрапляє в діапазон слухового сприйняття людини. Ці коливання трансформуються в сенсорні сигнали, що сприймаються мозком як звукова інформація. Водночас існують звукові хвилі, які не сприймаються свідомо, але можуть впливати на організм через вібраційні механізми або через хронічне подразнення вегетативної нервової системи. Шумове навантаження визначається як постійна або періодична присутність звукової інформації в навколишньому середовищі, що перевищує соціально встановлені або санітарно допустимі межі. Такий вплив може бути як чутним, так і субсенсорним, але в обох випадках – шкідливим. Згідно із численними дослідженнями (Basner & McGuire, 2018), тривалий вплив шуму гучністю понад 85 дБ (що відповідає, наприклад, роботі побутового фена або шуму інтенсивного автомобільного руху) протягом восьми годин на добу створює серйозні ризики для здоров'я. Найбільш вразливою до шумового забруднення є слухова сенсорна система. У результаті дії шуму як фізичного фактору в людей виникає поступове зниження слухової чутливості, що може призвести до часткової або повної глухоти; розвивається тинітус – патологічний стан, за якого людина постійно чує неіснуючі звуки (дзвін, гул, шипіння), що є наслідком порушення передачі сигналів від слухових рецепторів до центральної нервової системи (Lie et al., 2016). За даними європейських епідеміологічних досліджень, понад 14% дорослого населення страждає на симптоми тинітусу, що свідчить про масштабність проблеми (Basner & McGuire, 2018). Шум активує гіпоталамо-гіпофізарно-надниркову вісь, підвищує рівень кортизолу й адреналіну, що призводить до хронічного стресу, порушень серцево-судинної, нервової та ендокринної систем.

У сучасному світі шумове навантаження стало невід'ємною частиною повсякден-

ного життя, особливо в умовах урбанізованого середовища, зокрема й інтенсивного освітнього процесу. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (далі – ВООЗ), шум є другим за значущістю екологічним фактором ризику після забруднення повітря (World …, 2018), що впливає на здоров'я населення. У навчальних закладах, де здобувачі освіти щоденно перебувають у середовищі з підвищеним рівнем шуму (від 55 до 70 дБА), цей вплив набуває особливої ваги. Шум в навчальному середовищі – це не лише фоновий дискомфорт, а й потужний психофізіологічний стресор, який: порушує когнітивні функції (увагу, пам'ять, швидкість мислення); спричиняє втому, дратівливість, тривожність; знижує працездатність і мотивацію до навчання; активує стрес-реалізуючі системи організму (гіпоталамо-гіпофізарно-надниркову вісь, симпатоадреналову систему) (Каднай, 2019). Наявні дані результатів дослідження (Кам'янського державного енергетичного технікуму) свідчать, що адаптація до шуму як фізичного забруднення практично неможлива, а його дія спричиняє розлад ендокринної та нервової систем, зниження працездатності та симптоми перевтоми (Каднай, 2019). З позиції екофізіології адаптаційний потенціал розглядається як інтегральна характеристика функціональних резервів організму, що забезпечує його здатність до гомеостазу в умовах змін зовнішнього середовища. У здобувачів освіти, які перебувають в активному періоді фізіологічного та психоемоційного розвитку, цей потенціал є особливо вразливим до дії акустичних подразників. Дослідження показують, що в умовах підвищеного шумового фону спостерігається зниження адаптаційних резервів серцево-судинної системи, зростання частоти дезадаптаційних реакцій і порушення циркадних ритмів (Литвиненко, 2018). Незважаючи на наявність окремих досліджень, що розглядають вплив шуму на здоров'я, вивчення його впливу саме на адаптаційний потенціал здобувачів освіти (біологічні механізми адаптації) залишається не досить дослідженим, особливо в контексті освітнього середовища. Це ускладнює розроблення ефективних профілактичних заходів, спрямованих на збереження психофізіологічного здоров'я здобувачів.

Отже, дослідження впливу шумового навантаження на адаптаційний потенціал здобувачів освіти є актуальним для екофізіології як науки про життєдіяльність організмів у змінних умовах середовища. Отримані результати прогнозовано дозволять виявити фізіологічні маркери дезадаптації; оцінити резерви серцево-судинної та нейрогуморальної регуляції; обґрунтувати біологічні критерії безпечного акустичного середовища в навчальних закладах. Водночас, як зазначає О.Д. Литвиненко (Литвиненко, 2018), у науковій літературі спостерігається дефіцит диференційованих підходів до вивчення структури адаптаційного потенціалу, особливо в контексті дії зовнішніх стресорів, як-от шум.

Отже, актуальність дослідження зумовлена: наявністю хронічного шумового навантаження в освітньому середовищі; недостатньою вивченістю біологічних механізмів дії шуму на адаптаційні резерви організму; потребою в упровадженні науково обґрунтованих підходів до гігієни навчального середовища; важливістю збереження психофізіологічного здоров'я молоді як стратегічного ресурсу суспільства.

Мета дослідження – встановити закономірності впливу шумового навантаження на адаптаційний потенціал здобувачів освіти шляхом оцінювання фізіологічних показників, що характеризують функціональні резерви організму, з метою виявлення маркерів дезадаптації та обґрунтування критеріїв безпечного акустичного середовища в навчальних закладах. Згідно з метою визначені такі завдання дослідження:

– проаналізувати сучасні наукові підходи до вивчення впливу шуму на фізіологічні системи людини, зокрема в контексті адаптаційного потенціалу;

– оцінити рівень шумового навантаження в освітньому середовищі та порівняти його з нормативними показниками;

– визначити фізіологічні показники, що відображають адаптаційний потенціал здобувачів освіти (частота серцевих скорочень, артеріальний тиск, варіабельність серцевого ритму, рівень тривожності тощо);

– дослідити зміни адаптаційного потенціалу під впливом різного рівня шумового навантаження;

– встановити кореляційні зв'язки між рівнем шуму та показниками функціонального стану організму;

– сформулювати біологічно обґрунтовані рекомендації щодо зниження негативного впливу шуму на здобувачів освіти та підвищення їхніх адаптаційних можливостей.

Матеріал і методи

У дослідженні взяли участь двадцять здобувачів освіти жіночої статі, віком від 19 до

22 років, які здобувають освіту на денній формі навчання. Рівень фізичного здоров'я задовільний, хронічні захворювання серцево-судинної, ендокринної та нервової систем в учасників дослідження відсутні. Усі досліджувані були попередньо ознайомлені з метою дослідження та надали інформовану згоду.

Оцінювання еквівалентного шумового навантаження (далі – Leq) здійснювали шляхом вимірювання рівня шуму за допомогою шумоміра (Testo 816-1 з калібратором) класу точності 2, відповідно до вимог ДСТУ ISO 1996-1:2003 (ДСТУ …, 2003). Результати порівнювалися з гігієнічними нормативами (Наказ …, 2019). Дослідження проводилося в навчальних аудиторіях закладу вищої освіти, розташованого в зоні з помірним рівнем міського шуму. Було обрано 4 аудиторій, що відрізнялися за розмірами, орієнтацією вікон, поверховістю та типом оздоблення. Вимірювання здійснювалися в період активного навчального процесу (з 9:00 до 16:00), у будні дні. Основний показник: еквівалентний рівень звукового тиску Leq, дБ (А) – середньозважене значення шуму за логарифмічною шкалою протягом визначеного інтервалу часу. Додаткові параметри: Lmax (максимальний рівень), Lmin (мінімальний рівень), LAeq, T (еквівалентний рівень за заданий інтервал часу T). Схема проведення вимірювань: вимірювання проводилися у трьох просторових точках кожної аудиторії (біля вхідних дверей; у центрі приміщення; біля вікон). Висота встановлення шумоміра – 1,2 м від підлоги, на відстані не менше ніж 1 м від стін та інших відбивних поверхонь. Тривалість кожного вимірювання – 15 хвилин, з фіксацією Leq кожної хвилини. Режими вимірювання: під час занять (присутність студентів, викладача, робочої техніки). У режимі тиші (порожня аудиторія, зачинені вікна та двері). Кожне вимірювання повторювалося тричі для забезпечення достовірності результатів. Нормативна база для оцінювання: ДБН В.2.2-3:2018 «Будинки і споруди. Заклади освіти» (ДБН …, 2018) – граничні рівні шуму в навчальних приміщеннях: ≤35 дБ (А) – під час занять; ≤45 дБ (А) – у режимі очікування.

Для оцінювання адаптаційного потенціалу (далі – АП) здобувачів, як інтегрального показника функціонального стану серцево-судинної системи та загальної здатності до адаптації в умовах змін зовнішнього середовища, використовувалася методика Р.М. Баєвського (Леонтьєва, 2017), яка дозволяє кількісно оцінити функціональні резерви організму без навантажувальних тестів. Дана методика дозволяє: здійснювати донозологічну діагностику; виявляти функціональне перенапруження; прогнозувати ризики розвитку хронічних захворювань; формувати індивідуальні рекомендації щодо способу життя, фізичної активності та режиму праці/відпочинку.

Формула Р.М. Баєвського:

$$АП = 0{,}011 \times ЧСС + 0{,}014 \times САТ + 0{,}008 \times \times ДАТ + 0{,}014 \times (В) + 0{,}009 \times (МТ) – 0{,}009 \times \times (ЗР) – 0{,}27,$$

де: ЧСС – частота серцевих скорочень (уд./хв); САТ – систолічний артеріальний тиск (мм рт. ст.); ДАТ – діастолічний артеріальний тиск (мм рт. ст.); В – вік у роках; МТ – вага в кг; ЗР – зріст у см. Інтерпретація результатів представлена в таблиці 1.

Для визначення гострої реакції на шум здійснювали 2 вимірювання на день: до і після аудиторних занять. Для виявлення хронічного впливу шумового навантаження здійснювали серійні вимірювання протягом кількох тижнів.

Для виявлення суб'єктивного рівня шумового дискомфорту та психоемоційного стану здобувачі проходили анкетування за допомогою стандартизованої психодіагностичної методики з використанням шкали тривожності Спілбергера (Spielberger et al., 1983). Анкетування проводилося в умовах звичного навчального процесу, після перебування в аудиторії протягом не менше 30 хвилин. Анкета для оцінювання шумового дискомфорту містила: суб'єктивну оцінку рівня шуму за 10-бальною шкалою;

Таблиця 1

Оцінювання адаптаційного потенціалу та стану здоров'я за Р.М. Баєвським

Значення АП (ум. од.)	**Стан адаптації**	**Характеристика**
1,50–2,59	Задовільна адаптація	Норма
2,60–3,09	Напруження механізмів адаптації	Ризик дезадаптації
3,10–3,49	Незадовільна адаптація	Потребує корекції
≥3,50	Зрив адаптації	Високий ризик патології

джерела шуму (внутрішні / зовнішні); частоту відчуття дискомфорту (ніколи, іноді, часто, постійно); вплив шуму на концентрацію, втому, роздратування, сонливість; відкрите запитання: «Що, на Вашу думку, могло б покращити акустичний комфорт у цій аудиторії?» тощо. Шкала тривожності Спілбергера (STAI): складається із 40 тверджень: 20 – для оцінювання ситуативної (реактивної) тривожності (далі – СТ); 20 – для оцінювання особистісної тривожності (далі – ОТ). Відповіді оцінювались за 4-бальною шкалою: 1 – «Ні, це не так»; 2 – «Мабуть, так»; 3 – «Правильно»; 4 – «Цілком правильно». Анкетування проводилося в письмовій формі, індивідуально, в умовах тиші. Учасникам надавалися інструкції щодо заповнення обох частин опитувальника. Час на виконання: 15–20 хвилин. Дані були зашифровані для забезпечення анонімності.

Суб'єктивна оцінка шуму аналізувалася за середнім балом і частотою згадування джерел шуму. Рівень тривожності визначався за сумою балів: <30 балів – низький рівень тривожності; 31–45 балів – помірний рівень; >46 балів – високий рівень тривожності.

Методика Спілбергера є валідованим інструментом для оцінювання психоемоційного стану та широко використовується в медико-психологічних дослідженнях. Її застосування дозволяє виявити як ситуативні реакції на подразники (наприклад, шум), так і глибинні особистісні особливості тривожності.

Статистичний аналіз – проводився з використанням програмного забезпечення "Excel".

Результати

Середній рівень шуму (Leq) у навчальному корпусі поза заняттями за відсутності здобувачів становить в середньому 42–46 дБА, тобто в межах норми (ДБН …, 2018). Результати вимірювання шуму в навчальних приміщеннях під час занять та в кімнатах гуртожитку представлені в таблиці 2.

У лабораторії з фізіології людини джерелами шуму є: робота обладнання (джерело електричного струму), а також розмови здобувачів та викладача під час виконання практичних завдань. Рівень шуму перевищує гігієнічні норми на 5–10 дБА, що може впливати на точність фізіологічних вимірювань і спричиняти додаткове навантаження на нервову систему.

Середній рівень шуму в лекційних лабораторіях під час лекції з використанням мультимедійного пристрою фіксується в межах 58–65 дБА – це вище за оптимальний рівень для навчального середовища, рекомендований багатьма стандартами (наприклад, <50 дБА для класних кімнат, згідно з рекомендаціями ВООЗ). Такий рівень шуму може бути допустимим для короткочасного використання мультимедіа, але в разі тривалого впливу може знижувати концентрацію, розбірливість мовлення та когнітивну ефективність здобувачів.

Результати вимірювань фізіологічних показників респондентів у спокої та після шумового навантаження представлені в таблиці 3.

Таблиця 2

Результати вимірювання шуму в досліджуваних приміщеннях

№	Тип приміщення	Стан	Середній рівень шуму (Leq), дБА	Допустимий рівень, дБА	Висновок
1	Лекційна аудиторія № 1	Під час лекції	58–62	≤50	Перевищення нормативу
2	Лекційна аудиторія № 2	Під час лекції	62–65	≤50	Перевищення нормативу
3	Лабораторія з фізіології людини	Під час лабораторного заняття	55–60	≤50	Помірне перевищення
4	Лабораторія з анатомії людини	Під час лабораторного заняття	45–48	≤45	На межі допустимого рівня
5	Коридор біля аудиторій	Перерва	65–70	≤55	Значне перевищення
6	Житлова кімната в гуртожитку	Ніч	38–42	≤35	Незначне перевищення

Таблиця 3

Фізіологічні показники (АП, ЧСС, САТ, ДАТ) у стані спокою та після шумового навантаження

№	АП (спокій)	АП (п. н.)	ЧСС (уд./хв) спокій	ЧСС після	САТ (мм рт. ст.) спокій	САТ після	ДАТ (мм рт. ст.) спокій	ДАТ після
1	1,81	2,62	72	88	118	132	74	84
2	2,00	2,98	75	92	120	138	76	88
3	2,22	3,03	78	94	122	140	78	90
4	2,00	2,74	74	89	119	134	75	86
5	2,00	2,96	75	91	120	137	76	88
6	1,91	2,56	73	87	118	130	74	83
7	2,31	3,16	80	96	124	142	80	92
8	2,14	2,98	77	92	121	138	78	88
9	2,11	2,86	76	90	120	135	77	86
10	1,74	2,56	71	86	117	130	73	82
11	2,01	2,96	75	91	120	137	76	88
12	2,12	3,04	77	93	121	139	78	89
13	2,26	2,78	78	90	122	134	79	85
14	1,83	2,81	72	90	118	136	74	87
15	1,92	2,66	73	88	119	132	75	84
16	2,00	2,74	75	89	120	134	76	85
17	2,41	3,00	81	94	125	140	81	90
18	2,61	3,51	84	100	128	146	83	96
19	2,47	3,33	82	98	127	144	82	94
20	2,49	3,46	83	99	127	145	82	95

Примітка: АП (п. н.) – адаптаційний потенціал після навантаження; ЧСС – частота серцевих скорочень; САТ – систолічний артеріальний тиск; ДАТ – діастолічний артеріальний тиск.

Середнє значення АП респондентів у стані спокою становить 2,1, тоді як після навантаження – 2,98 (стандартне відхилення (Δ) – 0,26). ЧСС здобувачів в середньому у спокої становить 76 та 91відповідно (Δ = 3,9). Варто зауважити, що середні значення САТ та ДАТ в респондентів до та після навантаження теж суттєво різняться. Зокрема, САТ підвищувався на 16, а ДАТ на 11 одиниць відповідно, ΔСАТ = 4,3, ΔДАТ = 3,6.

Для ефективного оцінювання впливу шумового навантаження на фізіологічні показники здобувачів вищої освіти було проведено парний t-тест, який дозволив визначити статистичну значущість змін до та після шумового навантаження (табл. 4). Усі показники демонструють статистично значущі зміни після шумового навантаження ($p < 0,001$), що свідчить про активацію стрес-реакцій організму. Такі результати ілюструють активацію механізмів стресової адаптації в учасників дослідження. Найбільш виражені зміни спостерігаються для показників ЧСС і АТ, що узгоджується з літературними даними про реакцію серцево-судинної системи на акустичний стрес (Münzel et al., 2018).

Також для об'єктивного оцінювання взаємозв'язку між адаптаційним потенціалом (далі – АП) та фізіологічними показниками здобувачів у стані спокою та після шумового навантаження провели кореляційний аналіз за коефіцієнтом Пірсона (табл. 5).

Значення коефіцієнтів Пірсона свідчать про наявність стабільного позитивного кореляційного зв'язку між адаптаційним потенціалом і основними показниками серцево-судинної системи як у стані спокою, так і після шумового навантаження. Найвищий рівень кореляції фіксується між АП та ЧСС ($r = 0,88$ після навантаження), що може свідчити про провідну роль частоти серцевих скорочень у формуванні адаптаційної відповіді на акустичний стрес. Зростання коефіцієнтів після навантаження вказує на посилення взаємозв'язку між показниками в умовах підвищеного фізіологічного напруження, отже, АП є чутливим інтегральним показником функціонального стану організму.

Таблиця 4

Результати парного t-тесту

Показник	t-значення	p-значення	Інтерпретація
АП	14,2	<0,001	Зміна статистично значуща
ЧСС	18,5	<0,001	Значне підвищення після навантаження
САТ	17,3	<0,001	Значне підвищення
ДАТ	16,1	<0,001	Значне підвищення

Таблиця 5

Результати кореляційного аналізу (r-Пірсона)

Пара показників	r (спокій)	r (після навантаження)	Інтерпретація
АП – ЧСС	0,82	0,88	Сильна позитивна кореляція
АП – САТ	0,76	0,84	Помірна до сильної позитивної
АП – ДАТ	0,71	0,81	Помірна позитивна

За результатами опитування та оцінювання здобувачів за шкалою Спілбергера вдалося встановити, що із 20 респондентів у 12 осіб після 4,5 години перебування в умовах акустичного стресу рівень тривожності підвищився до високого (≥46 балів), тоді як до занять у всіх визначався помірний рівень тривожності (31–45 балів).

Зокрема, у 12 здобувачів з високим рівнем тривожності ЧСС зросла із 72 уд./хв до 86 уд./хв; САТ підвищився на 12 мм рт. ст. (зі 112 до 124 мм рт. ст.), а ДАТ – на 8 мм рт. ст. (із 72 до 80 мм рт. ст.). Особливу увагу варто звернути на показник адаптаційного потенціалу, який у середньому зріс із 2,4 до 3,2, що свідчить про зниження рівня адаптації (табл. 6).

Отже, отримані результати підтверджують, що шумове навантаження в навчальному середовищі спричиняє активацію стресових механізмів, особливо у студентів з підвищеною тривожністю, що проявляється у зміні серцево-судинних показників і зниженні адаптаційного резерву.

Коефіцієнт кореляції r = +0,72 між рівнем тривожності та ЧСС свідчить про суттєвий прямий зв'язок між цими показниками: зі зростанням рівня тривожності спостерігається підвищення ЧСС, що є типовою реакцією симпатоадреналової системи на емоційне напруження. Кореляція між рівнем тривожності та показниками систолічного артеріального тиску становить +0,65, що дозволяє припустити: підвищення тривожності супроводжується зростанням артеріального тиску, імовірно, унаслідок активації гіпоталамо-гіпофізарно-надниркової осі.

Найвищий коефіцієнт кореляції (r = +0,81) між рівнем тривожності й адаптаційним потенціалом демонструє пряму залежність АП від рівня тривожності. Оскільки за методикою Баєвського підвищення АП свідчить про зниження адаптаційних резервів, можна зробити висновок, що високий рівень тривожності асоціюється з погіршенням адаптаційного стану організму.

Обговорення

У сучасній науковій літературі шум розглядається як один із провідних несприятливих факторів навколишнього середо-

Таблиця 6

Зміни фізіологічних показників у здобувачів освіти з підвищеним рівнем тривожності

Показник	До занять (M ± SD)	Після занять (M ± SD)	Δ (зміна)
Частота серцевих скорочень (ЧСС), уд./хв	72,3 ± 4,1	86,1 ± 5,2	+13,8
Систолічний артеріальний тиск (САТ), мм рт. ст.	112,5 ± 6,3	124,2 ± 5,9	+11,7
Діастолічний артеріальний тиск (ДАТ), мм рт. ст.	72,1 ± 4,8	80,3 ± 4,6	+8,2
Адаптаційний потенціал (АП за Баєвським)	2,41 ± 0,18	3,21 ± 0,22	+0,80

вища, що має системний вплив на організм людини. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, понад 30% міського населення Європи піддається дії шумового навантаження, що перевищує безпечні рівні (World …, 2018).

А.М. Близнюк (Близнюк, 2017) у своїй роботі зазначає, що шум активує гіпоталамо-гіпофізарно-надниркову вісь, спричиняє підвищення рівня кортизолу, тахікардію, порушення сну та зниження когнітивної продуктивності. Автор підкреслює, що тривала дія шуму може призводити до виснаження адаптаційного потенціалу організму, особливо в молоді з нестійкими механізмами нейрогуморальної регуляції.

У дослідженні, присвяченому психофізіологічним реакціям учнів на шумове навантаження (Renaud et al., 2025), було показано, що акустичне середовище навчальних закладів суттєво впливає на їхнє психологічне та фізичне благополуччя. Подібні результати наведено в роботі (Astuti et al., 2024), де підкреслюється, що адаптаційні реакції студентів мають фазовий характер і можуть змінюватися навіть протягом одного навчального дня. Результати дослідження підтверджують, що шумове навантаження в навчальному середовищі є значущим екологічним і психофізіологічним стресором, який спричиняє системні зміни у функціональному стані організму здобувачів освіти. Динаміка змін частоти серцевих скорочень (ЧСС), артеріального тиску (АТ) та адаптаційного потенціалу (АП) свідчить про активацію стрес-реакцій, що узгоджується з концепцією неспецифічної адаптаційної відповіді організму на дію несприятливих чинників довкілля (Selye, 1976).

Середній рівень шуму в навчальних аудиторіях під час занять (58–65 дБА) перевищує рекомендовані ВООЗ межі для освітнього середовища (≤50 дБА) (World …, 2018). Це формує умови для розвитку хронічного акустичного стресу, що, згідно з даними інших дослідників (Basner & McGuire, 2018), асоціюється зі зниженням когнітивної ефективності, порушенням сну та підвищення ризиків розвитку серцево-судинних захворювань. У процесі даного дослідження встановлено, що навіть відносно короткочасне (від кількох до 30 хвилин) перебування в умовах шуму понад 60 дБА супроводжується статистично значущим підвищенням ЧСС (у середньому на 15 уд./хв), САТ (+16 мм рт. ст.) і ДАТ (+11 мм рт. ст.), що свідчить про активацію симпатоадреналової системи.

Використана під час дослідження методика Баєвського (Козирєв і Козирєва, 2021) дозволяє кількісно оцінити адаптаційний потенціал як інтегральний показник функціональних резервів організму. Оскільки середнє значення адаптаційного потенціалу респондентів змінилось із 2,1 у спокої до 2,98 після шумового навантаження, можна говорити про перехід від задовільного рівня адаптації до стану напруження або навіть дезадаптації. Такі результати частково збігаються з даними, представленими в роботі норвезьких науковців (Lie et al., 2016), де в результаті лонгітюдного дослідження встановлено, що навіть помірне перевищення шумового фону (60–65 дБА) спричиняє зниження варіабельності серцевого ритму та зростання індексу напруження регуляторних систем, а саме гіпоталамо-гіпофізарно-надниркової, симпатичної та парасимпатичної нервових систем.

На особливу уваги заслуговують результати, отримані у групі студентів з підвищеним рівнем тривожності. У них спостерігається більш виражене підвищення ЧСС (+13,8 уд./хв), САТ (+11,7 мм рт. ст.), ДАТ (+8,2 мм рт. ст.) і АП (+0,8), що свідчить про істотне зниження адаптаційних резервів організму в умовах акустичного навантаження. Кореляційний аналіз виявив сильний позитивний зв'язок між рівнем тривожності й адаптаційним потенціалом ($r = +0,81$), що асоціюється з даними іншого дослідження формування адаптаційного потенціалу (Сивохоп та ін., 2024). Згідно з результатами цього дослідження варіабельність серцевого ритму використовується як індикатор адаптаційного потенціалу студентів у стані гіпокінезії – тобто зниженого фізичного навантаження та зниження показників серцевої діяльності у студентів з ознаками психоемоційного напруження. Автори підкреслюють роль симпатоадреналової активації як механізму дезадаптації.

Високий рівень тривожності, як показано в дослідженнях Спілбергера (Spielberger et al., 1983), асоціюється з гіперактивацією гіпоталамо-гіпофізарно-надниркової осі, що може пояснювати підвищення АТ та ЧСС, зниження варіабельності серцевого ритму у відповідь на акустичне навантаження. Це узгоджується з отриманими нами даними

щодо зниження варіабельності серцевого ритму та зростання індексу напруження регуляторних систем у студентів з високим рівнем тривожності. Отримані результати підтверджують, що тривожність є важливим психоемоційним фактором, який тісно пов'язаний зі змінами серцево-судинної регуляції та зниженням адаптаційного потенціалу, тобто шумове навантаження та навчальний стрес можуть бути значущими факторами дезадаптації. Це підкреслює доцільність врахування рівня тривожності під час оцінювання функціонального стану студентів, особливо в умовах дії несприятливих чинників, як-от шумове навантаження.

Фізіологічні зміни, зафіксовані після тривалого шумового навантаження, відображають класичну стресову відповідь організму: активацію симпатоадреналової системи, підвищення тонусу судин, тахікардію та зростання артеріального тиску. Це відповідає фазі тривоги за Г. Сельє (Selye, 1976) та підтверджує, що навіть субсенсорні або помірні акустичні подразники можуть запускати каскад нейрогуморальних реакцій. Високі значення t-статистики ($t = 14,2–18,5$; $p < 0,001$) підтверджують статистичну значущість змін, що дозволяє інтерпретувати їх як надійні біомаркери стресу.

Висновки

1. Шумове навантаження в навчальному середовищі є значущим екологічним та психофізіологічним чинником, що перевищує рекомендовані нормативи (58–65 дБА проти ≤50 дБА за ДБН В.2.2-3:2018 та рекомендаціями ВООЗ), особливо в лекційних аудиторіях і коридорах під час занять і перерв. Це створює умови для розвитку хронічного акустичного стресу у здобувачів.

2. Фізіологічні показники студентів демонструють статистично значущі зміни ($p < 0,001$) у роботі серцево-судинної системи після тривалого шумового навантаження: частота серцевих скорочень зростає в середньому на 15 уд./хв, систолічний артеріальний тиск – на 16 мм рт. ст., діастолічний – на 11 мм рт. ст. Значення рівня адаптаційного потенціалу в середньому підвищується від 2,1 до 2,98, що свідчить про напруження регуляторних систем і зниження функціональних резервів.

3. Кореляційний аналіз підтверджує наявність стабільного позитивного зв'язку між АП та ЧСС ($r = 0,88$), САТ ($r = 0,84$), ДАТ ($r = 0,81$), що свідчить про системну реакцію серцево-судинної регуляції на акустичний стрес. Найвищий рівень кореляції між АП і ЧСС дозволяє розглядати ЧСС як провідний маркер адаптаційної відповіді організму на стрес.

4. Психоемоційний стан студентів, оцінений за шкалою Спілбергера, виявився чутливим до шумового навантаження: у 60% респондентів рівень тривожності після 4,5 години перебування в шумовому середовищі зріс до високого (≥46 балів). У цієї групи спостерігалося більш виражене підвищення ЧСС, АТ та АП, що підтверджує роль тривожності як модератора фізіологічної дезадаптації.

5. Акустичне навантаження в навчальному середовищі варто розглядати як багатофакторний ризик, що поєднує сенсорний, когнітивний і емоційний вплив. Урахування рівня тривожності й адаптаційного потенціалу дозволяє більш точно оцінити функціональний стан здобувачів освіти та прогнозувати ризики дезадаптації.

6. Практична значущість дослідження полягає в необхідності перегляду санітарно-гігієнічних норм для освітніх закладів, упровадження систем акустичного моніторингу, адаптації навчального середовища до індивідуальних психофізіологічних особливостей студентів, а також розроблення програм психоемоційної саморегуляції.

7. Перспективи подальших досліджень включають вивчення довготривалого впливу шуму на когнітивні функції, варіабельність серцевого ритму, гормональні маркери стресу, а також розроблення інтегральних моделей оцінювання адаптаційного стану з урахуванням екологічних, поведінкових і психоемоційних чинників.

Список використаної літератури

Близнюк А.М. Вплив шуму на організм людини. *Педагогіка та психологія.* 2017. № 3. С. 45–49 [Електронний ресурс]. URL: http://dspace.pnpu.edu.ua/handle/123456789/16895 (дата звернення 19.10.2025).

ДБН В.2.2-3:2018. Будинки і споруди. Заклади освіти. Зі Зміною № 1. Затверджено наказом Мінрегіону України від 25.04.2018 р. № 106 [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77080 (дата звернення 20.10.2025).

ДСТУ ISO 1996-1:2003. Акустика. Опис, вимірювання та оцінювання шуму на місцевості. Ч. 1. Основні величини та процедури оцінювання [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=53955 (дата звернення 20.10.2025).

Каднай О.С. Гігієнічна оцінка впливу шуму на розумову працездатність студентів. *Актуальні проблеми та перспективи медицини граничних станів :* матеріали II Науково-практичної конференції студентів та молодих учених, м. Харків, 23 травня 2019 р. Харків : ХНМУ, 2019. С. 23–25. [Електронний ресурс]. URL: https://repo.knmu.edu.ua/items/11a5b965-d706-4ed0-af0e-c1a7ba312f30 (дата звернення 20.10.2025).

Леонтьєва З.Р. Розрахунок адаптаційного потенціалу, оцінка адаптаційних можливостей організму і рівнів здоров'я студентів Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького. *Праці Наукового товариства імені Шевченка. Медичні науки.* Т. XLVII. Львів, 2017. С. 64–70. [Електронний ресурс]. URL: https://mspsss.org.ua/index.php/journal/article/download/35/15/ (дата звернення 20.10.2025).

Литвиненко О.Д. Внутрішня структура адаптаційного потенціалу як системи адаптивностей. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія».* Серія «Психологія». Острог : Вид-во НаУОА, 2018. № 7. С. 59–63. https://doi.org/10.25264/2415-7384-2018-7-59-63

Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму у приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови : наказ МОЗ України від 22.02.2019 р. № 463. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 20.03.2019 р. за № 281/33252 [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82742 (дата звернення 20.10.2025).

Сивохоп Е.М., Ковальчук О.В., Гуменюк І.В., Кравчук Т.М., Левчук С.О. Варіабельність серцевого ритму як критерій оцінки функціонального стану студентів з гіпокінезією. *Педагогічна інноватика: сучасність та перспективи.* 2024. № 4. С. 134–140. https://doi.org/10.32782/ped-uzhnu/2024-4-20

Astuti R.D., Suhardi B., Laksono P.W., Susanto N. Investigating the relationship between noise exposure and human cognitive performance: Attention, stress, and mental workload based on EEG signals using power spectrum density. *Applied Sciences.* 2024. № 14(7). P. 2699. https://doi.org/10.3390/app14072699

Basner M., McGuire S. WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. *Int J Environ Res Public Health.* 2018. Vol. 15(3). P. 519. https://doi.org/10.3390/ijerph15030519

Lie A., Engdahl B., Tambs K. Simplified risk assessment of noise-induced hearing loss by means of 2 spreadsheet models. *Int J Occup Med Environ Health.* 2016. Vol. 29(6). P. 991–999. https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00714

Münzel T., Schmidt F.P., Steven S., Herzog J., Daiber A., Sørensen M. Environmental noise and the cardiovascular system. *Journal of the American College of Cardiology.* 2018. № 71(6). P. 688–697. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.12.015

Renaud F., Verduyckt I., Chang T., et al. Student's Self-Reported Experience of Soundscape: The Link between Noise, Psychological and Physical Well-Being. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2025. № 21(1). P. 84. https://doi.org/10.3390/ijerph21010084

Selye H. The Stress of Life. New York : McGraw-Hill, 1976.

Spielberger C.D., Gorsuch R.L., Lushene R.E. Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Form Y). Palo Alto, CA : Consulting Psychologists Press, 1983. 36 p.

World Health Organization. Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018. [Електронний ресурс]. URL: https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563 (дата звернення 19.10.2025).

References

Blyzniuk, A.M. (2017). Vplyv shumu na orhanizm liudyny [Impact of noise on the human body]. Pedahohika ta psykholohiia [*Pedagogy and psychology*], 3, 45–49. [Electronic resource] URL: http://dspace.pnpu.edu.ua/handle/123456789/16895 (access date 19.10.2025) [in Ukrainian].

DBN V.2.2-3:2018. (2018). Budynky i sporudy. Zaklady osvity. Zi Zminoiu № 1 [Buildings and structures. Educational institutions. With Amendment № 1]. Approved by the Order of the Ministry

of Regional Development of Ukraine № 106 dated April 25, 2018. [Electronic resource] URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77080 (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

DSTU ISO 1996-1:2003. (2003). Akustyka. Opys, vymiriuvannia ta otsiniuvannia shumu na mistsevosti. Chastyna 1. Osnovni velychyny ta protsedury otsiniuvannia [Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1. Basic quantities and assessment procedures]. [Electronic resource] URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=53955 (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Kadnai, O. (2019). Hihiienichna otsinka vplyvu shumu na rozumovu pratsiezdatnist studentiv [Hygienic assessment of the impact of noise on students' mental performance]. Aktualni problemy ta perspektyvy medytsyny hranchnykh staniv: II Naukovo-praktychna konferentsiia studentiv ta molodykh vchenykh, Kharkiv, May 23, 2019. Kharkiv: KhNMU, pp. 23–25. [Electronic resource] URL: https://repo.knmu.edu.ua/items/11a5b965-d706-4ed0-af0e-c1a7ba312f30 (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Leontieva, Z. (2017). Rozrakhunok adaptatsiinoho potentsialu, otsinka adaptatsiinykh mozhlyvostei orhanizmu i rivniv zdorovia studentiv Lvivskoho natsionalnoho medychnoho universytetu imeni Danyla Halytskoho [Calculation of adaptation potential, assessment of adaptive capabilities and health levels of students of Danylo Halytsky Lviv National Medical University]. *Pratsi Naukovoho tovarystva imeni Shevchenka. Medychni nauky [Proc. Shevchenko Sci. Soc. Medical sciences],* Vol. XLVII. Lviv, pp. 64–70. [Electronic resource] URL: https://mspsss.org.ua/index.php/journal/article/download/35/15/ (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Lytvynenko, O.D. (2018). Vnutrishnia struktura adaptatsiinoho potentsialu yak systemy adaptyvnostei [Internal structure of adaptive potential as a system of adaptabilities]. *Naukovi zapysky Natsionalnoho universytetu "Ostrozka akademiia". Seriia "Psykholohiia": zbirnyk naukovykh prats [Scientific Notes of the National University "Ostroh Academy". Series "Psychology": collection of scientific papers],* 7, 59–63. https://doi.org/10.25264/2415-7384-2018-7-59-63 [in Ukrainian].

Nakaz MOZ Ukrainy vid 22.02.2019 № 463. (2019). Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm dopustymykh rivniv shumu v prymishchenniakh zhytlovykh ta hromadskykh budynkiv i na terytorii zhytlovoi zabulovy [Order of the Ministry of Health of Ukraine № 463 dated February 22, 2019. On approval of the State sanitary norms of permissible noise levels in residential and public buildings and in residential areas]. Registered in the Ministry of Justice of Ukraine on March 20, 2019 under № 281/33252. [Electronic resource] URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82742 (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Sivokhop, E.M., Kovalchuk, O.V., Humeniuk, I.V., Kravchuk, T.M., & Levchuk, S.O. (2024). Variabilnist sertsevoho rytmu yak kryterii otsinky funktsionalnoho stanu studentiv z hypokineziieiu [Heart rate variability as a criterion for assessing the functional state of students with hypokinesia]. Pedahohichna innovatyka: suchasnist ta perspektyvy [*Pedagogical innovation: present and future*], 4, 134–140. https://doi.org/10.32782/ped-uzhnu/2024-4-20 [in Ukrainian].

Astuti, R.D., Suhardi, B., Laksono, P.W., & Susanto, N. (2024). Investigating the relationship between noise exposure and human cognitive performance: Attention, stress, and mental workload based on EEG signals using power spectrum density. *Applied Sciences*, 14(7), 2699. https://doi.org/10.3390/app14072699 [in English].

Basner, M., & McGuire, S. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(3), 519. https://doi.org/10.3390/ijerph15030519 [in English].

Lie, A., Engdahl, B., & Tambs, K. (2016). Simplified risk assessment of noise-induced hearing loss by means of 2 spreadsheet models. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 29(6), 991–999. https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00714 [in English].

Münzel, T., Schmidt, F.P., Steven, S., Herzog, J., Daiber, A., & Sørensen, M. (2018). Environmental noise and the cardiovascular system. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(6), 688–697. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.12.015 [in English].

Renaud, F., Verduyckt, I., Chang, T., & et al. (2025). Student's self-reported experience of soundscape: The link between noise, psychological and physical well-being. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(1), 84. https://doi.org/10.3390/ijerph21010084 [in English].

Selye, H. (1976). The Stress of Life. New York: McGraw-Hill [in English].

Spielberger, C.D., Gorsuch, R.L., & Lushene, R.E. (1983). Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Form Y). Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press, 36 p. [in English].

World Health Organization (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. [Electronic resource]. URL: https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563 (access date 19.10.2025) [in English].

Отримано: 03.11.2025
Прийнято: 17.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 57.047:631.872 (477.41/.42)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.8

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ФАРМАКОПЕЙНИХ ПОКАЗНИКІВ КОРЕНЕВОЇ МАСИ *VALERIANA OFFICINALIS* L. ПРИ РІЗНИХ ДОЗАХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ В УМОВАХ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ

М. М. Світельський[1], Н. С. Бордюг[2], О. Ф. Дунаєвська[3], О. М. Алпатова[4], І. М. Сокульський[5]

Актуальність розроблення ефективних агротехнологій для валеріани лікарської (Valeriana officinalis L.) зумовлена стрімким зростанням попиту на лікарську сировину. Ця цінна багаторічна рослина родини Валеріанових містить унікальний комплекс біологічно активних речовин (валепотріати, ефірні олії, алкалоїди), що зумовлює її широке застосування у фармацевтичній промисловості як седативного та спазмолітичного засобу.

Метою дослідження було вивчення впливу різних норм мінеральних добрив ($N_{30}P_{30}K_{30}$, $N_{60}P_{60}K_{60}$ та $N_{90}P_{90}K_{90}$) на продуктивність та фармакопейні показники кореневої маси валеріани лікарської

[1] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів і збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: svitmm71@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1501-4168
[2] доктор педагогічних наук, професор,
професор кафедри екології та сталого розвитку імені професора Ю.В. Пилипенка
(Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон)
e-mail: natali-21@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3489-4669
[3] доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри екології
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: oksana_fd@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8999-8211
[4] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та природоохоронних технологій
(Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир)
e-mail: alpatova-o@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0803-9850
[5] кандидат ветеринарних наук, доцент,
доцент кафедри внутрішньої патології та морфології
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: alpatova-o@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0803-9850

в умовах Полісся України. Польові експерименти проводилися на дослідному полі агробіостанції протягом 2018–2020 років. Дослідження включали оцінювання морфометричних показників рослин, динаміки наростання кореневої маси та якісних характеристик сировини відповідно до вимог Державної фармакопеї України.

Аналіз отриманих даних засвідчив позитивний вплив мінеральних добрив на інтенсифікацію росту та розвитку рослин. Наприкінці другого року вегетації маса кореневої системи на контрольному варіанті (без добрив) становила 18,5 г, тоді як за внесення $N_{60}P_{60}K_{60}$ цей показник зріс до 26,8 г, а за $N_{90}P_{90}K_{90}$ – до 29,3 г. Кількість додаткових коренів збільшилася із 4,2 штуки на контролі до 6,7 штуки за внесення оптимальної дози добрив. Вміст ефірної олії в коренях підвищився з 0,58 до 0,67% залежно від варіанту удобрення.

Найбільш збалансоване співвідношення між урожайністю та якістю сировини встановлено для варіанту $N_{60}P_{60}K_{60}$, яке забезпечило достовірне збільшення врожаю повітряно-сухих коренів на 3,29 ц/га (42,3% до контролю), водночас зберігалися оптимальні фармакопейні показники якості сировини. Подвійна доза добрив ($N_{120}P_{120}K_{90}$) не демонструвала пропорційного збільшення ефективності, а призводила до зниження вмісту ефірної олії, що свідчить про доцільність використання помірних норм удобрення.

Важливим аспектом роботи стало вивчення кореляції між системами удобрення та інтенсивністю біосинтезу біологічно активних речовин. Встановлено, що оптимальне співвідношення NPK сприяло підвищенню вмісту валепотріатів на 15–20% та екстрактивних речовин на 12–15% порівняно з контролем, що забезпечувало відповідність сировини вимогам Державної фармакопеї України.

Результати дослідження мають велике значення для розроблення ефективних технологій вирощування валеріани лікарської. Доведено доцільність застосування системи удобрення $N_{60}P_{60}K_{60}$, яка забезпечує підвищення врожайності кореневої маси до 3,29 т/га за збереження високих фармакопейних показників якості сировини. Запропонована технологія дозволяє досягти рентабельності 68,1% та може бути успішно впроваджена в умовах Полісся України. Отримані дані створюють основу для розширення виробництва лікарської сировини вітчизняного походження.

Ключові слова: *Valeriana officinalis L., мінеральні добрива, продуктивність, урожайність, кореневища, технології вирощування.*

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF PRODUCTIVITY AND PHARMACOPOEIAL INDICATORS OF ROOT MASS VALERIANA OFFICINALIS L. AT DIFFERENT DOSES OF MINERAL FERTILIZERS IN THE POLISSYA REGION OF UKRAINE

M. M. Svitelsky, N. S. Bordiug, O. F. Dunaievska, O. M. Alpatova, I. M. Sokulskyi

The relevance of developing effective agricultural technologies for Valeriana officinalis L. is due to the rapid growth in demand for medicinal raw materials. This valuable perennial plant of the Valerianaceae family contains a unique complex of biologically active substances (valepotriates, essential oils, alkaloids), which determines its wide use in the pharmaceutical industry as a sedative and antispasmodic agent.

The aim of the study was to investigate the effect of different rates of mineral fertilizers ($N_{30}P_{30}K_{30}$, $N_{60}P_{60}K_{60}$, and $N_{90}P_{90}K_{90}$) on the productivity and pharmacopoeial indicators of the root mass of Valeriana officinalis in the Polissya region of Ukraine. Field experiments were conducted on the experimental field of the agrobiological station during 2018–2020. The study included an assessment of the morphometric indicators of plants, the dynamics of root mass growth, and the qualitative characteristics of raw materials in accordance with the requirements of the State Pharmacopoeia of Ukraine.

Analysis of the data obtained showed a positive effect of mineral fertilizers on the intensification of plant growth and development. At the end of the second year of vegetation, the root system mass in the control variant (without fertilizers) was 18,5 g, while with the application of $N_{60}P_{60}K_{60}$ this indicator increased to 26,8 g, and with $N_{90}P_{90}K_{90}$ – to 29,3 g. The number of additional roots increased from 4,2 in the control to 6,7 when the optimal dose of fertilizer was applied. The essential oil content in the roots increased from 0,58 to 0,67% depending on the fertilization variant.

The most balanced ratio between yield and raw material quality was established for the $N_{60}P_{60}K_{60}$ variant, which provided a reliable increase in the yield of air-dry roots by 3,29 cwt/ha (42,3% compared to the control), while maintaining optimal pharmacopoeial quality indicators for raw materials. A double dose of fertilizers ($N_{120}P_{120}K_{90}$) did not show a proportional increase in efficiency, but led to a decrease in essential oil content, which indicates the advisability of using moderate fertilizer rates.

An important aspect of the work was to study the correlation between fertilization systems and the intensity of biosynthesis of biologically active substances. It was found that the optimal NPK

ratio contributed to an increase in the content of valepotriates by 15–20% and extractive substances by 12–15% compared to the control, which ensured the compliance of raw materials with the requirements of the State Pharmacopoeia of Ukraine.

Key words: *Valeriana officinalis L., mineral fertilizers, productivity, yield, rhizomes with roots, cultivation technologies.*

Вступ

Valeriana officinalis L. (валеріана лікарська) належить до найважливіших лікарських культур у світовій фармакопеї, що зумовлено високою ефективністю її седативних і спазмолітичних властивостей (Bączek et al., 2022; Ishvari Gadgil et al., 2025). Попит на сировину валеріани стабільно зростає, що пов'язано з поширенням стресових станів і порушень сну в населення (Bączek et al., 2022). Однак основним обмежувальним чинником для стабільного забезпечення фармацевтичної промисловості є нестача сировини стандартизованої якості, зумовлена значним варіюванням вмісту біологічно активних речовин залежно від агротехнологій вирощування (Ghaderi & Jafari, 2014; Gautam, 2023).

Сучасні дослідження підтверджують, що кліматичні зміни й антропогенний вплив значно погіршують фізіологічний стан природних популяцій валеріани, знижують їхню продуктивність та лікувальні властивості (Світельський та ін., 2015). Це зумовлює необхідність розроблення інтенсивних технологій вирощування цієї культури з урахуванням специфіки регіонів культивування (Біленко, 2007; Климчук, 2012).

Сучасна стратегія вирощування лікарських рослин, зокрема *Valeriana officinalis* L., дедалі більше зміщується від екстенсивного збирання із природних популяцій до створення інтенсивних, високопродуктивних агроценозів (Жарінов і Остапенко, 1994). У цьому контексті раціональне застосування мінеральних добрив виступає не лише фактором підвищення врожайності, але й потужним інструментом корекції біосинтезу цінних вторинних метаболітів, як-от ефірна олія та валепотріати (Котуков, 1974).

Доказові дослідження останніх років демонструють, що застосування збалансованих добривних систем дозволяє не лише підвищити врожайність кореневої маси на 25–40%, але й суттєво покращити її фармацевтичні характеристики (Приведенюк, 2016). Особливо важливим є те, що правильно підібрані співвідношення мінеральних елементів сприяють синтезу саме тих біологічно активних сполук, які визначають терапевтичну ефективність препаратів валеріани (Рак і Горошко, 2011).

Особливу увагу під час вирощування лікарських рослин приділяють азотному живленню. Дослідження останніх років підтверджують, що азот відіграє ключову роль у синтезі алкалоїдів і амінокислот – попередників багатьох біологічно активних сполук (Morshedloo et al., 2017). Однак надлишок азоту може призводити до надмірного розвитку вегетативної маси на шкоду кореневим системам, що особливо критично для валеріани, лікарською сировиною якої є корені (Ekiert et al., 2021).

Фосфор як елемент енергетичного обміну безпосередньо впливає на інтенсивність біосинтезу ефірних олій і фенольних сполук. Наприклад, дослідження, проведені на інших лікарських рослинах, показали, що оптимальне фосфорне живлення підвищує вміст біологічно активних сполук на 15–20% (Єщенко та ін., 2014).

Калій, як регулятор водного обміну й активатор ферментних систем, покращує транспорт асимілятів до кореневих органів і підвищує стійкість рослин до абіотичних стресів, що особливо важливо в умовах зміни клімату (Лихочвор та ін., 2003).

В умовах Полісся України, де переважають кислі дерново-підзолисті ґрунти з низьким вмістом гумусу та підвищеною кислотністю, питання оптимізації системи живлення залишається ключовим для отримання високих і стабільних урожаїв кореневої маси із заданими фармакологічними параметрами (Рахметов та ін., 2004). Дослідження українських учених засвідчують, що на дерново-підзолистих ґрунтах Полісся врожайність кореневих систем валеріани може коливатися залежно від рівня мінерального живлення (Рябчун та ін., 2019).

Специфіка ґрунтових умов Полісся потребує індивідуального підходу до добривних систем. Дослідження останніх років показують, що на цих ґрунтах особливої уваги потребує не тільки основний елементний склад, але й мікроелементи, як-от бор, цинк і мідь, які активізують ферментні системи, відповідальні за синтез біологічно активних сполук.

Попередні дослідження вказують на чутливість *Valeriana officinalis* L. до режиму мінерального живлення, однак дані щодо впливу різних співвідношень NPK на комплекс біометричних, урожайних і фармацевтично значущих характеристик кореневої маси в умовах Полісся України залишаються фрагментарними. Отже, мета нашого дослідження полягала у вивченні впливу різних схем мінерального живлення на формування продуктивності, біометричні параметри та якісний склад кореневої маси валеріани лікарської для визначення найефективніших добривних режимів у даному регіоні.

Матеріал і методи

Дослідження проводили у 2018–2020 рр. на дослідному полі агробіостанції ЖДУ імені Івана Франка в умовах Полісся України. Загальна площа ділянки становила 15 м², облікова – 12 м², за чотириразового повторення. Насіння *Valeriana officinalis* L. сорту Україна отримали з колекції Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України, лабораторна схожість становила 75–80%.

Сівбу проводили у другій декаді квітня стратифікованим насінням з нормою висіву 8 кг/га, із шириною міжрядь 45 см. Агротехніка включала зяблеву оранку на глибину 25–27 см, внесення мінеральних добрив відповідно до схем дослідження, передпосівну культивацію та коткування. Сходи з'являлися на 14–16-й день після сівби, були дружними та рівномірними. Досліди закладено згідно з методикою проведення польових досліджень з лікарськими рослинами (Єщенко та ін., 2014).

Догляд за посівами полягав у дворазовому прополюванні, чотириразовому розпушуванні міжрядь та регулярному поливі в період вегетації. На першому році життя валеріана формувала розвинену прикореневу розетку листків. Цвітіння спостерігалося на другому році вегетації в червні – липні, достигання насіння – у серпні – вересні.

Збір кореневої маси проводили на другому році вегетації у вересні – жовтні. Корені збирали вручну, очищали від ґрунту, мили та сушили в тіні до вологості 14–16%.

Вміст ефірної олії визначали методом перегонки з водяною парою згідно з методикою Державної фармакопеї України, а для кількісного аналізу використовували газову хроматографію (GC-MS) зі спектрометрією, що дозволяло точно ідентифікувати компоненти ефірної олії та кількісний аналіз ефірних олій (Державна …, 2015).

Вміст екстрактивних речовин визначали за методикою спиртової екстракції відповідно до фармакопейних вимог методу визначення екстрактивних речовин, що включає екстракцію спиртом, фільтрацію, випарювання розчинника й зважування залишку сухих речовин, що забезпечує точність для контролю якості лікарської сировини.

Вміст валеренової кислоти визначали методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) за стандартною фармакопейною методикою («Методика визначення валеренової кислоти»). Загальні фенольні сполуки визначали спектрофотометричним методом із застосуванням реактиву Фоліна – Чіокальтеу.

Результати та їх обговорення

Детальний аналіз продуктивності за різних систем удобрення. Як демонструють дані таблиці 1, застосування різних систем мінерального живлення має вирішальний вплив на продуктивність *Valeriana officinalis* L. Найбільш ефективним виявився варіант із повним мінеральним удобренням ($N_{60}P_{40}K_{60}$), який забезпечив урожайність на рівні 3,29 т/га. Цей показник на 42,3% перевищує контрольний варіант без удобрення (2,31 т/га). Такий значний приріст можна пояснити синергетичним ефектом від взаємодії всіх трьох основних елементів живлення: азот стимулює вегетативне зростання, фосфор сприяє розвитку кореневої системи, а калій покращує транспорт поживних речовин і стійкість рослин до стресових факторів.

Цікавим є той факт, що парні комбінації елементів живлення демонструють різну ефективність. Система $N_{60}P_{40}$ забезпечила приріст урожаю на 25,1%, що свідчить про важливість поєднання азоту та фосфору для формування кореневої маси. Менш ефективною виявилася комбінація $P_{40}K_{60}$ (приріст становив 15,6%), тоді як варіант $N_{60}K_{60}$ показав мінімальну ефективність (6,1%). Це підтверджує ключову роль фосфору в розвитку кореневої системи валеріани.

Аналіз морфометричних показників виявив чітку кореляцію між рівнем мінерального живлення та розвитком кореневої системи. Маса кореневої системи на варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$ становила 26,8 г/рослину, що на 44,9% перевищує контроль. Кількість додаткових коренів також була максимальною на цьому варіанті (6,7 шт. проти 4,2 шт. на контролі). Це свідчить про те, що збалансоване живлення не тільки підвищує масу

окремих коренів, але й стимулює їх розгалуження, що є важливим фактором для підвищення загальної продуктивності.

Як демонструють дані таблиці 1 (див. табл. 1), найвищу ефективність показав варіант із застосуванням комплексного добрива NPK 60:40:60, що забезпечив приріст урожаю кореневої маси на 42,3% порівняно з контролем.

Детальний аналіз якісних характеристик сировини. Дані таблиці 2 демонструють складну залежність між системою удобрення та накопиченням біологічно активних речовин. Найвищий вміст ефірної олії (0,67%) зафіксовано на варіанті $P_{40}K_{60}$, що на 15,5% перевищує контроль. Це може бути пов'язано з тим, що фосфор є ключовим елементом у синтезі ізопреноїдів – попередників багатьох компонентів ефірних олій, а калій сприяє їх накопиченню шляхом покращення транспорту асимілятів.

Вміст валеренової кислоти – одного з основних біологічно активних компонентів валеріани – також значно варіював залежно від системи удобрення. Максимальний показник (0,55%) зареєстровано на варіанті $P_{40}K_{60}$, тоді як на контролі він становив лише 0,41%. Це підтверджує гіпотезу про те, що синтез іридоїдів, до яких належить валеренова кислота, значною мірою залежить від забезпеченості рослин фосфором.

Екстрактивні речовини досягли максимального рівня (32,7%) на варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$, що на 15,5% вище контролю. Це свідчить про те, що саме комплексне застосування всіх трьох елементів живлення найефективніше стимулює синтез різноманітних біологічно активних сполук.

Загальний вміст фенольних сполук, які мають антиоксидантні властивості, також був максимальним на варіанті $P_{40}K_{60}$ (16,3 мг/г). Це може бути пов'язано з тим, що фенольні сполуки часто виконують захисні функції, а калій підвищує стійкість рослин до абіотичних стресових факторів.

Якісні характеристики сировини. Дані таблиці 2 (див. табл. 2) свідчать про диференційований вплив елементів живлення на накопичення біологічно активних речовин. Найвищий вміст ефірної олії зафіксовано на варіанті $P_{40}K_{60}$.

Детальний аналіз морфометричних показників. Дані таблиці 3 демонструють глибокий вплив систем удобрення на морфогенез кореневої системи. Довжина головного кореня на варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$ становила 28,7 см, що на 34,7% перевищує контроль. Це свідчить про те, що комплексне удобрення сприяє не лише розгалуженню, але й лінійному росту коренів.

Діаметр кореневої шийки – важливий показник розвитку кореневої системи – також значно збільшився під впливом удобрення. На варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$ він становив 11,5 проти 8,2 мм на контролі (збільшення на 40,2%). Це свідчить про інтенсивне потовщення коренів, що позитивно впливає на їхню функціональну активність.

Об'єм кореневої системи на варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$ становив 52,4 см³, що на 46,8% перевищує контроль. Цей показник є інтегральною характеристикою розвитку кореневої системи й тісно корелює із загальною продуктивністю рослин.

Питома густина коренів, яка характеризує їхню щільність та накопичення запасних речовин, також була максимальною на варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$ (0,63 проти 0,52 г/см³ на контролі). Це може свідчити про більш інтенсивне накопичення запасних речовин і біологічно активних сполук у коренях за умов оптимального мінерального живлення.

Морфометричні показники. Дані таблиці 3 (див. табл. 3) демонструють позитивний вплив збалансованого живлення на розвиток кореневої системи.

Таблиця 1

Вплив різних систем удобрення на продуктивність *Valeriana officinalis* L.

Система удобрення	**Урожайність, т/га**	**Приріст до контролю, %**	**Маса кореневої системи, г/рослина**	**Кількість додаткових коренів, шт.**
Контроль (без удобрення)	2,31 ± 0,12	–	18,5 ± 1,2	4,2 ± 0,3
$N_{60}P_{40}K_{60}$	3,29 ± 0,15	42,3	26,8 ± 1,5	6,7 ± 0,4
$N_{60}P_{40}$	2,89 ± 0,14	25,1	23,1 ± 1,3	5,9 ± 0,3
$P_{40}K_{60}$	2,67 ± 0,13	15,6	21,4 ± 1,2	5,2 ± 0,3
$N_{60}K_{60}$	2,45 ± 0,12	6,1	19,8 ± 1,1	4,6 ± 0,3

Таблиця 2

Вплив систем удобрення на якісні показники сировини

Система удобрення	**Вміст ефірної олії, %**	**Валеренова кислота, %**	**Екстрактивні речовини, %**	**Загальні фенольні сполуки, мг/г**
Контроль	0,58 ± 0,03	0,41 ± 0,02	28,3 ± 1,4	12,5 ± 0,6
$N_{60}P_{40}K_{60}$	0,62 ± 0,03	0,52 ± 0,03	32,7 ± 1,6	15,8 ± 0,8
$N_{60}P_{40}$	0,59 ± 0,03	0,48 ± 0,02	30,9 ± 1,5	14,2 ± 0,7
$P_{40}K_{60}$	0,67 ± 0,03	0,55 ± 0,03	31,4 ± 1,6	16,3 ± 0,8
$N_{60}K_{60}$	0,56 ± 0,03	0,43 ± 0,02	29,1 ± 1,5	13,1 ± 0,7

Таблиця 3

Морфометричні показники кореневої системи

Параметр	**Контроль**	**$N_{60}P_{40}K_{60}$**	**$N_{60}P_{40}$**	**$P_{40}K_{60}$**	**$N_{60}K_{60}$**
Довжина головного кореня, см	21,3 ± 1,1	28,7 ± 1,4	25,2 ± 1,3	24,8 ± 1,2	22,6 ± 1,1
Діаметр кореневої шийки, мм	8,2 ± 0,4	11,5 ± 0,6	10,3 ± 0,5	9,8 ± 0,5	8,9 ± 0,4
Об'єм кореневої системи, $см^3$	35,7 ± 1,8	52,4 ± 2,6	45,8 ± 2,3	43,2 ± 2,2	38,9 ± 1,9
Питома густина коренів, $г/см^3$	0,52 ± 0,03	0,63 ± 0,03	0,58 ± 0,03	0,59 ± 0,03	0,54 ± 0,03

Аналіз ефективності різних норм внесення добрив. Як демонструють дані таблиці 4, ефективність мінеральних добрив значно варіює залежно від їх норм внесення. Найвищу врожайність кореневої маси отримано за внесення $N_{90}P_{90}K_{60}$.

Детальний аналіз впливу норм добрив. Дані таблиці 5 показують чітку залежність між нормами внесення добрив і продуктивністю валеріани. Найвищий приріст урожаю (48%) отримано за внесення $N_{120}P_{120}K_{90}$, однак цей варіант супроводжувався зниженням вмісту ефірної олії з 0,58% до 0,50%. Це підтверджує явище «розведення» біологічно активних речовин за інтенсивного росту біомаси.

Оптимальним за співвідношенням кількісних і якісних показників є варіант $N_{90}P_{90}K_{60}$, який забезпечує приріст урожаю у 28% за відносно невеликого зниження вмісту ефірної олії. Екстрактивні речовини, навпаки, зростають зі збільшенням норм добрив, досягають 47% на варіанті $N_{120}P_{120}K_{90}$.

Ефективність підживлень валеріани другого року вегетації. Результати досліджень ефективності весняних підживлень наведені в таблиці 5. Найбільш ефективним виявилося підживлення в нормі $N_{30}P_{30}$.

Аналіз ефективності підживлень. Дані таблиці 6 демонструють високу ефективність весняних підживлень для валеріани другого року вегетації. Найбільший приріст урожаю (37%) отримано в результаті внесення $N_{60}P_{60}$, проте цей варіант супроводжувався значним зниженням вмісту ефірної олії, з 0,76 до 0,64%.

Оптимальним за економічними та якісними показниками є підживлення $N_{30}P_{30}$, яке забезпечує приріст урожаю на 33% за помірного зниження вмісту ефірної олії. Це підтверджує доцільність використання збалансованих норм підживлень для підтримки оптимального співвідношення між кількісними і якісними показниками сировини.

Порівняльна характеристика способів сівби. Як видно з таблиці 6 (див. табл. 6), спосіб сівби значно впливає на продуктивність валеріани. Найвищі показники отримано за безпокривного посіву.

Таблиця 4

Вплив норм мінеральних добрив на врожайність валеріани лікарської

Норма добрив	**Урожайність коренів, ц/га**	**Приріст до контролю, %**	**Вміст ефірної олії, %**	**Екстрактивні речовини, %**
Контроль	19,8	–	0,58	33
$N_{30}P_{30}K_{30}$	20,9	6,0	0,56	34
$N_{60}P_{60}K_{45}$	22,9	16,0	0,53	36
$N_{90}P_{90}K_{60}$	25,3	28,0	0,52	40
$N_{120}P_{120}K_{90}$	29,2	48,0	0,50	47

Таблиця 5

Ефективність підживлень валеріани другого року вегетації

Варіант підживлення	**Урожайність, ц/га**	**Приріст урожаю**	**Вміст ефірної олії, %**
Без підживлення	14,2	–	0,76
N_{30}	16,2	2,0 (19,0%)	0,74
$N_{30}P_{30}$	18,9	4,7 (33,0%)	0,70
$N_{60}P_{60}$	19,5	5,3 (37,0%)	0,64

Таблиця 6

Урожайність коренів валеріани за різних способів сівби

Показник	**Безпокривний посів**	**Посів під покривом ячменю**
Довжина кореня, см	21,3 ± 1,1	16,2 ± 0,8
Кількість корінців, шт.	48,3 ± 2,4	28,3 ± 1,4
Урожайність сирих коренів, ц/га	16,16 ± 0,8	5,67 ± 0,3
Урожайність сухих коренів, ц/га	4,75 ± 0,2	2,48 ± 0,1
Вихід сухих коренів, %	29,4 ± 1,5	43,7 ± 2,2

Аналіз впливу способів сівби. Дані таблиці 7 свідчать про перевагу безпокривного посіву валеріани. Урожайність сирих коренів за цього способу становила 16,16 ц/га, що у 2,8 раза перевищує показник за посіву під покривом ячменю. Кількість корінців і їхня довжина також були значно вищими за безпокривного посіву.

Однак варто відзначити вищий вихід сухих коренів за посіву під покривом (43,7 проти 29,4%), що може бути пов'язано з іншими умовами вирощування та ступенем зрілості коренів.

Детальний аналіз економічної ефективності. Як видно з таблиці 7 (див. табл. 7), застосування мінеральних добрив суттєво впливає на економічні показники вирощування валеріани. Найвищий чистий прибуток (40,0 тис. грн/га) отримано на варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$, що на 76,9% перевищує контрольний показник (22,6 тис. грн/га).

Рівень рентабельності вирощування валеріани на контрольному варіанті становив 50,0%, тоді як на варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$ він досяг 68,1%. Це свідчить про високу економічну ефективність застосування збалансованих систем удобрення.

Варто відзначити, що хоча варіант $P_{40}K_{60}$ показав найкращі результати за якісними показниками, його економічна ефективність була нижчою (рівень рентабельності 54,6%) порівняно з повним удобренням. Це пов'язано з тим, що вищий урожай на варіанті $N_{60}P_{40}K_{60}$ компенсує додаткові витрати на добрива.

Економічна ефективність. За даними таблиці 7, найвищу економічну ефективність показав варіант із застосуванням NPK 60:40:60.

Висновки

1. Комплексне застосування NPK добрив у співвідношенні 60:40:60 є найбільш ефективною системою удобрення для *Valeriana officinalis* L., що забезпечує максимальну врожайність (3,29 т/га) і економічну ефективність (рівень рентабельності становить 68,1%).

2. Фосфорно-калійні добрива ($P_{40}K_{60}$) оптимально стимулюють синтез біологічно активних речовин, зокрема ефірної олії (0,67%) та валеренової кислоти (0,55%).

3. Мінеральне живлення суттєво впливає на морфогенез кореневої системи, збільшує довжину головного кореня на 34,7%, діаметр кореневої шийки на 40,2%, об'єм кореневої системи на 46,8%.

Таблиця 7

Економічна ефективність застосування різних систем удобрення

Показник	**Контроль**	**$N_{60}P_{40}K_{60}$**	**$N_{60}P_{40}$**	**$P_{40}K_{60}$**	**$N_{60}K_{60}$**
Собівартість, тис. грн/га	45,2	58,7	53,1	51,8	49,5
Вартість продукції, тис. грн/га	67,8	98,7	86,7	80,1	73,5
Чистий прибуток, тис. грн/га	22,6	40,0	33,6	28,3	24,0
Рівень рентабельності, %	50,0	68,1	63,3	54,6	48,5

4. Для отримання високих урожаїв якісної сировини рекомендується застосовувати збалансовану систему удобрення NPK 60:40:60 з можливістю корекції залежно від конкретних ґрунтово-кліматичних умов.

Отже, найефективнішою для вирощування валеріани лікарської в умовах Полісся виявилася система удобрення $N_{90}P_{90}K_{60}$ у поєднанні з весняним підживленням $N_{30}P_{30}$ на другому році вегетації, що забезпечує врожайність 25,3 ц/га з оптимальним співвідношенням якісних показників сировини. Запропонована технологія дозволяє досягти рівня рентабельності 68,1% і отримати сировину із вмістом екстрактивних речовин до 40% за збереження високого вмісту ефірної олії. Безпокривний спосіб сівби забезпечує найкращі морфометричні показники кореневої системи та максимальну продуктивність культури.

Список використаної літератури

Біленко В.Г. Технологія вирощування лікарських рослин і використання їх у медичній та ветеринарній практиці : навчальний посібник. Київ : Арістей, 2007. 656 с.

Державна фармакопея України / Міністерство охорони здоров'я України. Вид. 1. Т. 1. 2-ге вид. Київ : Держлікслужба України, 2015. 832 с.

Жарінов В.І., Остапенко А.І. Вирощування лікарських, ефіроолійних, пряносмакових рослин. Київ : Вища шк., 1994. 231 с.

Климчук О.В. Лікарські рослини. Технологія вирощування : навчальний посібник. Вінниця, 2012. 187 с.

Котуков Г.Н. Культивовані і дикорослі лікарські рослини. Київ : Наукова думка, 1971. 168 с.

Лікарські рослини. Значення, біологічні та ботанічні особливості, технологія вирощування, заготівля / В.В. Лихочвор та ін. Львів : Укр. технології, 2003. 272 с.

Нові кормові, пряносмакові та овочеві інтродуценти в Лісостепу і Поліссі України / Д.Б. Рахметов та ін. ; за заг. ред. Д.Б. Рахметова ; НАН України, Нац. ботан. сад ім. М.М. Гришка. Київ : Фітосоціоцентр, 2004. 163 с.

Основи наукових досліджень в агрономії / В.О. Єщенко та ін. ; за ред. В.О. Єщенка. Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К»», 2014. 332 с.

Приведенюк Н.В. Урожайність валеріани лікарської за краплинного зрошення в умовах Лівобережного Лісостепу України. *Меліорація і водне господарство.* 2016. Вип. 104. С. 73–76 [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/zGRXg4 (дата звернення 18.10.2025).

Рак В.В., Горошко В.В. Розробка агроекологічних заходів захисту валеріани лікарської. *Вісник Полтавської державної аграрної академії.* 2011. № 1. С. 63–68 [Електронний ресурс]. URL: https://is.gd/Jy1sQA (дата звернення 18.10.2025).

Рябчун В.К., Кузьмишина Н.В., Богуславський Р.Л., Безугла О.М., Музафарова В.М., Бондаренко В.М., Докукіна К.І. Інтродукція рослин як пріоритетний напрям наукової і практичної діяльності Національного центру генетичних ресурсів рослин України. *Генетичні ресурси рослин.* 2019. № 24. С. 11–26. https://doi.org/10.36814/pgr.2019.24.01

Світельський М.М., Коткова Т.М., Іщук О.В., Федючка М.І. Еколого-біологічні особливості формування кореневої маси валеріани лікарської в умовах Полісся України. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування.* 2015. № 1(69). С. 243–250 [Електронний ресурс]. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/3797/1/Vs6925.pdf (дата звернення 18.10.2025).

Bączek K., Kosakowska O., Boczkowska M., Bolc P., Chmielecki R., Pióro-Jabrucka E., Raj K., Węglarz Z. Intraspecific Variability of Wild-Growing Common Valerian (*Valeriana officinalis* L.). *Plants*. 2022. Vol. 11(24). P. 3439. https://doi.org/10.3390/plants11243455

Ekiert H., Knut E., Świątkowska J., Klin P., Rzepiela A., Tomczyk M. *Verbena officinalis* (Common Vervain). A Review on the Investigations of This Medicinally Important Plant Species. *Plants*. 2021. Vol. 10(5). P. 846. https://doi.org/10.3390/plants10050846

Ishvari M. Gadgil, Gayatri N. Dhable, Rutuja S. Deshmukh, Nayan S. Sawant, Harshal M. Indaniya. A Review on Valerian Plant: Botanical Characteristics, Traditional Uses, and Pharmacological Activities. *International Journal on Science and Technology.* 2025. Vol. 16(1). P. 45–58 [Electronic resource]. URL: https://www.ijsat.org/papers/2025/1/1784.pdf (дата звернення 18.10.2025).

Gautam R.D. A Comprehensive Overview of Breeding Strategy to Improve Valeriana jatamansi Production. *Heliyon.* 2023. Vol. 9(8). P. 18294. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18294

Ghaderi N., Jafari M. Efficient Plant Regeneration and Genetic Fidelity in Valeriana officinalis. *South African Journal of Botany.* 2014. Vol. 92. P. 19–27. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.01.010

Morshedloo M.R., Craker L.E., Salami A., Nazeri V., Sang H., Maggi F. Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono- and sesquiterpene biosynthesis in two oregano *(Origanum vulgare* L.) subspecies. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2017. Vol. 111. P. 119–128. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.023

References

Bilenko, V.H. (2007). Tekhnolohiya vyroshchuvannya likarskykh roslyn i vykorystannya yikh u medychniy ta veterynarniy praktytsi [Techniques for the treatment of likarskykh roslyn and their use in medical and veterinary practice]. Navchalnyy posibnyk [Study guide]. Kyiv : Aristey [in Ukrainian].

Derzhavna farmakopeia Ukrainy [State Pharmacopoeia of Ukraine]. (2015). Ministerstvo okhorony zdorov'ya Ukrayiny [Ministry of Health of Ukraine]. Kyiv : Derzhliksluzhba Ukrainy [in Ukrainian].

Yeshchenko, V.O., Kopytko, P.H., Kostohryz, P.V., & Opryshko, V.P. (2014). Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii [Basics of scientific research in agronomy]. Vinnytsia [in Ukrainian].

Zharinov, V.I., & Ostapenko, A.I. (1994). Vyroshchuvannya likarskykh, efirooliynykh, pryanosmakovykh roslyn [Cultivation of medicinal, essential oil and spice plants]. Kyiv : Vyshcha shkola [in Ukrainian].

Klymchuk, O.V. (2012). Likarski roslyny. Tekhnolohiya vyroshchuvannya [Medicinal plants. Growing technology]. Navchalnyy posibnyk [Study guide]. Vinnytsya [in Ukrainian].

Kotukov, H.N. (1971). Kultyvovani i dykorosli likarski roslyny [Cultivated and wild medicinal plants]. Dovidnyk [Reference book]. Kyiv : Nauk. dumka [in Ukrainian].

Lykhochvor, V.V., Borysyuk, V.S., Dubkovetskyy, S.V., & Onyshchuk, D.M. (2003). Likarski roslyny. Znachennya, biolohichni ta botanichni osoblyvosti, tekhnolohiya vyroshchuvannya, zahotivlya [Medicinal plants. Significance, biological and botanical features, cultivation technology, harvesting]. Lviv : Ukr. tekhnolohiyi [in Ukrainian].

Pryvedeniuk, N.V. (2016). Urozhainist valeriany likarskoi za kraplynnoho zroshennia v umovakh Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Yield of medicinal valerian under drip irrigation in the conditions of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukrain]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo [Land reclamation and water management],* 104, 73–76. [Electronic resource] URL: https://is.gd/zGRXg4 (access date 18.10.2025) [in Ukrainian].

Rak, V.V., & Goroshko, V.V. (2011). Rozrobka ahroekolohichnykh zakhodiv zakhystu valeriany likarskoi [Development of agroecological measures for the protection of Valeriana officinalis]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii [Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy],* 1, 63–68. [Electronic resource] URL: https://is.gd/Jy1sQA (access date 18.10.2025) [in Ukrainian].

Rakhmetov, D.B., Stadnychuk, N.O., Korablova, O.A., Smilyanets, N.M., & Skrypka, N.M. (2004). Novi kormovi, pryanosmakovi ta ovochevi introdutsenty v Lisostepu i Polissya Ukrayiny [New forage, spice and vegetable introductions in the Forest–Steppe and Polissya regions of Ukraine]. Kyiv : Fitosotsiotsentr [in Ukrainian].

Ryabchun, V.K., Kuzmyshyna, N.V., Bohuslavskyy, R.L., Bezuhla, O.M., Muzafarova, V.M., Bondarenko, V.M., & Dokukina, K.I. (2019). Introduktsiya roslyn yak priorytetnyy napryam naukovoyi i praktychnoyi diyalnosti Natsionalnoho tsentru henetychnykh resursiv roslyn Ukrayiny [Plant introduction as a priority area of scientific and practical activities of the National Center for Plant Genetic Resources of Ukraine]. *Henetychni resursy roslyn [Plant genetic resources],* 24, 11–26. https://doi.org/10.36814/pgr.2019.24.01 [in Ukrainian].

Svitelskyi, M.M., Kotkova, T.M., Ishchuk, O.V., & Fediuchka, M.I. (2015). Ekoloho-biolohichni osoblyvosti formuvannia korenevoi masy valeriany likarskoi v umovakh Polissia Ukrainy [Ecological and biological features of the formation of the root mass of Valeriana officinalis in the Polissya region of Ukraine]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia [Bulletin of the National University of Water and Environmental Management],* 1 (69), 243–250. [Electronic resource] URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/3797/1/Vs6925.pdf (access date 18.10.2025) [in Ukrainian].

Bączek, K., Kosakowska, O., Boczkowska, M., Bolc, P., Chmielecki, R., Pióro-Jabrucka, E., Raj, K., & Węglarz, Z. (2022). Intraspecific Variability of Wild-Growing Common Valerian (Valeriana officinalis L.). *Plants*, 11(24), 3455. https://doi.org/10.3390/plants11243455 [in English].

Ekiert, H., Knut, E., Świątkowska, J., Klin, P., Rzepiela, A., & Tomczyk, M. (2021). Verbena officinalis (Common Vervain). A Review on the Investigations of This Medicinally Important Plant Species. *Plants*, 10(5), 846. https://doi.org/10.3390/plants10050846 [in English].

Ishvari Gadgil, M., Gayatri Dhable, N., Rutuja Deshmukh, S., Nayan Sawant, S., & Harshal Indaniya, M. (2025). A Review on Valerian Plant: Botanical Characteristics, Traditional Uses, and Pharmacological Activities. *International Journal on Science and Technology*, 16(1), 45–58. [Electronic resource] URL: https://www.ijsat.org/papers/2025/1/1784.pdf (access date 18.10.2025) [in English].

Gautam, R.D. (2023). A Comprehensive Overview of Breeding Strategy to Improve Valeriana jatamansi Production. *Heliyon*, 9(8), 18294. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18294 [in English].

Ghaderi, N., & Jafari, M. (2014). Efficient Plant Regeneration and Genetic Fidelity in Valeriana officinalis. *South African Journal of Botany*, 92, 19–27. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.01.010 [in English].

Morshedloo, M.R., Craker, L.E., Salami, A., Nazeri, V., Sang, H., & Maggi, F. (2017). Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono- and sesquiterpene biosynthesis in two oregano (Origanum vulgare L.) subspecies. *Plant Physiology and Biochemistry*, 111, 119–128. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.023 [in English].

Отримано: 31.10.2025
Прийнято: 12.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 582.261./.279
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.9

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ДИНАМІКА АЛЬГОУГРУПОВАНЬ В ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ УМОВАХ

В. І. Щербак[1], Н. Є. Семенюк[2], О. А. Давидов[3], Ю. С. Шелюк[4]

Досліджено просторово-часову динаміку альгоугруповань в умовах мікрокосму. Використаний дослідниками мікрокосм в умовах експерименту наповнювався атмосферними опадами чи дощовим стоком із залізного даху прилеглого будинку, тому водорості могли потрапляти до нього кількома шляхами: а) вітровим перенесенням; б) разом із частками ґрунту; в) із дощовим стоком із даху будинку тощо. Специфічними характеристиками гідрохімічного режиму мікрокосму був високий уміст сульфатів, хлоридів, а також заліза й низькі концентрації мінерального фосфору та кремнію. Авторами встановлено, що за період реалізації досліджень в мікрокосмі сформувались дві системи: бентосна з монодомінуванням ниткуватої ціанобактерії Leptolyngbya boryana (Gomont) Anagn. et Komárek і планктонно-нейстонна з монодомінуванням зеленої джгутикової водорості Haematococcus pluvialis Flotow. Ці два альгоугруповання у процесі життєдіяльності були пов'язані в мікрокосмі біотичними зв'язками: 1) антагоністичними – «цвітіння» H. pluvialis зумовило екранування водної товщі та конкуренцію за біогенні елементи, що призвело до пригнічення вегетації L. boryana; 2) синергічними – після закінчення вегетації H. pluvialis у водну товщу надійшла значна кількість поживних речовин, яка є аутогенною енергетичною субсидією для розвитку L. boryana. За результатами дослідження було зроблено припущення, що завдяки мас ефекту в мікрокосм можуть потрапляти різні види водоростей, проте внаслідок сортування

[1] доктор біологічних наук, професор,
провідний науковий співробітник
(Інститут гідробіології НАН України, м. Київ)
e-mail: ek424nat@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1237-6465
[2] доктор біологічних наук, старший дослідник,
в.о. провідного наукового співробітника
(Інститут гідробіології НАН України, м. Київ)
e-mail: natasemenyuk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4447-3507
[3] кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник,
(Інститут гідробіології НАН України, м. Київ)
e-mail: davydovoleg01@gmail.com
ORCID: 0009-0004-2381-723X
[4] доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри ботаніки, біоресурсів і збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Shelyuk_Yulya@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6429-1028

видів у значній кількості розвивались лише два види (L. boryana та H. fluviatilis), для яких умови мікрокосму були найбільш сприятливими.
Проведення експериментальних досліджень якісного і кількісного розмаїття альгоугруповань з використанням мікрокосму є одним із перспективних напрямів гідробіологічних і альгологічних досліджень. Отримання емпіричних репрезентативних даних стало можливим за паралельного вивчення основних абіотичних чинників, які визначають розмаїття альгоугруповань і дозволяють врахувати вплив довкілля у значно ширших умовах, ніж у суто лабораторних дослідженнях.

Ключові слова: *альгоугруповання, біотопічна приуроченість, фітопланктон, мікрофітобентос, фітоплейстон-нейстон, фітопагон, сезонна динаміка, мікрокосм.*

SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF ALGAL COMMUNITIENS IN THE EXPERIMENTAL CONDITIONS

V. I. Shcherbak, N. Ye. Semeniuk, O. A. Davydov, Yu. S. Shelyuk

The paper deals with spatial and temporal dynamics of algal communities under the microcosm conditions. The microcosm used in the experiment was filled with rainfall or storm runoff out of the rainwater pipe from the iron roof of the adjacent building. Therefore, algae could be brought to the microcosm: a) by air; b) with soil particles; c) with storm runoff from the building roof etc. The hydrochemical conditions in the microcosm were marked by high content of sulphates, chlorides, iron, and low concentrations of mineral phosphorus and silicon. During the observation period two systems formed in the microcosm: benthic system dominated by a filamentous cyanobacteria Leptolyngbya boryana (Gomont) Anagn. et Komárek and planktonic-neustic dominated by a flagellate green algae Haematococcus pluvialis Flotow. These two algal communities were linked by biotic interactions: 1) antagonistic – algal blooms by H. pluvialis caused shadowing of the water column and competition for nutrients, thus suppressing L. boryana vegetation; 2) synergetic – after the vegetation of H. pluvialis was over, the water column was enriched with nutrient, which were the autogenic energy subsidy for L. boryana development. An assumption has been made, that diverse algae can be brought to the microcosm due to mass effect, however only two species developed in large quantities owing to environment species sorting – L. boryana and H. fluviatilis.
Conducting experimental studies of the qualitative and quantitative diversity of algal communities using microcosms is one of the promising areas of hydrobiological and algological research. Obtaining empirical representative data has become possible through the parallel study of the main abiotic factors that determine the diversity of algal communities and allow the influence of the environment to be taken into account in much broader conditions than in purely laboratory studies.

Key words: *algal communities, biotopic preference, phytoplankton, microphytobenthos, pleuston-neuston, ice-ralated community, seasonal periodicity, microcosm.*

Вступ

Відомо (Продромус, 2024а, 2024б), що альгофлора України формується 6 553 видами, представленими 7 538 видовими та внутрішньовидовими таксонами (далі – ввт), які належать до одного відділу прокаріотів (Cyanobacteria) і одинадцяти відділів еукаріотів. Серед відділів найрізноманітніше представлені Heterokontophyta (згідно з міжнародним електронним каталогом "AlgaeBase" (Guiry & Guiry, 2025), це відділ, який об'єднав Bacillariophyta та Ochrophyta) і Chlorophyta. Встановлено (Козійчук, 2020; Щербак і Семенюк, 2023; Щербак та ін., 2023; Shelyuk, 2023; Shcherbak et al., 2025), що водорості цих відділів зазвичай є основою розмаїття (флористичних спектрів) альгофлори більшості континентальних водойм і водотоків України.

Узагальнюючий аналіз біотопічної приуроченості водоростей за літературними й авторськими даними (Щербак та ін., 2025) показав, що водорості на нашій планеті вегетують в гідросфері, літосфері й атмосфері. У процесі вегетації водорості можуть змінювати свою біотопічну приуроченість, що зазвичай зумовлено як особливостями конкретної водоростевої популяції, так і впливом різних абіотичних, кліматичних, антропогенних чинників тощо. Наприклад, види Cyanobacteria, які спричиняють «цвітіння» води, упродовж вегетаційного сезону можуть мігрувати між різними екологічними нішами: плейстон ↔ нейстон ↔ планктон ↔ бентос ↔ обростання.

З'ясування закономірностей переходу водоростей між різними екологічними нішами та механізмів, що їх визначають,

потребує проведення комплексних спеціальних досліджень як альгологів, так і гідробіологів. Важливим є встановлення швидкості та спрямованості відгуку водоростей різних екологічних груп на зміну умов у тих компонентах наземних чи водних екосистем, до яких у конкретний період приурочена вегетація водоростей.

Очевидно, що проведення таких досліджень у природних чи антропогенно змінених водних екосистемах є методично складним. Це пов'язано з тим, що на організм водорості як відкриту біологічну систему впливає низка чинників, комбінована дія яких може бути синергічною чи антагоністичною. З огляду на це можуть бути проведені експериментальні дослідження не у природних, а в модельних екосистемах, наприклад у мікрокосмі. Мікрокосм – це спрощена модель екосистеми (штучно створений водний об'єкт), що використовується в біологічних і екологічних дослідженнях (Gregušová et al., 2025). Важливою умовою застосування мікрокосму має бути можливість отримати такі експериментальні дані, які можуть бути використані для репрезентативної інтерпретації масивів натурних даних з польових досліджень різнотипних гідроекосистем.

Мета роботи – дослідити особливості сезонної і просторової динаміки розмаїття альгоугруповань у модельних умовах мікрокосму за дії низки абіотичних чинників, а також апробувати даний методичний підхід для дослідження водоростевих угруповань в контексті теорії метаугруповань.

Матеріал і методи

Експериментальні дослідження проводили впродовж лютого – жовтня 2025 р. в мікрокосмі такого розміру: 90 см (довжина), 55 см (ширина), 32 см (висота), з відповідним об'ємом ≈158 дм^3. Залежно від погодних умов (інтенсивність випаровування чи надходження дощових опадів) рівень води міг коливатись у межах 2–4 см, відповідно, дещо змінювався об'єм водних мас. Водний баланс у мікрокосмі формувався суто дощовими водами, які безпосередньо випадали на поверхню мікрокосму, і дощовим стоком із залізного даху будинку, розміщеного поряд. Інші джерела надходження води були відсутні.

Місцерозташування мікрокосму – Київська область, Бучанський район, смт Бабинці; географічні координати – 50,652403 пн. ш., 30,02905 сх. д. За гідрографічним поділом території це басейн р. Ірпінь (лівий доплив Дніпра). На відстані 120–260 м від мікрокосму розташовані два невеликі штучні ставки та колишній меліоративний канал, який навесні наповнюється водою, а із другої половини літа пересихає.

Альгологічні проби плейстону – нейстону відбирали з поверхневого горизонту, планктону – із глибини 10–15 см (об'єм проби – 0,25 дм^3), а мікрофітобентосу – з бокових стінок і дна мікрокосму. Проби водоростей у живому стані опрацьовували в камері Нажотта об'ємом 0,02 см^3 під світловим мікроскопом "Carl Zeiss", з окулярами 7×, 15× об'єктивами 20×, 40×, 90×.

Особливістю сезонних експериментальних досліджень було те, що взимку (лютий) за мінусових температур повітря водні маси мікрокосму замерзли до дна з утворенням специфічного тимчасового водоростевого угруповання – альгопагону. Із прорубленої ополонки пробу альгопагону було відібрано разом із придонним шаром льоду. У розмороженому вигляді альгопробу в нефіксованому (живому) стані опрацьовували під мікроскопом.

Для кількісного оцінювання розвитку водоростей було використано два методи:

– шкалу Вислоуха (Методи …, 2006);

– розрахунок чисельності та біомаси лічильно-об'ємним методом.

Визначення таксономічного складу водоростей проводили за загальновідомими визначниками й узгоджували із сучасною таксономічною номенклатурою відповідно до AlgaeBase та «Продромусу спорових рослин України. Водорості».[5]

Для характеристики добової динаміки температурного режиму повітря (з інтервалом в 4 години) використовували дані Укргідрометцентру. З огляду на відносно невеликий об'єм мікрокосму було прийнято, що температура води в ньому відповідає температурі повітря. Величини pH вимірювали портативним pH-метром, вміст розчиненого кисню – оксиметром AZ-8403. Комплексне гідрохімічне оцінювання води

[5] Автори висловлюють щиру вдячність чл.-кор. НАН України, д-ру біол. наук заступнику директора Інституту ботаніки імені М.Г. Холодного НАН України О.М. Виноградовій за допомогу у визначенні Cyanobacteria й інші слушні поради та ст. наук. співроб. Інституту гідробіології НАН України, канд. геогр. Наук А.О. Морозовій за проведені комплексні гідрохімічні аналізи та люб'язно надані первинні дані.

(головні іони, мінералізація, вміст біогенних елементів, заліза, силіціуму) у мікрокосмі виконували згідно з (Методи ...., 2006).[2] Для статистичного опрацювання натурних даних була застосована прикладна програма "Past 4.03".

Результати та їх обговорення

Абіотичні характеристики. Оскільки фізичним і хімічним характеристикам водних мас притаманна добова мінливість, температуру повітря та показники pH у мікрокосмі реєстрували впродовж двох діб – 26–28 липня 2025 р. з інтервалом в 4 години. Надалі проводили епізодичні вимірювання pH, температури води, вмісту розчинного кисню.

Мінімальна температура повітря (19,0–19,2 ℃) спостерігалась о 2-й год. ночі та 6-й год. ранку, а максимальна (27,6–28,4 ℃) – о 14-й і 18-й год. дня. Показники pH упродовж доби коливалися від 8,07–8,08 до 9,29–9,35. Загалом, упродовж дводобового експерименту встановлено виражену синхронність у добовій динаміці температури повітря та pH води (рис. 1).

Абсолютний вміст кисню коливався в межах 7,84–10,21 мг O_2/дм^3, а насичення води киснем становило 84,5–121,4%. Вміст головних іонів у воді мікрокосму визначали впродовж липня – серпня 2025 р., оскільки це період максимального розвитку гідробіонтів у басейні Дніпра. Аналіз отриманих даних (табл. 1) вказує на специфічність іонного складу води в досліджуваному мікрокосмі: досить висока концентрація катіонів $K^+ + Na^+$, аніона SO_4^{2-} і Cl^-; відносно низький вміст Ca^{2+} і Mg^{2+}.

За класифікацією поверхневих вод суші за іонним складом (Романенко та ін., 2001), вода в мікрокосмі належить до сульфатно-натрієвого типу, тоді як дніпровські води – до гідрокарбонатного (Хільчевський та ін., 2019).

Мінералізація води змінювалась у межах 216,244–308,551 мг/дм^3 (у середньому

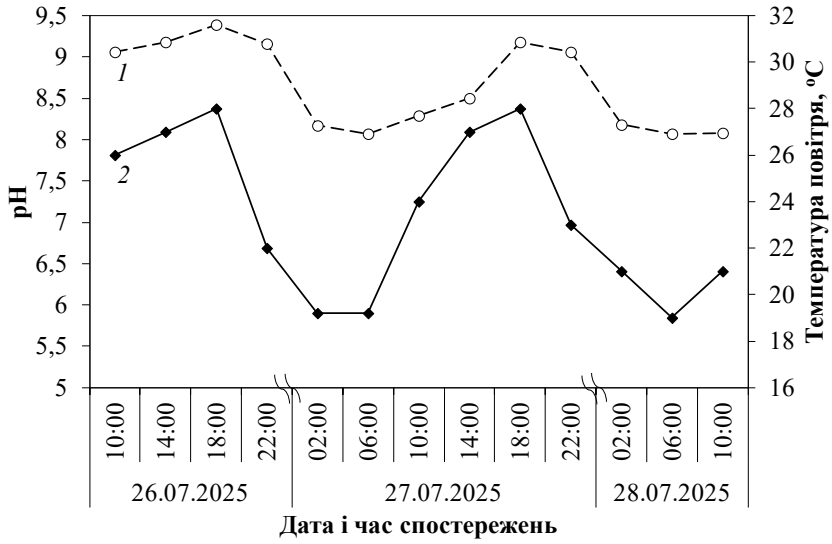


Рис. 1. Добова динаміка pH води (*1*) і температури повітря (*2*) у мікрокосмі

Таблиця 1

Вміст головних іонів (мг/дм^3) у воді мікрокосму в липні – серпні 2025 р.[1]

Іон	Межі коливань	Середні величини
Ca^{2+}	0,512–0,994	1,000
Mg^{2+}	0,486–0,994	0,608
$K^+ + Na^+$	64,900–112,320	94,200
Cl^-	4,391–9,980	7,090
SO_4^{2-}	152,020–197,882	170,880
HCO_3^-	5,284–8,498	6,100

Примітка. 1 – тут і в табл. 2 гідрохімічні дані люб'язно надані А.О. Морозовою.

276,680 мг/дм^3), що відповідає мінералізації води дніпровських водосховищ (Yakushin et al., 2017). Водночас жорсткість води є досить низькою, що, вочевидь, зумовлено дощовим водозабезпеченням мікрокосму. Окрім того, встановлено досить високий вміст заліза (Fe), середні значення якого становили 0,150 мг Fe/дм^3, що, очевидно, було зумовлено надходженням дощової води із залізного даху прилеглого будинку.

Уважаємо, що експериментально отримані в мікрокосмі дані з добової динаміки гідрохімічних показників можуть слугувати методичним підґрунтям: а) для вибору часу проведення натурних досліджень у природних водних екосистемах; б) для інтерпретації результатів натурних досліджень; в) для з'ясування прямого чи опосередкованого впливу гідрохімічних чинників на альгоугруповання та інші компоненти біорізноманіття, бо відомо, що біогенні елементи можуть відігравати роль лімітуючого чинника (Liebig, 1840; Odum, 1959). Серед форм мінерального азоту у воді мікрокосму переважала амонійна форма NH_4^+, що добре корелювало з відносно високими концентраціями розчиненого кисню, який використовується на окислення інших форм азоту. Розрахований авторами середній вміст загального мінерального азоту становив 0,622 мг N/дм^3, тоді як концентрація фосфору є досить низькою (табл. 2).

Цікаво, що вміст мінерального фосфору в мікрокосмі є суттєво нижчим, ніж у Дніпрі (Ліщук, 2007; Shcherbak et al., 2016; Yakushin et al., 2017). Іншою особливістю мікрокосму є досить низький вміст кремнію (у середньому 1,150 мг Si/дм^3), який, як відомо, є необхідним для вегетації *Bacillariophyta*.

Отже, специфічними характеристиками гідрохімічного режиму мікрокосму в літній період 2025 р. був високий вміст сульфатів, хлоридів, заліза й дуже низькі концентрації мінерального фосфору та кремнію, що, безперечно, впливало на різноманіття водоростей.

Просторово-часова динаміка альгофлори. Бентосні водорості. У літньо-осінній період 2024 р. на білих емальованих стінках мікрокосму візуально було відмічено формування зелено-бурих обростань, а на дні утворився пухкий, досить потужний осад до 1,5–2 см завтовшки.

На початку лютого за стійких мінусових температур вода в мікрокосмі промерзла до дна (рис. 2-*а*). У пробах придонного пагона, відібраних упродовж лютого, у масовій кількості було виявлено представника *Cyanobacteria* – *Leptolyngbya boryana* (Gomont) Anagn. et Komárek. Наведемо детальну систематичну ієрархію цього виду. Згідно з (Кондратьєва, 1968): Cyanophyta – Gormogoniophyceae – Oscillatoriales–Plectonemataceae–*Plectonema boryanum* Gomont. Згідно з AlgaeBase (Guiry et Guiry, 2025): Cyanobacteria – Cyanophyceae–Leptolyngbyales–Leptolyngbyaceae–Leptolyngbya–*Leptolyngbya boryana* (Gomont) Anagn. et Komárek (Лептолінгбія Борі).

Коротка еколого-географічна характеристика виду (Продромус, 2024а):

– поширення: Середньодніпровська, Дніпровсько-Причорноморська, Гірсько-кримська альгофлористичні провінції, Чорне море;

– за екологічною приуроченістю – терестріальний, субаерофітний вид;

– за типологічною приуроченістю – евтрофний, ґрунтовий, степовий, солончаковий, морський вид.

Цікаво, що за даними Л.П. Приходькової цей вид трапляється у степових фітоценозах, солончаках, солоних озерах, ефемерних водоймах (Продромус …, 2024а), а також у фітообростаннях печери Джамал (Національний парк «Маунт Кармель», Ізраїль) (Vinogradova et al., 2000).

Масовий розвиток виду зафіксовано і в літніх пробах води (рис. 3).

Таблиця 2

Вміст біогенних елементів (мг/дм^3) у воді мікрокосму в липні – серпні 2025 р.

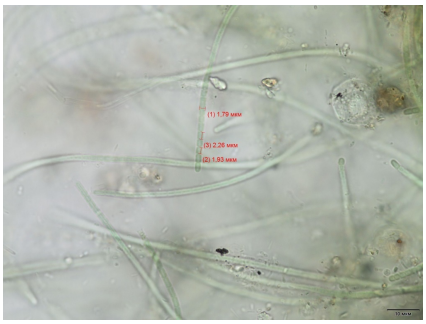
Біогенний елемент	**Межі коливань**	**Середні величини**
	Мінеральний азот, мг N/дм^3:	
NH_4^+	0,472–0,798	0,580
NO_2^-	0,019–0,031	0,024
NO_3^-	0,009–3,000	0,016
	Мінеральний фосфор, мг P/дм^3	
PO_4^{3+}	0,025–0,049	0,042

а *б*

в

Рис. 2. Візуальні зміни в мікрокосмі впродовж періоду спостережень: *а* – 4 лютого 2025 р. (вода промерзла до дна); *б* – 14 вересня 2025 р. (на поверхні води утворилась нейстонно-плейстонна плівка, вода має яскраво-зелений колір); *в* – 10 жовтня 2025 р. (вода характеризується високою прозорістю, на дні мікрокосму видно сліди від відбору проб обростань). Зміни кольору води (рис. 3-*б, 3-в*) підтверджуються і кольором відібраних проб у пластикових пляшках

а



б *в*

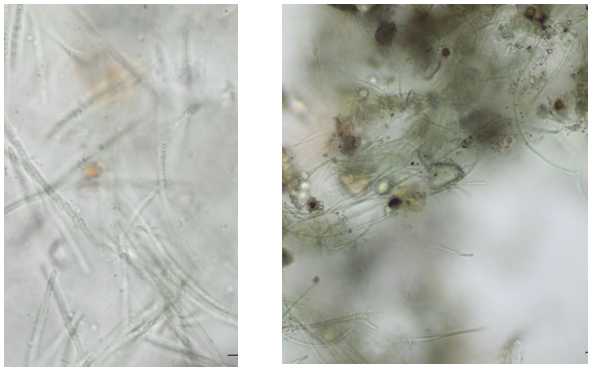


Рис. 3. Мікрофотографії *Leptolyngbya boryana* у пробах з мікрокосму: *а* – трихоми, *б* – несправжнє галуження ниток, *в* – скупчення ниток та часток детриту. Фото люб'язно надані чл.-кор. НАН України О.М. Виноградовою

Надалі за інтенсивного фотосинтезу з формуванням газових вакуолей у клітинах водоростей відбувався «відрив» ниток *L. boryana* разом із частками детриту та «спливання» на водну поверхню «водоростевих матів» (Владимирова, 1971), чи «дерновин-подушок». Аналогічне явище спостерігалось авторами на ставках смт Гостомель (Бучанський р-н Київської обл.), але, на відміну від мікрокосму, на ставках «дерновини-подушки» були сформовані ниткуватими водоростями *Mougeotia sp.* з відділу Charophyta (Щербак і Семенюк, 2023).

Припускаємо, що потрапляння *L. boryana* в мікрокосм зумовлене здатністю її ниток прикріплюватись до часток ґрунту та розширювати свій ареал повітряним шляхом, але відомі й інші шляхи поширення водоростей (Kristiansen, 1996).

Як субдомінант донної флори мікрокосму був зареєстрований також інший представник Cyanobacteria – *Microcoles autumnalis* (Gomont) (Мікроколей осінній) (Продромус …, 2024а) = *Phormidium autumnale* (Ag.) Gom. *f. autumnale* (Кондратьєва, 1968). Цей вид дуже поширений у різних типах прісних вод, на різних типах субстратів, ґрунтах і солончаках.

Наведене альгоугруповання *L. boryanum* + *M. autumnalis* віднесено авторами до біотопічного угруповання «мікрофітобентос», що деякою мірою є дискусійним. Суть проблеми полягає в різних трактуваннях понять «мікрофітобентос» і «фітоепіфітон» (Владимирова, 1971; Oksiyuk et al., 2009; Щербак та ін., 2025). Важливо, що у трактуванні поняття фітоепіфітону згідно з Водною рамковою директивою ЄС 2000 (Directive, 2000) авторами статті було запропоновано термін «мікрофітобентос твердих субстратів». Доцільність застосування терміна «мікрофітобентос» у даному експериментальному дослідженні обґрунтована тим, що нитки *L. boryana* (див. рис. 3) переплетені із частками детриту чи розміщені на них. Це явище зареєстровано навіть у пробах розталого пагона. Водночас автори цієї роботи вважають за доцільне проведення подальших дискусій щодо суті, трактування і використання термінів «мікрофітобентос» і «фітоепіфітон».

Водорості водної товщі. Іншим феноменом, який також був зареєстрований у мікрокосмі, було масове «цвітіння» води з утворенням плейстонно-нейстонної поверхневої плівки зеленою джгутиковою формою *Haematococcus pluvialis* Flotow (рис. 4). Систематична ієрархія виду за (Продромус …, 2024б): Chlorophyta – Chlorophyceae – Chlamydomonodales – Haematococcaceae – Haematococcus – *H. pluvialis* Flotow (Гематокок дощовий).

За еколого-біологічними характеристиками (Продромус …, 2024б) – аквально-терестріальний, прісноводний, планктоно-бентосний, культуральний, ґрунтовий, аерофітний. За типологічною приуроченістю вид трапляється в болотах, на заболочених ділянках, у водосховищах, у ґрунті, ефемерних водоймах, озерах, ставках, а також за умов суто атмосферного зрошування (на камінні, сухих скелях, парканах, стінах, мохах); за сапробіологічною характеристикою – *β*-мезосапроб (2,35). Загалом, вид помірно поширений по території України.

Характерною ознакою представників роду Haematococcus є значний простір між оболонкою і протопластом, виповнений слизом, і наявність гематохрому, який частково забарвлює вегетативні клітини в червоний колір. Під час вегетативного розмноження утворюються апланоспори, у яких накопичується гематохром, унаслідок чого вони стають темно-червоними (Коршіков,

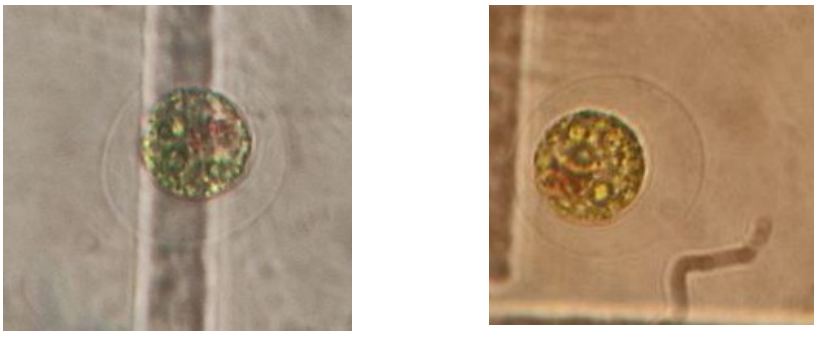


Рис. 4. Мікрофотографії *Haematococcus pluvialis* у пробах з мікрокосму

1938). Під час опрацювання проби води під мікроскопом нами було виявлено не тільки вегетативні клітини, а й декілька апланоспор темно-червоного кольору. Цікаво, що згідно з даними про поширення виду у визначнику (Коршіков, 1938) *H. pluvialis* може траплятись у калюжах дощової води на гранітних скелях, а також штучних басейнах.

«Цвітіння» води у мікрокосмі з утворенням яскраво-зеленої плейстонно-нейстонної плівки було зафіксовано впродовж 12–18 вересня 2025 р. (рис. 2-*б*). Кількісна проба (V = 0,2 дм^3), відібрана 14 вересня 2025 р. з поверхневого горизонту, показала монодомінування *H. pluvialis* із чисельністю (*N*) 114 750,0 тис. кл/дм^3 і біомасою (*B*) 39,02 мг/дм^3 (рис. 5).

Дослідження, проведені 23 вересня 2025 р., також показали монодомінування *H. pluvialis*, але його чисельність (52 159,0 тис. кл/дм^3) і біомаса (17,72 мг/дм^3) були майже у 2,2 раза менші, ніж 14 вересня 2025 р. (див. рис. 4). Візуальними спостереженнями відмічено, що з поверхні мікрокосму зникла виражена зелена плівка, а зеленкуватий колір відібраної проби був менш насиченим.

Подальше суттєве зниження вегетації *H. pluvialis* підтверджують натурні дані, отримані 10 жовтня 2025 р. Чисельність водоростевої популяції знизилась до 27 452,11 тис. кл/дм^3, біомаси – до 9,326 мг/дм^3, тобто показники рясності були в 1,9 раза меншими, ніж 14 вересня 2025 р. (див. рис. 4).

Для пояснення встановленого феномену висловимо й спробуємо обґрунтувати таку гіпотезу. Водне середовище мікрокосму характеризується низьким вмістом фосфору, який, вочевидь, (разом із кремнієм для Bacillariophyta) і є лімітуючим чинником для масового розвитку водоростей, тому таксономічний склад альгофлори досить бідний. Але в перших числах вересня в Бучанському р-ні впродовж декількох днів спостерігались несприятливі погодні умови – штормовий вітер, буря, до мікрокосму було занесено значну кількість скошеної сухої трави, іншої органічної маси, пилу тощо. Навіть візуально на поверхні води мікрокосму були помітні рештки рослин. Фактично мало місце явище енергетичної субсидії, а разом з вітром було перенесено *H. pluvialis*, який є водно-наземним, ґрунтовим і аерофітним видом, а також може розвиватись у басейнах з дощовою водою.

Очевидно, що енергетична субсидія разом з високими денними температурами, оптимальною сонячною інсоляцією, відсутністю конкуренції з іншими планктонними формами водоростей, зокрема з Bacillariophyta, і сформували комплексні умови, які призвели до масового «цвітіння» *H. pluvialis*. Наявність двох джгутиків дозволяє виду як активно завойовувати водну товщу, так і формувати плейстонно-нейстонну поверхневу плівку. Водночас ефект

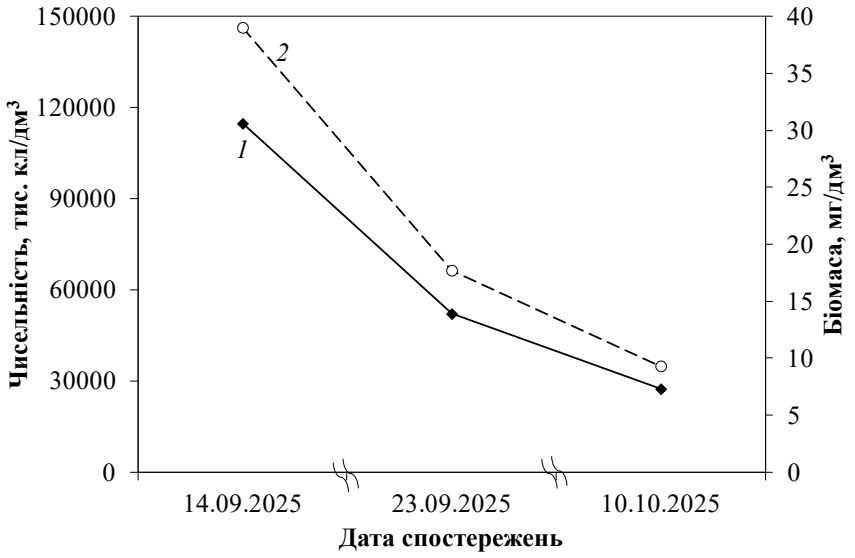


Рис. 5. Динаміка чисельності (*1*) та біомаси (*2*) *Haematococcus pluvialis* Flotow на різних етапах вегетації в мікрокосмі

аутогенної енергетичної субсидії зумовив лише відносно короткотривале «цвітіння» води з подальшим втрачанням *H. pluvialis* панівних позицій.

Отже, у період досліджень в модельному мікрокосмі сформувались дві різні біотопічні системи: бентосна із представників Cyanobacteria з домінуванням *Leptolyngbya boryana* (рис. 6-*а*) і планктонно-нейстонна із представника Chlorophyta – *Haematococcus pluvialis* (рис. 6-*б*).

Ці два альгоугруповання, різні за таксономічними, цитоморфологічними, розмірними, біотопічними характеристиками, у процесі життєдіяльності формували в мікрокосмі кілька біотичних зв'язків:

– антагоністичні: а) масове «цвітіння» *H. pluvialis* зумовило передусім екранування водної товщі й суттєве зменшення надходження сонячної енергії до бентосної форми *Leptolyngbya boryana*; б) конкуренція за біогенні й органічні речовини призвела до пригнічення вегетації *L. boryana*. Це підтверджується тим, що після зниження інтенсивності «цвітіння» *H. pluvialis* (кінець вересня – початок жовтня) вегетація *L. boryana* знов інтенсифікувалась;

– синергічні – після закінчення вегетації, відмирання і лізису клітин *H. pluvialis* у водну товщу надійшли поживні речовини, які є свого роду «внутрішньою» чи аутогенною енергетичною субсидією.

Загалом, період досліджень (3–4 лютого – 10 жовтня 2025 р.) альгофлора мікрокосму була представлена комплексом Cyanobacteria – Chlorophyta, який налічував шість таксонів водоростей родового й видового рангів (табл. 3).

Рис. 6. Просторова динаміка біотопічної приуроченості панівних видів у мікрокосмі в різні сезони 2025 р.: *а – L. boryana*, *б – H. pluvialis*

Таблиця 3

Таксономічне різноманіття водоростей, період вегетації в мікрокосмі, біотопічна приуроченість, кількісна оцінка за шкалою Вислоуха (Методи …, 2006) упродовж лютого – початку жовтня 2025 р.

Відділ	№	Вид	Період вегетації	Біотопічна приуроченість	Кількісна оцінка
Cyano-bacteria	1.	*Leptolyngbya boryana*	зима літо осінь	альгопагон мікрофітобентос мікрофітобентос	масово дуже часто масово
	2.	*Microcoles autumnalis*	осінь	мікрофітобентос	дуже рідко
	3.	*Pleurocapsa* sp.	літо	планктон	дуже рідко
Chloro-phyta	1.	*Haemotococcus pluvialis*	перша половина – середина вересня – початок жовтня	планктон плейстон – нейстон планктон	дуже масово часто дуже рідко
	2.	*Pteromonas sp.*	літо	планктон	дуже рідко

Висновки

Узагальнення альгологічних даних разом з абіотичними показниками дозволяє сформувати деякі положення, які, на нашу думку, підтверджують важливість альгофлори у формуванні біорізноманіття та високу адаптаційну здатність водоростей до життєдіяльності за різних умов довкілля.

Використаний в експерименті мікрокосм наповнювався атмосферними опадами чи дощовим стоком із залізного даху прилеглого будинку, тому водорості можуть потрапляти до нього кількома шляхами: а) вітрове перенесення (аеропланктон); б) разом із частками ґрунту чи іншого субстрату; в) дощовий змив із даху будинку; г) інші шляхи (занесення птахами тощо).

Специфічний гідрохімічний режим із високим вмістом сульфатів, Na^+ і K^+ і низьким фосфору вказує на наявність специфічних обмінних процесів у панівних видів Cyanobacteria, наприклад з використанням сірки. На користь цієї думки свідчить і те, що, згідно з описами панівного виду виду *L. boryana* (Кондратьєва, 1968), трихоми даної водорості блідо-зелені, майже безбарвні, що вказує на низький вміст хлорофілу *a*. Важливо, що ця ознака була добре виражена в живих нитках *L. boryana* в усіх пробах, відібраних у різні сезони. Але це питання потребує спеціальних досліджень.

Домінування водоростей з різною біотопічною приуроченістю, безсумнівно, є проявом високого адаптаційного потенціалу на популяційно-ценотичному рівні до дії різних екологічних чинників, а відсутність в альгофлорі Bacillariophyta зумовлена низьким вмістом у воді кремнію.

Різкі зміни в якісному складі та кількісному розвитку водоростевих угруповань у мікрокосмі є відгуком (реакцією) як на аллогенну, так і на автохтонну енергетичну субсидії.

Паралельне домінування двох видів чи більшої їх кількості може формувати між ними явища як антагонізму, так і синергізму.

Метод мікрокосму також може бути застосований для вивчення водоростевих угруповань у контексті теорії метаугруповань, зокрема:

– процесів і шляхів розселення водоростей різних систематичних відділів;

– біотичних взаємодій між компонентами мікрокосму: планктоном і бентосом та обміну видами як у двомірному, так і у тримірному просторі;

– парадигм теорії метаугруповань, як-от мас-ефект, динаміка патчів, сортування видів. Наприклад, можна допустити, що завдяки мас-ефекту в мікрокосм можуть потрапляти різні види водоростей, проте внаслідок сортування видів у значній кількості розвивались лише два види (*L. boryana* та *H. fluviatilis*), для яких умови мікрокосму були сприятливими.

Отже, проведення експериментальних досліджень якісного і кількісного розмаїття альгоугруповань з використанням мікрокосму є одним із перспективних напрямів гідробіологічних і альгологічних досліджень. Отримання емпіричних репрезентативних даних стало можливим за паралельного вивчення основних абіотичних чинників, які визначають розмаїття альгоугруповань і дозволяють врахувати вплив довкілля у значно ширших умовах, ніж у суто лабораторних дослідженнях.

Список використаної літератури

Владимирова К.С. До питання про вивчення донних водоростей Дніпровсько-Бузького лиману. *Дніпровсько-Бузький лиман.* Київ : Наукова думка, 1971. С. 155–202.

Козійчук Е.Ш. Фітомікробентос Кілійської дельти Дунаю : автореф. … канд. біол. наук. Київ, 2020. 23 с.

Кондратьєва Н.В. Клас гормогонієві – Hormogoniophyceae. *Визначник прісноводних водоростей Українською РСР.* Вип. 1 : Синьозелені водорості – Cyanophyta. Ч. 2. Київ : Наукова думка, 1968. 523 с.

Коршіков О.А. *Volvocineae. Визначник прісноводних водоростей УРСР.* Т. 4. Київ : Вид-во АН УРСР, 1938. 184 с.

Ліщук А.В. Еколого-фізіологічні основи формування фітопланктону прісноводних екосистем : автореф. дис. … докт. біол. наук. Київ, 2007. 38 с.

Продромус спорових рослин України: водорості. Кн. 1 / за ред. П.М. Царенка. Київ : НВП «Видавництво «Наукова думка»», 2024а. 879 с.

Продромус спорових рослин України: водорості. Кн. 2 / за ред. П.М. Царенка. Київ : НВП «Видавництво «Наукова думка»», 2024б. 879 с.

Романенко В.Д., Жукинський В.М., Оксіюк О.П. Методика встановлення і використання екологічних нормативів якості поверхневих вод суші та естуаріїв України. Київ : Мінекоресурсів України, 2001. 48 с.

Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. В.Д. Романенка. Київ : Логос, 2006. 408 с.

Хільчевський В.К., Осадчий В.І., Курило С.М. Регіональна гідрохімія України. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2019. 343 с.

Щербак В.І., Семенюк Н.Є. Структурно-функціональна характеристика фітопланктону, дерновин-подушок, детриту і якість води за основних абіотичних чинників ставів міської агломерації (смт Гостомель, Бучанський р-н Київської обл., Україна). Повідомлення І. Видове, таксономічне, екологічне різноманіття фітопланктону та характеристика дерновин-подушок за основних абіотичних складових ставків. *Альгологія.* 2023. Т. 33. № 1. С. 22–47. https://doi.org/10.15407/alg33.01.022

Щербак В.І., Семенюк Н.Є., Давидов О.А., Ларіонова Д.П. Сучасна характеристика фітопланктону, мікрофітобентосу та фітоепіфітону Канівського водосховища. Повідомлення 1: Таксономічне, екологічне різноманіття та просторовий розподіл. *Альгологія.* 2023. Т. 33. № 3. С. 147–184. https://doi.org/10.15407/alg33.03.147

Щербак В.І., Семенюк Н.Є., Давидов О.А., Козійчук Е.Ш. Особливості біотопічної приуроченості водоростей водної товщі прісноводних гідроекосистем різного типу. *Альгологія.* 2025. Т. 35. № 2. С. 104–127. https://doi.org/10.15407/alg35.02.104

Directive 2000/60/EC. Water Framework Directive of the European Parliament and the Council, of 23 October 2000, Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. *Official Journal of the European Community.* 2000. L327. P. 1–72.

Gregušová M., Hybská H., Mordáčová M. Microcosms as an implement for assessing ecological processes in aquatic and terrestrial environments. Review. *Environment Protection Engineering.* 2025. Vol. 51. № 1. P. 5–19. https://doi.org/10.37190/epe250101

Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2025 [Електронний ресурс]. URL: http://www.algaebase.org (дата звернення 29.10.2025).

Kristiansen J. Dispersal of freshwater algae : a review. *Hydrobiologia.* 1996. Vol. 336. P. 151–157. https://doi.org/10.1007/BF00010829

Liebig J. Chemistry in Its Application to Agriculture and Physiology. London : Taylor and Walton, 1840.

Odum E.P. Fundamental of Ecology. Sec. ed. Philadelphia, London : W.B. Saunders Company, 1959. 546 p.

Oksiyuk O.P., Davydov O.A., Karpezo Yu.I. Ecological and morphological structure of microphytobenthos. *Hydrobiol. J.* 2009. Vol. 45. № 2. P. 13–23. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v45.i2.20

Shcherbak V.I., Yakushin V.M., Zadorozhnaya A.M., Semenyuk N.Ye., Linchuk M.I. Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton, phytomicroepiphyton, and nutrients content in the River Section of the Kanev Reservoir. *Hydrobiol. J.* 2016. Vol. 52. № 1. P. 49–61. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i1.50.

Shcherbak V.I., Semenyuk N.Ye., Davydov O.A., Koziychuk E.Sh. Planktonic and contour algal communities in the Ukrainian section of the Western Bug River and its tributaries. *International Journal on Algae.* 2025. Vol. 27. № 2. P. 117–138. https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v27.i2.30

Shelyuk Yu.S. Phytoplankton of the Ukrainian Polissia River Ecosystems. *International Journal on Algae.* 2023. 25. № 2. P. 139–156. https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v25.i2.30

Vinogradova O.M., Kovalenko O.V., Nevo E.D., Weinstein-Evron M. Cyanoprocaryotes / Cyanobacteria of Jamal Cave, Nahal Me'arot Nature Reserve, Mount Carmel, Israel. *International Journal on Algae.* 2000. Vol. 2. № 1. P. 41–50. https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v2.i1.50

Yakushin V.M., Shcherbak V.I., Semenyuk N.Ye., Linchuk M.I. Hydrochemical characteristics of the Kiev Reservoir at the present time. *Hydrobiol. J.* 2017. Vol. 53. № 6. P. 96–109. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i6.100

References

Vladymyrova, K.S. (1971). Do pytannja pro vyvchennja donnykh vodorostej Dniprovsjko-Buzjkogho lymanu [To the issue of studying bottom algae of the Dnieper-Bug Estuary]. In: *Dniprovsjko-Buzjkyj lyman [Dnieper-Bug Estuary].* Naukova Dumka, 155–202 [in Ukrainian].

Koziychuk, E.Sh. (2020). *Fitomikrobentos kilijsjkoji deljty Dunaju [Phytomicrobenthos of the the Kiliya Danube delta]:* PhD (Biol.) Abstract [in Ukrainian].

Kondratieva, N.V. (1968). *Klas ghormoghonijevi – Hormogoniophyceae. Vyznachnyk prisnovodnykh vodorostej Ukrajinsjkoju RSR. Vyp. 1: Synjozeleni vodorosti – Cyanophyta. Ch. 2 [Hormogoniophyceae. Identification guide of the freshwater algae of Ukrainian RSR. Issue 1: Blue-green algae – Cyanophyta. Part 2].* Naukova Dumka [in Ukrainian].

Korshikov, O.A. *Volvocineae. Vyznachnyk prisnovodnykh vodorostej URSR. T. 4. [Volvocineae. Identification guide of the freshwater algae of Ukrainian RSR. Vol. 4].* Academy of Sciences of URSR Publishing House [in Ukrainian].

Lishchuk, A.V. (2007). *Ekologho-fiziologhichni osnovy formuvannja fitoplanktonu prisnovodnykh ekosystem [Ecological and physiological fundamentals of phytoplankton development in freshwater ecosystems]*: Dr. Sci. (Biol.) Abstract [in Ukrainian].

Prodromus sporovykh roslyn Ukrajiny: vodorosti. Knyga 1 [Prodromus of spore plants of Ukraine: algae. Book 1] (2024a). Naukova Dumka [in Ukrainian].

Prodromus sporovykh roslyn Ukrajiny: vodorosti. Knyga 2 [Prodromus of spore plants of Ukraine: algae. Book 2] (2024b). Naukova Dumka [in Ukrainian].

Romanenko, V.D., Zhukinskyi, V.M., & Oksiyuk, O.P. (2001). *Metodyka vstanovlennja i vykorystannja ekologhichnykh normatyviv jakosti poverkhnevykh vod sushi ta estuarijiv Ukrajiny [Methods of identifying and applying the ecological standards of quality of surface waters and estuaries of Ukraine].* Minecoresursiv Ukrainy [in Ukrainian].

Metody ghidroekologhichnykh doslidzhenj poverkhnevykh vod [Methods of hydroecological studies of surface waters] (2006). Ed. by V.D. Romanenko. Logos [in Ukrainian].

Khilchevskyi, V.K., Osadchyi, V.I., & Kurylo, S.M. (2019). Reghionaljna ghidrokhimija Ukrajiny [Regional hydrochemistry of Ukraine]. VPTs "Kyivskyi Universytet" [in Ukrainian]

Shcherbak, V.I., & Semeniuk, N.Ye. (2023). Strukturno-funkcionaljna kharakterystyka fitoplanktonu, dernovyn-podushok, detrytu i jakistj vody za osnovnykh abiotychnykh chynnykiv staviv misjkoji aghlomeraciji (smt Ghostomelj, Buchansjkyj r-n Kyjivsjkoji obl., Ukrajina). Povidomlennja I. Vydove, taksonomichne, ekologhichne riznomanittja fitoplanktonu ta kharakterystyka dernovyn-podushok za osnovnykh abiotychnykh skladovykh stavkiv [Structural and functional characteristics of phytoplankton, algal mats, detritus and water quality under main abiotic factors in urban ponds (case study of urban settlement Hostomel, Bucha district, Kyiv Region, Ukraine). Report I. Species and taxonomic composition, ecological diversity of phytoplankton and filamentous algal mats characteristics under main abiotic factors]. *Algologia,* 33(1), 22–47. https://doi.org/10.15407/alg33.01.022 [in Ukrainian].

Shcherbak, V.I., Semeniuk, N.Ye., Davydov, O.A., & Larionova, D.P. (2023). Suchasna kharakterystyka fitoplanktonu, mikrofitobentosu ta fitoepifitonu Kanivsjkogho vodoskhovyshha. Povidomlennja 1: Taksonomichne, ekologhichne riznomanittja ta prostorovyj rozpodil [Present-day characteristics of phytoplankton, microphytobenthos and phytoepiphyton of the Kaniv reservoir. Report 1: taxonomic, ecological diversity and spatial pattern]. *Algologia,* 33(3), 147–184. https://doi.org/10.15407/alg33.03.147 [in Ukrainian].

Shcherbak, V.I., Semeniuk, N.Ye., Davydov, O.A., Koziychuk, E.Sh. (2025). Osoblyvosti biotopichnoji pryurochenosti vodorostej vodnoji tovshhi prisnovodnykh ghidroekosystem riznogho

typu [Specifics of biotopic preferences of algae in the water column in the freshwater ecosystems of different types]. *Algologia,* 35(2), 104–127. https://doi.org/10.15407/alg35.02.104 [in Ukrainian].

Directive 2000/60/EC (2000). Water Framework Directive of the European Parliament and the Council, of 23 October 2000, Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. *Official Journal of the European Community*, L327, 1–72 [in English].

Gregušová, M., Hybská, H., & Mordáčová, M. (2025). Microcosms as an implement for assessing ecological processes in aquatic and terrestrial environments. Review. *Environment Protection Engineering*, 51(1), 5–19. https://doi.org/10.37190/epe250101 [in English].

Guiry, M.D., & Guiry, G.M. (2025). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. [Electronic resource] URL: http://www.algaebase.org (access date 29.10.2025) [in English].

Kristiansen, J. (1996). Dispersal of freshwater algae – a review. *Hydrobiologia,* 336, 151–157. https://doi.org/10.1007/BF00010829 [in English].

Liebig, J. (1840). *Chemistry in Its Application to Agriculture and Physiology*. Taylor and Walton [in English].

Odum, E.P. (1959). *Fundamental of Ecology*. W.B. Saunders Company [in English].

Oksiyuk, O.P., Davydov, O.A., & Karpezo, Yu.I. (2009). Ecological and morphological structure of microphytobenthos. *Hydrobiol. J.,* 45(2), 13–23. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v45.i2.20 [in English].

Shcherbak, V.I., Yakushin, V.M., Zadorozhnaya, A.M., Semenyuk, N.Ye., & Linchuk, M.I. (2016). Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton, phytomicroepiphyton, and nutrients content in the River Section of the Kanev Reservoir. *Hydrobiol. J.*, 52(1), 49–61. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i1.50 [in English].

Shcherbak, V.I., Semenyuk, N.Ye., Davydov, O.A., & Koziychuk, E.Sh. (2025). Planktonic and contour algal communities in the Ukrainian section of the Western Bug River and its tributaries. *International Journal on Algae*, 27(2), 117–138. https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v27.i2.30 [in English].

Shelyuk, Yu.S. (2023). Phytoplankton of the Ukrainian Polissia River Ecosystems. *International Journal on Algae*, 25(2), 139–156. https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v25.i2.30 [in English].

Vinogradova, O.M., Kovalenko, O.V., Nevo, E.D., & Weinstein-Evron, M. (2000). Cyanoprocaryotes / Cyanobacteria of Jamal Cave, Nahal Me'arot Nature Reserve, Mount Carmel, Israel. *International Journal on Algae,* 2(1), 41–50. https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v2.i1.50 [in English].

Yakushin, V.M., Shcherbak, V.I., Semenyuk, N.Ye., & Linchuk, M.I. (2017). Hydrochemical characteristics of the Kiev Reservoir at the present time. *Hydrobiol. J.*, 53(6), 96–109. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i6.100 [in English].

Отримано: 04.11.2025
Прийнято: 09.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

ГЕОГРАФІЯ

УДК 911.3
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.10

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ СУСПІЛЬНО-ГЕОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ РЕКРЕАЦІЙНО-ТУРИСТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РЕГІОНУ

А. О. Гетьманенко[1], В. В. Яворська[2]

Рекреаційно-туристичний потенціал розглядається як один із провідних чинників соціально-економічного розвитку регіонів у контексті глобального зростання ролі туризму. Його ефективне використання зумовлює диверсифікацію економіки, підвищення конкурентоспроможності територій і зростання якості життя населення. Особливого значення ці питання набувають для приморських регіонів, зокрема Одеського, який має вигідне економіко-географічне положення, значну ресурсну базу й перспективи розвитку різних видів туризму. У науковому дискурсі вагомим є суспільно-географічний підхід, що поєднує природничі й соціально-гуманітарні аспекти дослідження та дає змогу розглядати рекреаційно-туристичний потенціал як багатовимірну систему. Мета роботи – обґрунтування теоретико-методичних засад і розробка науково-прикладних підходів до оцінки й оптимізації рекреаційно-туристичного потенціалу регіону.

У процесі підготовки статті використовувались описовий, аналітичний, порівняльно-географічний та узагальнювальний методи. Системний підхід дав змогу розглядати рекреаційно-туристичний потенціал як інтегровану багатокомпонентну структуру, у якій взаємодіють природні, соціально-економічні, культурні й інфраструктурні чинники. Інформаційним підґрунтям дослідження стали монографії, навчальні посібники, а також наукові публікації вітчизняних і зарубіжних авторів.

У статті розглянуто зміст і сутність понять «рекреаційний потенціал» і «туристичний потенціал» у сучасній географічній науці. Проаналізовано класифікаційні підходи до вивчення рекреаційно-туристичних ресурсів, визначено ключові методологічні принципи суспільно-географічної оцінки рекреаційно-туристичного потенціалу регіону. Представлено огляд зарубіжного та вітчизняного досвіду досліджень у цій сфері. Запропоновано інтеграційний підхід, що враховує природно-ресурсні, соціально-економічні й культурно-історичні чинники.

Рекреаційний і туристичний потенціал варто розглядати як цілісну систему, управління якою потребує поєднання класичних і сучасних методів аналізу. Досвід зарубіжних країн свідчить про результативність інтегрованих стратегій, що поєднують економічні, екологічні та культурні аспекти, і може стати основою для вдосконалення підходів до розвитку рекреаційно-туристичного потенціалу в Україні.

[1] аспірантка кафедри економічної та соціальної географії і туризму
(Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса)
e-mail: hetmanenko.anastasiia@stud.onu.edu.ua
ORCID: 0009-0001-2335-1204
[2] доктор географічних наук, професор,
професор кафедри економічної та соціальної географії і туризму
(Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса)
e-mail: yavorskaya@onu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7449-7908

Практичне значення отриманих результатів дослідження полягає в тому, що запропоновані в ньому підходи до оцінки рекреаційно-туристичного потенціалу можуть бути використані в стратегічному плануванні, розробці регіональних програм розвитку туризму та формуванні інвестиційних проєктів.

Ключові слова: *рекреаційний потенціал, туристичний потенціал, суспільна географія, рекреаційно-туристичні ресурси, методологія, регіональний розвиток.*

THEORETICAL AND METHODICAL FOUNDATIONS OF SOCIO-GEOGRAPHICAL ANALYSIS OF THE RECREATIONAL AND TOURISM POTENTIAL OF A REGION

A. O. Hetmanenko, V. V. Yavorska

Recreational and tourism potential is considered one of the leading factors of regional socio-economic development in the context of the global rise of tourism. Its effective utilization ensures economic diversification, enhances territorial competitiveness, and contributes to the improvement of the population's quality of life. These issues are of particular importance for coastal regions, especially Odesa, which possesses a favorable economic and geographical location, a significant resource base, and promising opportunities for the development of various types of tourism. Within scientific discourse, the socio-geographical approach is of great significance, as it combines natural and socio-humanitarian aspects of research and allows for the examination of recreational and tourism potential as a multidimensional system. The purpose of this study was to substantiate theoretical and methodological foundations and to develop scientific and applied approaches to the assessment and optimization of the recreational and tourism potential of the region.

In preparing the article, descriptive, analytical, comparative-geographical, and generalizing methods were applied. The systemic approach made it possible to consider recreational and tourism potential as an integrated multi-component structure, in which natural, socio-economic, cultural, and infrastructural factors interact. The information base of the study included monographs, textbooks, as well as scientific publications by domestic and foreign authors.

The article examined the content and essence of the concepts "recreational potential" and "tourism potential" in contemporary geographical science. Classification approaches to the study of recreational and tourism resources were analyzed, and key methodological principles of socio-geographical assessment of the recreational and tourism potential of a region were identified. A review of foreign and domestic research experience in this field was presented. An integrative approach was proposed, taking into account natural-resource, socio-economic, and cultural-historical factors.

Recreational and tourism potential should be regarded as a holistic system, the management of which requires a combination of classical and modern analytical methods. The experience of foreign countries demonstrates the effectiveness of integrated strategies that combine economic, environmental, and cultural aspects, and can serve as a basis for improving approaches to the development of recreational and tourism potential in Ukraine.

The practical significance of the research results lies in the fact that the proposed approaches to the assessment of recreational and tourism potential may be applied in strategic planning, the development of regional tourism programs, and the design of investment projects.

Key words: *recreational potential, tourism potential, social geography, recreational and tourism resources, methodology, regional development.*

Вступ

Рекреаційно-туристичний потенціал є одним із ключових чинників сталого соціально-економічного розвитку регіонів, особливо в контексті зростання ролі індустрії туризму в глобальній економіці. Для регіонів із розвиненим ресурсним потенціалом, зокрема приморських, комплексне вивчення та раціональне використання ресурсів є першочерговим завданням. Суспільно-географічний підхід дає змогу інтегрувати природничі й соціогуманітарні аспекти дослідження, формуючи цілісну картину просторової організації рекреаційної діяльності.

Комплексне вивчення рекреаційно-туристичного потенціалу передбачає оцінку не лише кількісних і якісних характеристик ресурсної бази, а й рівня її просторової організації, доступності, екологічної стійкості та інтегрованості в систему міжрегіональних і міжнародних туристичних зв'язків. Важливе значення має врахування сезонності рекреаційної діяльності, соціально-де-

мографічних особливостей туристичних потоків, рівня розвитку інфраструктури та сервісу, а також впливу туристичної діяльності на довкілля.

Суспільно-географічний підхід у дослідженні рекреаційно-туристичного потенціалу дає змогу синтезувати природничі та соціогуманітарні аспекти, виявляти закономірності просторової організації рекреаційних процесів і визначати пріоритетні напрями розвитку туристичної сфери в межах конкретного регіону. Такий підхід сприяє не лише науковому осмисленню ресурсної бази, а й формуванню науково обґрунтованих рекомендацій для органів державного управління та суб'єктів господарювання у сфері туризму.

Для приморських регіонів, зокрема Одеського, який має вигідне економіко-географічне положення на перетині міжнародних транспортних і туристичних маршрутів, значний рекреаційний потенціал створює унікальні можливості для диверсифікації економіки, розвитку міжрегіональної співпраці й підвищення якості життя населення. Тому дослідження рекреаційно-туристичного потенціалу Одеського регіону в суспільно-географічному контексті є надзвичайно важливим як для наукових, так і для прикладних досліджень.

Метою дослідження є обґрунтування теоретико-методичних засад і розробка науково-прикладних підходів до оцінки й оптимізації рекреаційно-туристичного потенціалу регіону. Об'єктом дослідження є рекреаційно-туристичний потенціал Одеського регіону як цілісної просторової системи. Предметом дослідження є суспільно-географічні закономірності формування, функціонування та використання цього потенціалу.

Завданнями дослідження є:

– Узагальнити та систематизувати основні наукові підходи до вивчення понять «рекреаційний потенціал» і «туристичний потенціал» у сучасній суспільній географії.

– Проаналізувати класифікаційні підходи до вивчення рекреаційно-туристичних ресурсів і визначити їх роль у формуванні потенціалу регіону.

– Обґрунтувати методологічні засади суспільно-географічної оцінки рекреаційно-туристичного потенціалу з урахуванням природних, соціально-економічних і просторових чинників.

Матеріал і методи

У процесі підготовки статті використано комплекс методів, спрямованих на теоретико-методичне обґрунтування суспільно-географічного аналізу рекреаційно-туристичного потенціалу регіону.

Насамперед застосовано метод аналізу та синтезу наукової літератури, який дав змогу узагальнити основні підходи до визначення понять «рекреаційний потенціал» і «туристичний потенціал», а також систематизувати наявні класифікаційні схеми рекреаційно-туристичних ресурсів. Також застосовано метод критичного аналізу й узагальнення, що дав змогу інтегрувати різні наукові підходи в єдину систему теоретико-методичних засад і сформувати власне бачення досліджуваної проблеми. Завдяки використанню порівняльно-географічного методу проаналізовано зарубіжний і вітчизняний досвід оцінки й використання рекреаційно-туристичного потенціалу, зокрема на прикладі країн Європейського Союзу, Середземноморського регіону та приморських територій України.

І наостанок для структурування основного матеріалу використано системний підхід, який дав змогу розглядати рекреаційно-туристичний потенціал як багатокомпонентну структуру, а також виявляти взаємозв'язки між його природними, соціально-економічними, культурними й інфраструктурними складовими.

Інформаційну основу статті становлять наукові монографії, навчальні посібники, статті вітчизняних і зарубіжних авторів, а також статистичні дані щодо розвитку туристичної сфери.

Результати

Рекреаційно-туристичний потенціал регіону є складною багатовимірною категорією, що інтегрує природні, соціально-економічні, культурні, інфраструктурні й організаційні ресурси території, які забезпечують належні умови для розвитку відпочинку та туризму. У наукових роботах О. Любіцевої й О. Бейдика основна увага приділялася вивченню теоретико-методичних засад суспільно-географічного аналізу рекреаційно-туристичного потенціалу, що зумовлені зростанням ролі туристичної галузі як чинника економічного зростання та соціальної інтеграції регіонів у контексті концепції сталого розвитку (Бейдик, 2001; Любіцева, 2005). У науковій літературі рекреаційний потенціал визначається як сукупність природних, культурно-історичних і соціально-економічних ресурсів, що використовуються для задоволення рекреаційних потреб населення. Туристичний потенціал, у свою чергу,

трактується як більш вузька категорія, орієнтована переважно на організовані форми туристичної діяльності (Симочко, 2012). Сучасні дослідники, зокрема М. Поколодна, О. Бейдик, К. Голл та інші, наголошують, що оцінка потенціалу повинна враховувати не лише наявність ресурсів, а і їх якість, доступність та екологічний стан, що є ключовими чинниками забезпечення сталого розвитку рекреаційно-туристичної сфери (Hall, 2000; Поколодна, 2002; Smith & Robinson, 2006; Бейдик, 2011).

Вагомий внесок у розвиток теоретико-методичних основ суспільно-географічного аналізу рекреаційного потенціалу зробив В. Руденко, обґрунтувавши важливість комплексного підходу, що поєднує кількісну оцінку ресурсів із просторовим аналізом розміщення туристичних об'єктів та інфраструктури, інтегруючи природні й соціально-економічні фактори. В. Руденко розробив методику багатокритеріальної оцінки рекреаційного потенціалу, яка набула широкого застосування в регіональних дослідженнях України (Руденко, 1993a; Руденко, 1993b).

У наукових працях, зокрема в роботах І. Гевка, К. Коломієць, В. Сича, В. Яворської розглядається структура рекреаційно-туристичного потенціалу (далі – РТП), яка складається з п'яти основних компонентів: природного, соціально-культурного, інфраструктурного, економічного й інституційного (Yavorska et al., 2019). Ці компоненти взаємодіють та утворюють цілісну систему, спрямовану на розвиток рекреаційної діяльності. Отже, РТП є багатокомпонентною системою, де кожен із п'яти виокремлених компонентів відіграє ключову роль у формуванні та функціонуванні рекреаційно-туристичної діяльності. У межах концепції сталого розвитку особливого значення набуває збалансоване використання ресурсів без завдання шкоди екологічній рівновазі та культурній спадщині регіону (UNWTO, 2019).

Важливою методичною основою сучасних досліджень РТП є застосування *кваліметричних методів,* що дають змогу комплексно враховувати різнорідні характеристики ресурсів і факторів. О. Топчієв, В. Сич, В. Яворська розробили й упровадили підходи, що передбачають визначення не лише кількісних, а і якісних параметрів туристичних ресурсів, а також вагомості кожного критерію у формуванні інтегрального показника потенціалу. Це забезпечує об'єктивність і прозорість оцінки, що є необхідною передумовою для стратегічного планування розвитку туристичної сфери (Топчієв та ін., 2020; Топчієв та ін., 2022).

Суспільно-географічний підхід до аналізу РТП зосереджується на вивченні просторової організації відпочинку, ураховуючи взаємодію природних і соціальних чинників. Серед найпоширеніших методичних інструментів варто виділити картографічний аналіз, кластеризацію територій за рівнем потенціалу, просторове моделювання й розрахунок інтегральних показників туристичного навантаження (Оленич, 2001). Сучасні дослідження широко використовують геоінформаційні системи *(ГІС)*, що забезпечують високоточний просторовий аналіз і врахування комплексу природних, соціально-економічних та інфраструктурних параметрів (Buryslawski & Zyszkowski, 1995).

На регіональному рівні значну увагу приділяють урахуванню специфіки локальних соціально-економічних умов, демографічної структури, культурної спадщини й екологічної ситуації. Вітчизняні науковці наголошують, що ефективний розвиток РТП можливий лише за умов комплексного поєднання ресурсного потенціалу з розвитком інфраструктури й ефективною маркетинговою стратегією (Бейдик, 2000; Симочко, 2012).

Незважаючи на значний теоретичний і методичний доробок, залишається актуальним завдання розробки уніфікованих методичних підходів до оцінювання рекреаційно-туристичного потенціалу, які враховують специфіку різних видів туризму, таких як екологічний, культурний, спортивний тощо. Перспективним напрямом є інтеграція цифрових технологій та інструментів аналізу даних із соціальних мереж для моніторингу рекреаційної активності населення, що значно розширює можливості суспільно-географічного аналізу (Горин, 2014; Герасименко, 2016).

Розглядаючи теоретико-методичні засади суспільно-географічного аналізу рекреаційно-туристичного потенціалу регіону, необхідно акцентувати увагу на класифікації рекреаційно-туристичних ресурсів, які є фундаментальною основою для системної оцінки потенціалу території.

Для комплексного аналізу й ефективного управління розвитком туристичної сфери необхідно не лише визначити складові потенціалу, а й здійснити чітку систематизацію ресурсів, що забезпечують рекреаційну діяльність.

У науковій літературі класифікація рекреаційно-туристичних ресурсів зазвичай здійснюється за *трьома основними групами* (рис. 1), що відображають різні аспекти їхньої природи та функціонального призначення (Безуглий та ін., 2021):

1. *Природні ресурси* – кліматичні умови, гідрологічні об'єкти (річки, озера, джерела), ландшафтні особливості (гори, узбережжя, ліси), а також біологічні компоненти (різноманіття флори і фауни). Вони формують природне середовище для відпочинку, оздоровлення й екологічного туризму, створюючи основну базу для більшості видів рекреаційної діяльності. Ці ресурси потребують особливої уваги з огляду на необхідність їхнього збереження та сталого використання.

2. *Культурно-історичні ресурси* – архітектурні пам'ятки, об'єкти нематеріальної культурної спадщини (традиції, звичаї, обряди, фестивалі), а також історичні події, що мають туристичну привабливість. Ця група створює умови для розвитку культурного, історичного та пізнавального туризму, формує позитивний імідж регіону й підвищує його конкурентоспроможність на туристичному ринку.

3. *Соціально-економічні ресурси* – інфраструктурні елементи (готелі, заклади харчування, об'єкти дозвілля), рівень сервісу, транспортна доступність та організаційний потенціал. Саме ці ресурси визначають реальну здатність регіону приймати туристів і забезпечувати їм комфортні умови перебування, безпосередньо впливаючи на масштаб і якість розвитку туристичної сфери.

Поряд із традиційною класифікацією в сучасних наукових дослідженнях активно використовуються функціональні підходи (рис. 1), які диференціюють рекреаційно-туристичні ресурси залежно від характеру рекреаційної діяльності, а саме:

– *лікувально-оздоровчі ресурси* (санаторно-курортні комплекси, мінеральні й термальні джерела);

– *спортивні ресурси* (гірськолижні курорти, спортивні арени та майданчики);

Рис. 1. Класифікація рекреаційно-туристичних ресурсів

– *пізнавальні ресурси* (музеї, природні заповідники, пам'ятки природи);

– *розважальні ресурси* (парки атракціонів, тематичні комплекси).

Такий підхід дає змогу більш точно визначати туристичний потенціал регіону в межах окремих видів туризму, формувати цільові програми та стратегії їхнього розвитку.

Отже, системний підхід до класифікації рекреаційно-туристичних ресурсів є невід'ємною складовою суспільно-географічного аналізу. Він забезпечує науково обґрунтовану основу для кількісної та якісної оцінки потенціалу регіону, стратегічного планування туристичного розвитку й управління рекреаційними ресурсами з урахуванням принципів сталого розвитку.

Методологія суспільно-географічної оцінки рекреаційно-туристичного потенціалу (РТП) регіону є багатогранною та включає застосування кількох основних методів, що дають змогу здійснити всебічний аналіз рекреаційно-туристичних ресурсів, їх використання та впливу на соціально-економічний розвиток території (Яворська та ін., 2019; Топчієв та ін., 2023). Основні методи оцінки РТП включають системний, природничий, статистико-аналітичний, картографічний і соціологічний підходи (табл. 1). Кожен із них робить важливий внесок у формування об'єктивної картини потенціалу регіону та надає необхідні інструменти для його комплексного оцінювання.

Таким чином, методологія суспільно-географічної оцінки рекреаційно-туристичного потенціалу регіону є багатовимірною, включає застосування різноманітних підходів, що дають змогу комплексно оцінити потенціал території для розвитку рекреації й туризму. Інтеграція кількісних і якісних даних, а також використання сучасних геоінформаційних технологій забезпечують високий рівень точності й надійності оцінки, що є важливим для ефективного управління рекреаційними ресурсами та стратегічного планування розвитку туризму.

Обговорення

Результати дослідження підтверджують, що системна оцінка рекреаційно-туристичного потенціалу має враховувати не лише наявність ресурсів, а і їхню якість, доступність та екологічний стан.

У процесі розвитку туристичної індустрії важливо враховувати наявні практики, що застосовуються як в Україні, так і в інших країнах світу. Вивчення й оцінка рекреаційно-туристичного потенціалу, зокрема в країнах Європейського Союзу й інших держав, дає змогу зрозуміти, які методи й підходи є ефективними для розвитку цієї галузі, й адаптувати їх до специфіки конкретного регіону.

У країнах Європейського Союзу, зокрема в Іспанії, Франції та Італії, питання оцінки туристичних ресурсів здебільшого розглядається в контексті стандартизації й систематизації. Ці країни активно працюють над розробкою єдиного підходу до оцінки туристичних ресурсів, що включає класифікацію природних і культурних об'єктів і їх відповідність стандартам, визначеним на національному та міжнародному рівнях. Оцінка ресурсів сприяє створенню конкурентоспроможних туристичних продуктів, які відповідають високим вимогам якості.

В Іспанії, наприклад, значну роль відіграє розвиток тематичних маршрутів, які орієнтовані на певні групи туристів, зокрема культурний, гастрономічний, історичний, екологічний туризм. Розвиток таких маршрутів дає змогу поєднати різні типи ресурсів і створити унікальні туристичні пропозиції для різних цільових аудиторій. Іспанія активно використовує модель *кластеризації туризму*, коли на певних територіях зібрані різноманітні види туристичної діяльності, що забезпечує комплексний розвиток регіону.

У Франції та Італії також активно використовуються *кластерні моделі управління туризмом*, де організовано співпрацю між різними туристичними підприємствами, державними установами та місцевими громадами. Такий підхід дає змогу створити більш ефективну інфраструктуру й забезпечити сталий розвиток туризму, враховуючи всі аспекти – від екології до культури й економіки.

Вітчизняний досвід дослідження рекреаційно-туристичного потенціалу в Україні, Польщі та Литві орієнтований на інтеграцію природної та культурної спадщини в процес формування туристичних продуктів. У цих країнах, як і в багатьох інших, важливо поєднати природні ресурси (ліси, озера, гори, узбережжя) з культурно-історичними об'єктами (пам'ятки архітектури, народні традиції, фестивалі). В Україні, наприклад, активно використовуються природні рекреаційні ресурси, такі як Карпати й узбережжя Чорного моря, для розвитку екологічного та культурного туризму.

Таблиця 1

Основні підходи до оцінки рекреаційно-туристичного потенціалу (РТП) регіону

Підхід	**Характеристика підходу**
Системний підхід	Системний підхід є основою для всебічного аналізу рекреаційно-туристичних ресурсів. Він передбачає розгляд РТП як інтегрованої системи, що об'єднує природні, соціально-економічні, культурні та інфраструктурні ресурси території, які взаємодіють між собою, створюючи умови для розвитку рекреаційної й туристичної діяльності. Такий підхід дає змогу оцінити не тільки окремі компоненти потенціалу, а і їх взаємозв'язки та комплексний вплив на розвиток регіону загалом.
Природничий підхід	Природничий підхід зосереджується на аналізі природних характеристик території, таких як кліматичні умови, гідрологічні об'єкти, ландшафтні форми й біологічне різноманіття. Оцінка природничих особливостей є ключовою для визначення природного потенціалу регіону. Урахування природничих компонентів дає змогу не тільки ідентифікувати можливості для розвитку екологічного туризму, а й оцінити їх екологічну стійкість, що є важливим аспектом сталого розвитку.
Статистико-аналітичний метод	Статистико-аналітичний метод передбачає збір, обробку й аналіз статистичних даних щодо рекреаційних ресурсів і туристичних потоків. Важливими показниками є кількість туристів, їхній рівень задоволення, структура туристичних потоків, сезонність відвідувань, а також економічні показники, такі як доходи від туризму та зайнятість у галузі. Використання статистичних методів дає змогу на основі фактичних даних отримати точну картину функціонування рекреаційно-туристичних ресурсів і їхнього внеску в економіку регіону.
Картографічний метод	Картографічний метод є незамінним інструментом у суспільно-географічному аналізі РТП. Він дає змогу здійснити просторовий аналіз території, відобразивши на карті розподіл рекреаційних об'єктів, туристичних маршрутів, інфраструктури й інших важливих факторів. Використання тематичних карт допомагає виявити зональні відмінності в розподілі ресурсів, визначити потенційні проблемні території, а також сприяє оптимальному розміщенню нових туристичних об'єктів і розвитку інфраструктури.
Соціологічний метод	Соціологічний метод дає можливість вивчити соціально-демографічні особливості туристичних потоків, а також оцінити рівень задоволення туристів від відпочинку на території регіону. Соціологічні дослідження можуть включати анкетування, інтерв'ювання, фокус-групи й інші методи, що дозволяють зібрати інформацію про соціальні, культурні та психологічні аспекти туристичної діяльності. Такий підхід важливий для визначення потреб та очікувань туристів, що дає змогу адаптувати туристичні послуги до потреб цільових груп.
Геоінформаційне моделювання	Геоінформаційне моделювання є одним із найбільш потужних інструментів для інтеграції просторових даних і здійснення прогнозних оцінок. Використання геоінформаційних систем (ГІС) дає змогу створювати картографічні моделі, що інтегрують різноманітні характеристики рекреаційно-туристичних ресурсів: природні умови, інфраструктуру, транспортну доступність, а також екологічні параметри. Геоінформаційне моделювання дає можливість здійснювати прогнозування розвитку туристичних потоків, визначати найбільш перспективні зони для інвестицій, а також проводити оцінку екологічної стійкості туристичних територій. Це є необхідним для стратегічного планування розвитку рекреаційно-туристичної діяльності з урахуванням природних обмежень і потреб сталого розвитку.
Поєднання кількісних і якісних показників	Одним із важливих аспектів методології є поєднання кількісних і якісних показників при оцінці рекреаційно-туристичного потенціалу. Кількісні показники, такі як площа рекреаційних територій, кількість туристичних об'єктів, рівень туристичних потоків, дають змогу оцінити масштаби й інтенсивність використання ресурсів. Якісні показники, зокрема оцінка стану навколишнього середовища, рівень задоволення туристів, екологічна стійкість територій, дають змогу отримати глибше розуміння реальних можливостей та обмежень для розвитку туризму в регіоні.

Одним із важливих аспектів є збереження культурної спадщини та її інтеграція в сучасну туристичну інфраструктуру. В Україні останніми роками значна увага приділяється розвитку сільського та екотуризму, де традиції та культура місцевих громад є основою для створення унікальних туристичних продуктів. Польща й Литва, зокрема, акцентують увагу на використанні малої архітектури та народних ремесел для створення автентичних туристичних продуктів.

Для Одеського регіону, який має значний рекреаційно-туристичний потенціал завдяки приморському положенню вздовж Чорного моря, важливим є досвід приморських територій Чорноморського та Середземноморського басейнів. У цих регіонах розвиток туризму став можливим завдяки поєднанню пляжного, культурного та гастрономічного туризму, що дає змогу приваблювати туристів різних категорій.

У Середземномор'ї, зокрема в Італії, Греції й Туреччині, пляжний відпочинок комбінується з вивченням історії та культури цих країн, що дає можливість залучити туристів, які цікавляться не лише відпочинком на пляжі, а й пізнанням місцевих традицій, історії та архітектури. Успіх таких територій у розвитку гастрономічного туризму також значною мірою сприяє популяризації регіональних страв, виноробства та місцевих продуктів, що є важливим елементом створення туристичного продукту.

У контексті Одеського регіону, поєднання культурної спадщини (міста з багатою історією, архітектурні пам'ятки), пляжного туризму (регіональні курорти) і гастрономічних традицій (виноробство, традиційні страви) може стати основою для підвищення туристичної привабливості. Досвід приморських регіонів Чорноморського та Середземноморського басейнів має велике значення для Одеської області як приклад інтеграції різних видів туризму для забезпечення конкурентоспроможності.

Досвід зарубіжних країн ЄС та приморських територій Чорноморського та Середземноморського басейнів є важливим для подальшого розвитку рекреаційно-туристичного потенціалу Одеського регіону. Інтеграція природної та культурної спадщини, а також упровадження кластерних моделей управління, тематичних маршрутів і розвиток гастрономічного туризму можуть стати основними напрямками для підвищення конкурентоспроможності Одеського регіону на міжнародному туристичному ринку.

Висновки

Рекреаційний і туристичний потенціал є комплексними категоріями, що включають інтеграцію природних, культурно-історичних і соціально-економічних чинників. Для ефективного управління й розвитку туризму важливо враховувати всі ці фактори, оскільки вони взаємопов'язані й впливають один на одного, формуючи конкурентоспроможний туристичний продукт. Класифікація рекреаційно-туристичних ресурсів дає змогу виокремити основні функціональні типи діяльності, такі як пляжний, екологічний, культурний чи гастрономічний туризм, що дає змогу чітко визначити пріоритети розвитку кожного регіону. Такий підхід дає змогу науково обґрунтовано розподіляти ресурси для їх ефективного використання, що є необхідним для сталого розвитку туристичної сфери.

Методологія суспільно-географічного аналізу рекреаційно-туристичного потенціалу має ґрунтуватися на системному підході, який дає можливість комплексно досліджувати різні компоненти території та їх взаємодію. Окрім традиційних методів, таких як польові дослідження та статистичні методи, важливо використовувати сучасні інструменти, зокрема геоінформаційні системи (ГІС), що забезпечують точний просторовий аналіз і можливість прогнозування туристичних потоків, оцінки екологічної стійкості та ефективності використання ресурсів.

Досвід зарубіжних країн і вітчизняних регіонів свідчить про ефективність інтегрованих стратегій управління рекреаційно-туристичним потенціалом. Зарубіжні країни ЄС і приморські регіони демонструють ефективні приклади розвитку туристичних кластерів та інтеграції різних видів туризму, що дає змогу створювати цілісні стратегії розвитку, зберігаючи баланс між екологією, культурною спадщиною та інфраструктурним розвитком. Для України, зокрема для Одеського регіону, такі стратегії є важливими для підвищення конкурентоспроможності на міжнародному туристичному ринку та забезпечення сталого розвитку, оскільки вони дають змогу комплексно підходити до розвитку туристичної інфраструктури й збереження унікальних природних і культурних ресурсів.

Список використаної літератури

Безуглий В.В., Костащук І.І., Яворська В.В. Географія всесвітньої спадщини (туристичні атракції). Дніпро : ЛІРА, 2021. 528 с.

Бейдик О.О. Рекреаційні ресурси України. Київ : Альтерпрес, 2011. 462 с.

Бейдик О.О. Рекреаційно-туристські ресурси України: Методологія та методика аналізу, термінологія, районування : монографія. Київ : Київський ун-тет, 2001. 395 с.

Бейдик О.О. Стандартизація та оцінка ресурсно-рекреаційного потенціалу України та глобальні процеси: географічний вимір. *Збірник наук. праць :* у 3 т. Луцьк : Ред.-вид. від. «Вежа» Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки. 2000. Т. 1. С. 351–354.

Герасименко В.Г. Оцінка туристично-рекреаційного потенціалу регіону : монографія / за заг. ред. В.Г. Герасименко. Одеса : ОНЕУ, 2016. 262 с.

Горин Г.В. Систематизація методологічних підходів до визначення сутності поняття «рекреаційно-туристичний потенціал регіону». *Регіональна економіка.* 2014. № 2. С. 187–199.

Любіцева О.О. Ринок туристичних послуг (геопросторові аспекти). Київ : Альтерпрес, 2005. 436 с. [Електронний ресурс]. URL: https://tourlib.net/books_ukr/lubiceva_rtp.htm (дата звернення: 28.07.2025).

Оленич І. Використання ГІС-технологій для вивчення сучасних геоморфологічних процесів у національних парках (на прикладі Карпатського національного природного парку). *Вісник Львів. ун-ту. Серія «Географічна».* Львів, 2001. Вип. 28. С. 207–209.

Поколодна М.М. Проблеми визначення складових рекреаційних ресурсів та їх класифікації в рекреаційній географії. *Сучасні проблеми науки та освіти* : матеріали 3-ї міжн. міждисцип. наук.-практ. конф., м. Ужгород, 1–9 травня 2002 р. Харків, 2002. С. 20.

Руденко В.П. Довідник з географії природно-рекреаційного потенціалу України. Київ : Вища школа, 1993. 182 с.

Руденко В.П. Географія природно-ресурсного потенціалу України. Львів : Каменяр, 1993. 362 с.

Симочко Г.В. Поняттєво-термінологічний апарат та підходи до класифікації туристично-рекреаційних ресурсів. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка: Серія «Географія».* Тернопіль : СМП «Тайп», 2012. № 2. Вип. 32. С. 78–83.

Топчієв О.Г., Яворська В.В., Сич В.А., Коломієць К.В. Рекреаційно-туристичний потенціал: напрями систематики і кваліметричної оцінки : навчальний посібник. Одеса : Бондаренко М.О., 2022. 280 с.

Топчієв О.Г., Коломієць К.В., Сич В.А., Яворська В.В. Геопросторова цілісність земної оболонки: методологія дослідження : навчальний посібник. Одеса : ОНУ імені І.І. Мечникова, 2023. 304 с.

Топчієв О.Г., Коломієць К.В., Сич В.А., Яворська В.В. Структурування рекреаційно-туристичного потенціалу на засадах географічного середовища : монографія. Кам'янець-Подільський : Видавець Панькова А.С., 2020. 332 с.

Яворська В.В., Топчієв О.Г., Мальчикова Д.С., Пилипенко І.О. Методологічні засади географії : підручник. Одеса : ОНУ імені І.І. Мечникова, 2019. 352 с.

Buryslawski Z., Zyszkowski E. Wykorzystanie GIS do analizy danych klimatycznych w Karkonoskim Parku Narodowym. *GIS dla obszarov chronionych* : materialy konf. Krakow, 1995. P. 7–20.

Hall C.M. Tourism Planning: Policies, Processes and Relationships. Harlow : Prentice Hall, 2000.

Smith M., Robinson M. Cultural Tourism in a Changing World: Politics, Participation and (Re)presentation. Bristol, Blue Ridge Summit : Channel View Publications, 2006. https://doi.org/10.21832/9781845410452.

Yavorska V.V., Hevko I.V., Sych V.A., Potapchuk O.I., Kolomiyets K.V. Features of application of information technologies in modern tourism. *Journal of Geology, Geography and Geoecology.* 2019. Vol. 28. № 3. P. 591–599. https://doi.org/10.15421/111956.

References

Bezuhlyi, V.V., Kostashchuk, I.I., & Yavorska, V.V. (2021). Heohrafiia vsesvitnoi spadshchyny (turystychni atraktsii) [Geography of World Heritage (tourist attractions)]. Dnipro: LIRA [in Ukrainian].

Beidyk, O.O. (2011). Rekreatsiini resursy Ukrainy [Recreational resources of Ukraine]. Kyiv: Alterpress [in Ukrainian].

Beidyk, O.O. (2001). Rekreatsiino-turystski resursy Ukrainy: Metodolohiia ta metodyka analizu, terminolohiia, raionuvannia: monohrafiia [Recreational and tourism resources of Ukraine: methodology and methods of analysis, terminology, zoning: monograph]. K.: Kyiv university [in Ukrainian].

Beidyk, O.O. (2000). Standartyzatsiia ta otsinka resursno-rekreatsiinoho potentsialu Ukrainy ta hlobalni protsesy: heohrafichnyi vymir [Standardization and assessment of the resource-recreational potential of Ukraine and global processes: a geographical dimension]. *Zb. nauk. prats v 3-kh t. [Collection of scientific papers]* (Vol. 1, pp. 351–354). Lutsk: Editorial and Publishing Department "Vezha," Lesya Ukrainka Volyn State University [in Ukrainian].

Herasymenko, V.H. (ed.) (2016). Otsinka turystychno-rekreatsiinoho potentsialu rehionu: monohrafiia [Assessment of the tourist and recreational potential of a region: monograph]. Odesa: Odesa National Economic University [in Ukrainian].

Horyn, H.V. (2014). Systematyzatsiia metodolohichnykh pidkhodiv do vyznachennia sutnosti poniattia «rekreatsiino-turystychnyi potentsial rehionu» [Systematization of methodological approaches to defining the essence of the concept "recreational and tourist potential of a region"]. *Rehionalna ekonomika [Regional Economy]*, 2, 187–199 [in Ukrainian].

Liubitseva, O.O. (2005). Rynok turystychnykh posluh (heoprostorovi aspekty) [Tourism services market (geospatial aspects)]. Kyiv: Alterpress. [Electronic resource] URL: https://tourlib.net/books_ukr/lubiceva_rtp.htm (access date 28.07.2025) [in Ukrainian].

Olenych, I. (2001). Vykorystannia HIS-tekhnolohii dlia vyvchennia suchasnykh heomorfolohichnykh protsesiv u natsionalnykh parkakh (na prykladi Karpatskoho natsionalnoho pryrodnoho parku) [The use of GIS technologies for the study of modern geomorphological processes in national parks (on the example of the Carpathian National Nature Park)]. *Visnyk Lviv. un-tu. Seriia heohrafichna [Visnyk of Lviv University. Geographical Series]*, 28, 207–209 [in Ukrainian].

Pokolodna, M.M. (2002). Problemy vyznachennia skladovykh rekreatsiinykh resursiv ta yikh klasyfikatsii v rekreatsiinii heohrafii. [Problems of defining the components of recreational resources and their classification in recreational geography]. *Suchasni problemy nauky ta osvity [Modern problems of science and education]:* materialy 3-yi mizhn. mizhdystsyp. nauk.-prakt. konf., m. Uzhhorod, 1–9 travnia 2002 r. Kharkiv, 20 [in Ukrainian].

Rudenko, V.P. (1993a). Dovidnyk z heohrafii pryrodno-rekreatsiinoho potentsialu Ukrainy [Handbook on the geography of the natural-recreational potential of Ukraine]. Kyiv: Vyshcha Shkola [in Ukrainian].

Rudenko, V.P. (1993b). Heohrafiia pryrodno-resursnoho potentsialu Ukrainy [Geography of the natural-resource potential of Ukraine]. Lviv: Kameniar [in Ukrainian].

Symochko, H.V. (2012). Poniattievo-terminolohichnyi aparat ta pidkhody do klasyfikatsii turystychno-rekreatsiinykh resursiv [Conceptual and terminological framework and approaches to the classification of tourist and recreational resources]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka: Seriia: Heohrafiia [Scientific Notes of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University: Series Geography]*, 2(32), 78–83 [in Ukrainian].

Topchiiev, O.H., Yavorska, V.V., Sych, V.A., & Kolomiiets, K.V. (2022). Rekreatsiino-turystychnyi potentsial: napriamy systematyky i kvalimetrychnoi otsinky: navchalnyi posibnyk [Recreational and tourism potential: directions of systematization and qualimetric assessment: study guide]. Odesa: Bondarenko M.O. [in Ukrainian].

Topchiiev, O.H., Kolomiiets, K.V., Sych, V.A., & Yavorska, V.V. (2023). Heoprostorova tsilisnist zemnoi obolonky: metodolohiia doslidzhennia: navchalnyi posibnyk [Geospatial integrity of the Earth's shell: research methodology: study guide]. Odesa: Odesa I.I. Mechnikov National University [in Ukrainian].

Topchiiev, O.H., Kolomiiets, K.V., Sych, V.A., & Yavorska, V.V. (2020). Strukturuvannia rekreatsiino-turystychnoho potentsialu na zasadakh heohrafichnoho seredovyshcha: monohrafiia [Structuring of recreational and tourism potential on the basis of the geographical environment: monograph]. Kamianets-Podilskyi: Publisher Pankova A.S. [in Ukrainian].

Yavorska, V.V., Topchiiev, O.H., Malchykova, D.S., & Pylypenko, I.O. (2019). Metodolohichni zasady heohrafii: pidruchnyk [Methodological foundations of geography: textbook]. Odesa: Odesa I.I. Mechnikov National University [in Ukrainian].

Buryslawski, Z., & Zyszkowski, E. (1995). Wykorzystanie GIS do analizy danych klimatycznych w Karkonoskim Parku Narodowym. *GIS dla obszarov chronionych:* materialy konf., Krakow, 7–20 [in Polish].

Hall, C.M. (2000). Tourism Planning: Policies, Processes and Relationships. Harlow: Prentice Hall [in English].

Smith, M., & Robinson, M. (2006). Cultural Tourism in a Changing World: Politics, Participation and (Re)presentation. Bristol, Blue Ridge Summit: Channel View Publications. https://doi.org/10.21832/9781845410452 [in English].

Yavorska, V.V., Hevko, I.V., Sych, V.A., Potapchuk, O.I., & Kolomiyets, K.V. (2019). Features of application of information technologies in modern tourism. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(3), 591–599. https://doi.org/10.15421/111956 [in English].

Отримано: 06.10.2025
Прийнято: 14.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 911.3:338.48 (477)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.11

ПРОСТОРОВА ОРГАНІЗАЦІЯ МЕДИЧНОГО ТУРИЗМУ В УКРАЇНІ, СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ

О. О. Ляшкова[1], В. І. Тригуб[2]

У структурі світового туризму медичний туризм відіграє важливу роль, поєднує лікувальні, рекреаційні, соціальні й економічні функції. В Україні медичний туризм розглядається як один із перспективних напрямів туристичної діяльності та водночас як важливий механізм модернізації медичної інфраструктури, особливо в регіонах із розвиненим рекреаційним потенціалом. Метою дослідження є комплексне обґрунтування просторових закономірностей і тенденцій розвитку медичного туризму в Україні в умовах його адаптації до європейського туристичного ринку. У процесі підготовки статті використовувались описовий, аналітичний, порівняльно-географічний та системний методи, що забезпечили комплексне вивчення просторової організації медичного туризму. Джерельну базу становили наукові публікації, офіційна статистика, аналітичні звіти Міністерства охорони здоров'я України, Держстату, UNWTO, OECD. У статті розглянуто просторові особливості формування та розвитку медичного туризму в Україні в умовах соціально-економічних трансформацій і післявоєнного відновлення. Визначено місце медичного туризму у структурі національного туристичного ринку, його вплив на розвиток регіональних економік і систему охорони здоров'я. Проаналізовано сучасний стан галузі на основі статистичних даних Державної служби статистики України, Міністерства охорони здоров'я, Світової організації туризму (UNWTO) і Організації економічного співробітництва і розвитку (OECD). Виявлено основні тенденції територіального розміщення концентрації медико-туристичних послуг у великих містах і курортних зонах, зокрема в Києві, Львові, Одесі, Трускавці та Хмільнику. Обґрунтовано ключові чинники, що визначають конкурентоспроможність України на міжнародному ринку медичного туризму, серед яких такі: наявність кваліфікованого медичного персоналу, відносно низька вартість послуг, використання природно-лікувальних ресурсів та розвиток санаторно-курортної бази. Визначено напрями оптимізації просторової організації медичного туризму з урахуванням європейських тенденцій, потреб інклюзії та цифровізації галузі. Досліджено логістичні, сервісні, інституційні та соціально-економічні чинники, які визначають ефективність просторової організації медичного туризму. Запропоновано напрями її оптимізації з урахуванням європейських тенденцій, інклюзивності, цифровізації та потреб післявоєнного відновлення. Окреслено пер-

[1] аспірантка кафедри економічної та соціальної географії і туризму
(Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса)
e-mail: lyashkova.9641@gmail.com
ORCID: 0009-0006-8521-6688
[2] кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри географії України, ґрунтознавства і земельного кадастру
(Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса)
e-mail: v.tryhub@onu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4436-2017

спективи формування регіональних кластерів медичного туризму як інструменту інтеграції туризму, охорони здоров'я та соціальної реабілітації.
Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що сформовані в дослідженні підходи до аналізу просторової організації медичного туризму можуть бути використані у процесі стратегічного планування, розроблення регіональних програм відновлення медичної та рекреаційної інфраструктури, формування кластерів медико-туристичних послуг, а також під час залучення інвестицій у галузь у повоєнний період.

Ключові слова: *медичний туризм, суспільно географічний аспект, регіональний розвиток, територіальна організація, рекреаційно-оздоровчий потенціал, послуги, конкурентоспроможність.*

SPATIAL ORGANIZATION OF MEDICAL TOURISM IN UKRAINE, CURRENT STATE AND TRENDS

O. O. Liashkova, V. I. Trigub

In the structure of global tourism, medical tourism plays a significant role by combining therapeutic, recreational, social, and economic functions. In Ukraine, it is considered one of the most promising areas of tourism development and, at the same time, an important tool for modernizing the medical infrastructure, particularly in regions with well-developed recreational potential. The aim of this study is to provide a comprehensive justification of the spatial patterns and development trends of medical tourism in Ukraine in the context of its adaptation to the European tourism market.
Descriptive, analytical, comparative-geographical, and systems approaches were applied in the course of this study, ensuring a comprehensive examination of the spatial organization of medical tourism. The research was based on academic publications, official statistical data, and analytical reports from the Ministry of Health of Ukraine, the State Statistics Service of Ukraine, the World Tourism Organization (UNWTO), and the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
The article examines the spatial features of the formation and development of medical tourism in Ukraine amid socio-economic transformations and post-war recovery. It defines the place of medical tourism within the national tourism market and its impact on regional economies and the healthcare system. The current state of the sector is analyzed using statistical data from the State Statistics Service of Ukraine, the Ministry of Health, the World Tourism Organization (UNWTO), and the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). The study identifies key trends in the territorial concentration of medical-tourism services in major cities and resort areas, particularly Kyiv, Lviv, Odesa, Truskavets, and Khmilnyk. It substantiates the main factors determining Ukraine's competitiveness in the international medical tourism market, including the availability of qualified medical personnel, relatively low service costs, the use of natural therapeutic resources, and the development of the sanatorium-resort base. Directions for optimizing the spatial organization of medical tourism are outlined with regard to European trends, inclusion needs, and the digitalization of the sector.
The practical significance of the obtained results lies in the fact that the approaches to analyzing the spatial organization of medical tourism developed in this study can be applied in strategic planning, the development of regional programs for restoring medical and recreational infrastructure, the formation of medical tourism service clusters, as well as in attracting investments into the sector during the post-war recovery period.

Key words: *medical tourism, socio-geographical aspect, regional development, territorial organization, recreational and health-improvement potential, services, competitiveness.*

Вступ

Медичний туризм посідає вагоме місце в системі глобальної туристичної індустрії, поєднує функції охорони здоров'я, рекреації, соціальної мобільності й економічного розвитку. Його значення зростає в умовах інтернаціоналізації медичних послуг, розвитку транспортної доступності та підвищення ролі цифрових технологій у сфері охорони здоров'я. Для України медичний туризм має подвійне значення: це, з одного боку, перспективний напрям диверсифікації туристичної діяльності, з іншого – чинник збереження і модернізації медичної інфраструктури, особливо в регіонах з високим рекреаційним потенціалом.

Після 2020 р. ринок медичних послуг в Україні зазнав істотних змін під впливом пандемії COVID-19, воєнних дій і загальної кризи сфери охорони здоров'я. Водночас ці виклики сприяли появі нових форм і моделей медико-туристичної діяльності, орієн-

тованих на внутрішнього споживача, реабілітацію військовослужбовців, розвиток телемедицини та реабілітаційних програм. Просторова організація медичного туризму в цих умовах набуває нових рис, оскільки формується мережа спеціалізованих медичних і реабілітаційно-оздоровчих центрів, санаторно-курортних установ, які стають ядрами територіальної інтеграції туризму й медицини.

Сучасний стан розвитку медичного туризму в Україні характеризується концентрацією закладів у великих містах (Київ, Львів, Одеса, Дніпро, Харків) та у традиційних рекреаційно-курортних регіонах (Трускавець, Моршин, Хмільник, Миргород). Спостерігається значна просторово-структурна асиметрія між центральними та периферійними районами, а також між приватним і державним секторами. Занизький рівень інституційно-нормативного забезпечення, обмежена міжнародна комунікація у сфері просування медико-туристичних послуг і відсутність систематизованої статистичної звітності залишаються стримувальними чинниками розвитку галузі.

Необхідність наукового дослідження просторової організації медичного туризму зумовлена потребою комплексного осмислення територіальних особливостей розміщення, взаємозв'язків і потенціалу розвитку медико-туристичних систем у контексті національної політики сталого відновлення та інтеграції в європейському туристичному просторі.

Метою дослідження є наукове обґрунтування просторових закономірностей формування та розвитку медичного туризму в Україні, визначення його структурно-територіальних особливостей, сучасних тенденцій і чинників трансформації в контексті інтеграції в європейському туристичному просторі. Об'єктом дослідження виступають процеси організації та функціонування медичного туризму в Україні як складника національної туристично-рекреаційної системи. Предметом дослідження є просторові особливості, чинники та закономірності розвитку медичного туризму в Україні, механізми формування і вдосконалення його регіональної структури.

Завдання дослідження:

1. Розкрити теоретико-методологічні засади дослідження медичного туризму як суспільно-географічного явища.

2. Проаналізувати сучасний стан розвитку медико-туристичних послуг в Україні.

3. Визначити ключові чинники, що впливають на формування і розвиток медичного туризму в регіонах.

4. Оцінити тенденції та регіональні відмінності у просторовій організації медико-туристичної діяльності.

5. Запропонувати напрями вдосконалення просторової організації медичного туризму в умовах післявоєнного відновлення України.

Матеріал і методи

У процесі підготовки статті застосовано комплекс наукових методів, що забезпечив цілісне та всебічне вивчення просторової організації медичного туризму в Україні. Теоретичну основу дослідження становлять праці вітчизняних і зарубіжних учених, у яких висвітлено питання проблематики туризму, охорони здоров'я, соціально-економічного районування та просторових трансформацій. У дослідженні застосовувався міждисциплінарний підхід, який забезпечив інтеграцію принципів економічної, соціальної, медичної та рекреаційної географії в цілісну систему наукового аналізу. Медичний туризм розглядається як система, у межах якої відбуваються процеси формування просторової структури, взаємодії суб'єктів ринку послуг і регіональної диференціації.

У процесі дослідження здійснено аналіз і синтез наукових джерел, що дало змогу систематизувати основні підходи до визначення сутності медичного туризму, окреслити його місце у структурі національної економіки та визначити ключові напрями територіального розвитку. Застосування критичного аналізу забезпечило інтеграцію теоретичних концепцій у єдину систему наукових положень, на основі якої сформовано узагальнене бачення досліджуваного явища. Порівняльно-географічний підхід дав можливість виявити закономірності та відмінності в розвитку медичного туризму в Україні та країнах Європейського Союзу, Центральної та Східної Європи.

Системний аналіз дав змогу розглядати медичний туризм як багатокомпонентну соціально-економічну систему, у якій взаємодіють медичні, рекреаційні, інфраструктурні та сервісні елементи. Статистичний метод застосовано для оцінювання динаміки основних показників діяльності у сфері медико-туристичних послуг у 2020–2024 рр. Графічний метод використано для узагальнення кількісних даних у формі діаграм і структурних схем, що дало змогу відобра-

зити регіональні відмінності та тенденції розвитку. Аналітичний підхід забезпечив інтеграцію фактичних даних і теоретичних узагальнень, що дало змогу виявити основні закономірності розвитку медичного туризму та визначити перспективні напрями вдосконалення галузі.

Інформаційну основу дослідження становлять офіційні дані Державної служби статистики України, Міністерства охорони здоров'я України, Національної служби здоров'я України, а також аналітичні звіти Всесвітньої організації туризму, Світової організації охорони здоров'я і Організації економічного співробітництва та розвитку. Додатково використано матеріали наукових монографій, фахових статей і регіональних програм розвитку туризму й охорони здоров'я. Сукупність зазначених методів і джерел дала можливість отримати об'єктивну картину сучасного стану медичного туризму в Україні та визначити головні тенденції його просторового розвитку.

Результати

Медичний туризм є складною багатокомпонентною категорією, що інтегрує медичні, рекреаційні, соціально-економічні, інфраструктурні й інформаційно-організаційні ресурси території, які забезпечують можливості для надання лікувальних, оздоровчих і реабілітаційних послуг у поєднанні з відпочинком та іншими видами туристичної діяльності. Питанню розвитку медичного туризму належить помітне місце в сучасних наукових дослідженнях в Україні та за кордоном. У працях М. Мальської, О. Бордун, А. Молодецького, В. Острої, В. Яворської, О. Ляшкової розглянуто теоретичні засади й практичні механізми формування, становлення і розвитку медичного туризму в Україні (Мальська і Бордун, 2018; Молодецький і Остра, 2020; Яворська і Ляшкова, 2025). Автори наголошують на необхідності поєднання медичного, рекреаційного й економічного підходів для підвищення конкурентоспроможності галузі. Є. Гнедик зосередив увагу на правових аспектах організації медичного туризму, визначив його як вид господарської діяльності, що передбачає інтеграцію туристичних і медичних послуг у межах спеціально регламентованих процедур (Гнедик, 2017; Гнедик, 2019).

Міжнародний досвід дослідження медичного туризму представлений у працях М. Букман, Х. Лі, В. Куй, Е. Гапонової, С. Галасюк та інших авторів, які аналізують динаміку глобального ринку медичних послуг і роль просторової спеціалізації у формуванні міжнародних потоків пацієнтів (Bookman & Bookman, 2007; Li & Cui, 2014; Гапонова, 2016; Галасюк, 2023). Зокрема, М. Букман акцентує увагу на географічних аспектах медичних подорожей і просторовій концентрації клінічних центрів у країнах із розвиненою медичною інфраструктурою (Bookman & Bookman, 2007). Українські науковці С. Галасюк, К. Галасюк, А. Молодецький, В. Остра досліджують особливості функціонування санаторно-курортного комплексу України, розглядають його як структурний елемент медико-туристичного потенціалу держави та чинник формування її конкурентних переваг у сфері оздоровчого туризму (Галасюк і Галасюк, 2013; Молодецький і Остра, 2020).

У сучасних наукових дослідженнях спостерігається багатовекторність підходів до визначення сутності медичного туризму, що зумовлено відмінностями у теоретичних концепціях і галузевих підходах до його вивчення. Частина авторів ототожнює його з лікувальним або оздоровчим туризмом, однак Є. Гнедик уважає таке спрощення некоректним (Гнедик, 2019). На його думку, лікувальна діяльність є складником медичної, тому вживання вузьких термінів створює плутанину у визначеннях. Науковець пропонує трактувати медичний туризм як комплексну діяльність, що включає організацію туристичного продукту з обов'язковим компонентом медичних або лікувально-оздоровчих послуг, які надаються закладами охорони здоров'я, що мають відповідний правовий статус і ліцензію на медичну практику.

У зарубіжній літературі поняття медичного туризму часто розглядається у зв'язку з терміном «клінічний туризм», який передбачає виїзд за межі країни проживання для отримання спеціалізованої медичної допомоги поза системою державного страхування. Американські дослідники визначають медичний туризм як організовану подорож для відновлення або поліпшення здоров'я шляхом медичного втручання, що відрізняє його від оздоровчого туризму, пов'язаного з відпочинком без лікувальних процедур (Lunt et al., 2011). Така диференціація є важливою для чіткого розмежування функцій ринку туристичних і медичних послуг.

У сучасних українських наукових дослідженнях медичний туризм тривалий час

розглядався крізь призму курортно-оздоровчої діяльності. Проте сучасні дослідження дедалі частіше підкреслюють його самостійний статус у системі туристичного господарства. М. Мальська, О. Бордун, В. Баєв, А. Парфіненко й інші аналізують просторову організацію медичного туризму, визначають чинники його розвитку й регіональні відмінності (Баєв, 2015; Парфіненко та ін., 2018; Мальська і Бордун, 2019). Автори наголошують, що Україна має значний потенціал для формування конкурентоспроможного ринку медико-туристичних послуг завдяки поєднанню високого рівня професійної підготовки медичних кадрів, наявності сучасного обладнання та унікальних природно-лікувальних ресурсів.

Узагальнення наукових підходів дозволяє зробити висновок, що медичний туризм є складним багатокомпонентним соціально-економічним явищем. Його розвиток зумовлений взаємодією факторів медичної інфраструктури, рівня сервісу, транспортної доступності та міжнародної привабливості території. У вітчизняних умовах формування цього сегмента пов'язане з необхідністю оновлення законодавчої бази, підвищення якості медичних послуг, удосконалення механізмів міжгалузевої координації та активного просування українських медичних закладів на світовому ринку.

Узагальнюючи наведені підходи, далі пропонуємо власне визначення медичного туризму. Медичний туризм – це організована подорож у межах країни або за її межі для отримання планових медичних послуг у ліцензованих закладах охорони здоров'я. Вона може передбачати діагностику, лікування чи реабілітацію та поєднується з туристичними сервісами. Розрізняють в'їзний, виїзний та внутрішній види медико-туристичної діяльності. Він відрізняється від оздоровчого (wellness) туризму, який спрямований лише на профілактику й відпочинок без медичного втручання. Надалі термін «медичний туризм» уживається саме в цьому значенні.

Просторова організація медичного туризму в Україні визначається сукупністю чинників, які формують умови, масштаби та напрями розвитку цієї сфери. На підставі узагальнення офіційних даних Міністерства охорони здоров'я України, Державного агентства розвитку туризму, Держстату, аналітики профільних асоціацій (Українська …, 2020; European …, 2022; Державне …, 2023; Державна …, 2023; МОЗ …, 2024) можна виокремити інтегровану систему чинників, що поєднує медичні, економічні, рекреаційні, інфраструктурні та соціально-політичні компоненти (табл. 1). Саме їх взаємодія забезпечує формування територіальних кластерів медико-туристичної активності та пояснює регіональні контрасти між високорозвиненими й периферійними зонами.

Серед усіх груп чинників провідну роль відіграє медична інфраструктура, яка визначає просторові осередки концентрації лікувально-реабілітаційних послуг. За офіційними даними Міністерства охорони здоров'я (далі – МОЗ) України, у 2023 р. функціонувало понад 2 200 приватних закладів охорони здоров'я, з яких приблизно 40 відсотків зосереджено в Києві, Львові, Одесі та Дніпрі. Ці міста формують стійкі центри медико-туристичного тяжіння, у яких створено розвинену мережу клінік репродуктивної, офтальмологічної, стоматологічної та пластичної медицини. У результаті формується просторово впорядкована система міжрегіональних потоків пацієнтів, яка поступово набуває ознак кластерної організації медико-туристичного простору.

Курортно-рекреаційні ресурси виступають другим системоутворювальним компонентом просторової структури медико-туристичної діяльності. Природні лікувальні ресурси забезпечують функціонування понад 270 санаторно-курортних установ, зосереджених переважно в Карпатському макрорегіоні (Трускавець, Моршин, Свалява, Хмільник) та Причорномор'ї (Куяльник, Сергіївка, Затока). Саме ці території мають найвищий потенціал для розвитку реабілітаційного та профілактичного туризму, що набуває особливого значення в умовах післявоєнної відбудови. Унікальні природно-оздоровчі ресурси формують просторові напрямки медико-туристичної мобільності населення.

Вагомим просторовим регулятором виступає логістична доступність. Концентрація міжнародних аеропортів у Києві, Львові й Одесі забезпечує інтернаціональний характер потоків пацієнтів, тоді як розгалуженість автомобільної та залізничної мережі формує міжрегіональні зв'язки всередині країни. Території, що мають дефіцит транспортної доступності або перебувають у зоні підвищеного ризику, фактично виключаються із системи медичного туризму. Отже, логістичний чинник виконує роль просто-

Таблиця 1

Система чинників розвитку медичного туризму в Україні

Група чинників	**Конкретні елементи**	**Вплив на просторову організацію**
Медична інфраструктура	Наявність спеціалізованих клінік, реабілітаційних центрів, лабораторій.	Наявність сучасних клінік і центрів реабілітації визначає центри тяжіння пацієнтів та сприяє формуванню міжрегіональної системи медичного туризму.
Курортно-рекреаційні ресурси	Мінеральні та термальні води, лікувальні грязі, сприятливі кліматичні умови, оздоровчі комплекси.	Визначають локалізацію реабілітаційного та профілактичного туризму.
Логістична доступність	Аеропорти, залізничні вузли, автомобільні шляхи, трансферні сервіси.	Висока транспортна забезпеченість розширює ринок і полегшує мобільність пацієнтів.
Сервісно-інфраструктурне забезпечення туристичної діяльності	Готелі, санаторії, послуги перекладачів, сервіс супроводу, маркетингові агентства.	Підвищує рівень комфортності й конкурентоспроможності територій.
Ціноутворення та конкурентність	Співвідношення вартості лікування з міжнародними аналогами.	Визначає привабливість України на світовому ринку медичних послуг.
Інформаційно-маркетинговий фактор	Цифрові платформи, агентства медичного туризму, онлайн-маркетинг.	Сприяє підвищенню інформаційної впізнаваності й інтеграції пацієнтів у міжнародному медико-туристичному просторі.
Регуляторно-правове середовище	Законодавча база, стандарти, ліцензування, система моніторингу якості.	Формує рівень довіри, безпеки та правової стабільності галузі.
Соціально-економічні фактори	Доходи населення, демографічна структура, безпека, міграційна ситуація.	Визначають внутрішній попит і ризики для функціонування ринку.
Післявоєнне відновлення	Реконструкція медичних об'єктів, фінансування, інвестиції, відновлення інфраструктури.	Відкриває можливості для створення нових регіональних кластерів у постконфліктному просторі.

Узагальнено автором за даними МОЗ України, 2024 р.; ДАРТ, 2023 р.; Держстату, 2023 р.; УАМТ, 2020 р.; ЕМА, 2022 р.

рового фільтра, посилює поляризацію між центрами та периферією.

Розвиток сервісно-інфраструктурного забезпечення туристичної діяльності визначає якість медико-туристичного продукту. За даними UkraineInvest, лише приблизно 60% лікувально-оздоровчих локацій мають повний набір супровідних сервісів – від готельного розміщення до транспортного забезпечення та інформаційного супроводу іноземних клієнтів (UkraineInvest, 2023). Найбільш інфраструктурно розвинені регіони – Київ, Львівська й Одеська області, які показують пряму залежність між рівнем сервісу й інтенсивністю туристичних потоків, що підтверджує ключову роль цього чинника в конкурентоспроможності територій.

Ціноутворювальний чинник залишається стратегічною перевагою України на міжнародному ринку. За оцінками Міжнародної асоціації медичного туризму, середня вартість операцій і стоматологічних процедур у вітчизняних клініках на 40–70 відсотків нижча, ніж у країнах Західної Європи. Це зумовлює активний попит з боку пацієнтів із Польщі, Німеччини, Туреччини й Ізраїлю, а також сприяє розвитку в'їзного сегмента. Водночас цінова привабливість потребує супроводу високих стандартів якості та міжнародної сертифікації, без яких регіональна привабливість не може бути стабільною.

Інформаційно-маркетинговий чинник формує цифровий контур просторової організації. Наявність національних плат-

форм і міжнародних посередників, як-от Bookimed та MedTour Ukraine, створює цифрові вікна доступу до українських клінік. Найвищу видимість у глобальному інформаційному просторі мають Київ, Львів і Одеса, де функціонує більшість акредитованих медичних закладів і туристичних агентств. Регіони, що не представлені в онлайн-середовищі, залишаються маловідомими на зовнішньому ринку, що поглиблює просторову асиметрію інформаційних потоків.

Регуляторно-правове середовище є інституційною основою формування галузі. Україна поступово адаптує законодавство до європейських стандартів, однак досі не має єдиного державного реєстру медико-туристичних операторів і акредитованих клінік. Відсутність єдиних протоколів медичного туризму та системи контролю якості обмежує участь частини регіонів у міжнародних програмах співпраці. Найбільш активними в цьому напрямі залишаються Київська, Львівська й Одеська області, де наявна взаємодія бізнесу й місцевої влади у сфері сертифікації медичних послуг.

Соціально-економічні чинники мають суттєвий вплив на структуру попиту. За даними Держстату, середньомісячна заробітна плата у 2023 р. становила 15,3 тис. грн, що обмежує доступність дорогих медичних послуг для більшості населення (Державна …; Статистичний …, 2024). Водночас понад п'ять мільйонів внутрішньо переміщених осіб створили нову категорію споживачів реабілітаційних і санаторно-курортних послуг, переважно в безпечних західних регіонах. Це спричинило помітне зростання внутрішнього медичного туризму, що проявляється у збільшенні частки пацієнтів із центральних і східних областей, які лікуються у Львівській, Закарпатській та Хмельницькій областях.

Завершальним системоутворювальним елементом є фактор післявоєнного відновлення, який набуває стратегічного значення. За аналітичним звітом МОЗ, у межах Національного плану відновлення передбачено реконструкцію понад 120 медичних закладів, зокрема й реабілітаційних центрів у Львівській, Закарпатській і Одеській областях. Реалізація цих проєктів створює передумови для формування нових кластерів медичного туризму, зорієнтованих на лікування поранених військових, ветеранів і осіб із посттравматичними синдромами. Просторова активізація цього процесу стає фактором інтеграції медицини, туризму й соціальної реабілітації в межах єдиної просторової моделі.

Узагальнення проведеного аналізу свідчить, що просторовий розвиток медичного туризму в Україні є результатом взаємодії медичних, рекреаційних, логістичних, інституційних і соціально-економічних чинників. Найвищу концентрацію конкурентних переваг мають Київ, Львівщина, Закарпаття та Одещина, де поєднуються висока якість медичних послуг, природні ресурси оздоровлення, транспортна доступність і позитивний інвестиційний клімат. Саме ці регіони визначають стратегічну структуру національного медико-туристичного простору, а їхній досвід може стати основою для розвитку периферійних територій у процесі післявоєнного відновлення.

Обговорення

Перспективи просторового розвитку медичного туризму в Україні визначаються комплексом соціально-економічних, медико-рекреаційних і логістичних чинників, що формують регіональні переваги й інвестиційну привабливість територій. У контексті післявоєнного відновлення важливим завданням стає не лише реконструкція пошкодженої інфраструктури, а й формування нової територіальної моделі медико-туристичних кластерів, орієнтованих на реабілітаційно-оздоровчу функцію. На основі проведеного аналізу чинників, просторової структури галузі й офіційних статистичних даних (Державне …, 2023; UkraineInvest, 2023; МОЗ …, 2024; Статистичний …, 2024) визначено коло регіонів, які мають найбільший потенціал для розвитку медичного туризму (табл. 2).

Реалізація зазначених напрямів передбачає поєднання державної політики, регіонального планування і приватних ініціатив. Особливої уваги потребує розроблення стратегії інтеграції медичного туризму в системі післявоєнного відновлення країни. Розбудова кластерів типу «лікування + оздоровлення» має стати основою для створення сталих точок зростання в регіонах, що поєднують медичні, природно-ресурсні й транспортні переваги.

Суттєвого значення набуває питання логістичної інтеграції, адже саме доступність визначає мобільність пацієнтів і економічну ефективність галузі. Не менш важливим є інформаційний чинник: розвиток цифрових платформ, багатомовних сайтів клінік, електронних систем бронювання та цифрового маркетингу дозволить інтегру-

Таблиця 2

Перспективні райони розвитку медичного туризму в Україні

Регіон	**Просторово-ресурсні переваги**	**Потенційні напрями спеціалізації**
Закарпатська область / Карпатський регіон	Висока насиченість мінеральними джерелами (Свалява, Шаян, Поляна), сприятливі кліматичні умови, прикордонне розташування із країнами ЄС.	Розвиток реабілітаційних, бальнеологічних і превентивних центрів; створення транскордонних медичних кластерів.
Одеська область (Чорноморське узбережжя)	Морський клімат, наявність грязьових ресурсів Куяльницького та Будацького, розгалужена курортна інфраструктура, портово-аеропортна логістика.	Формування морського медико-туристичного кластера; поєднання лікування, відновлення і рекреації в межах приморської зони.
Львівська область (Трускавець, Моршин)	Мінеральні води, історично сформована санаторна база, близькість до європейського ринку послуг, транспортна доступність.	Розвиток реабілітаційно-курортного комплексу, орієнтованого на внутрішніх і зовнішніх туристів; створення медико-туристичного бренду «Галичина».
Київ і Київська область	Концентрація високотехнологічних клінік, медичних університетів і наукових центрів, міжнародна транспортна доступність.	Формування національного медичного хабу, розвиток напрямів високоспеціалізованої та інноваційної медицини.
Регіони післявоєнного відновлення (західні території, що приймають)	Переміщення значної частини населення, зростання попиту на реабілітаційні послуги для військових і ВПО, наявність ресурсної бази.	Створення мережі реабілітаційних центрів для ветеранів і військовослужбовців; інтеграція соціальної та медичної реабілітації.

Узагальнено авторами за даними ДАРТ, 2023 р.; Звіту про виконання МОЗ плану заходів, 2024 р.; UkraineInvest, 2023 р.

вати Україну у глобальний медико-туристичний простір.

Отже, просторове вдосконалення системи медичного туризму має спиратися на принципи поліцентричності, міжрегіональної взаємодії та міжнародної інтеграції. Реалізація цих принципів створить підґрунтя для формування конкурентоспроможного медико-туристичного простору, який поєднає функції лікування, реабілітації, відпочинку та соціальної адаптації населення в повоєнній Україні.

Аналітичні оцінки свідчать, що Карпатський і Причорноморський макрорегіони мають найвищу перспективність у сегменті медико-оздоровчого туризму завдяки поєднанню природно-ресурсних, рекреаційних і транскордонних передумов. Закарпаття і Львівщина є конкурентоспроможними на ринку Центрально-Східної Європи, що відкриває можливості залучення іноземних пацієнтів через спільні програми з Польщею, Словаччиною та Угорщиною. Одещина, натомість, має унікальний морський і грязьовий потенціал, придатний для створення багатопрофільних курортів відновного типу, орієнтованих як на громадян України, так і на клієнтів з Балканського та Чорноморського регіонів.

Київ і його агломераційна зона виступають ядром високотехнологічної медицини та центром управління галуззю. Тут сформувалася концентрація інвестицій у приватні клініки, центри естетичної та репродуктивної медицини, а також у проєкти дистанційної діагностики. Цей вузол визначає стратегічну поляризацію простору, поєднує функції лікувального центру, навчально-наукового середовища й логістичного вузла міжнародного рівня.

У західних областях України, які виконують роль безпечного регіону, що приймає, під час війни, формується нова просторово-функціональна зона реабілітаційної медицини. Львівська, Тернопільська, Івано-Франківська та Хмельницька області стають базою для створення медико-соціальних центрів реабілітації військовослужбовців і внутрішньо переміщених осіб. Це явище

можна трактувати як перехід від класичного курортного туризму до моделі соціально орієнтованої реабілітаційної географії.

Визначення перспективних районів дає змогу обґрунтувати напрями вдосконалення просторової організації медичного туризму, що передбачають поєднання інфраструктурних, управлінських і маркетингових заходів (табл. 3).

Висновки

Медичний туризм в Україні формується як цілісна територіальна система, у межах якої поєднуються медичні, рекреаційні та соціально-економічні функції. Просторова структура галузі має поліцентричний характер і концентрується в Київській, Львівській, Закарпатській і Одеській областях, які виступають головними центрами медико-туристичної активності.

Таблиця 3

Основні напрями вдосконалення просторової організації медичного туризму в Україні

Напрям	**Зміст і очікуваний результат**
Формування інтегрованих кластерів «лікування – оздоровлення»	Створення комплексів, що поєднують клінічну, реабілітаційну та туристично-рекреаційну інфраструктуру; розвиток кластерів «Моршин – Трускавець – Хмільник», «Куяльник – Сергіївка – Одеса».
Оптимізація транспортної та логістичної доступності	Модернізація аеропортів, залізничних і автомобільних сполучень з курортними центрами; створення сервісів медичного трансферу.
Маркетинг і брендинг національного медико-туристичного продукту	Розроблення державної програми просування України як доступного медичного напряму; створення спільних інформаційних платформ і цифрових сервісів.
Регламентування та стандартизація послуг	Гармонізація нормативної бази з європейськими стандартами, розбудова системи акредитації клінік і статистичного моніторингу медичного туризму.
Інвестування у відновлення пошкоджених територій	Залучення коштів державних і міжнародних фондів для реконструкції медичних і курортних закладів; стимулювання державно-приватного партнерства.
Розвиток внутрішнього медичного туризму	Підтримка міжрегіональної мобільності пацієнтів, популяризація реабілітаційних програм і санаторного лікування для українців.
Удосконалення політики ціноутворення та сервісу	Запровадження пакетних програм лікування із прозорою структурою вартості, розвиток англомовного сервісу та превентивних програм для іноземців.
Безпека та післявоєнний контекст	Оцінка ризиків, медичне страхування, гарантії для іноземних пацієнтів, розвиток системи реабілітації ветеранів і військових як нового сегмента галузі.

Систематизовано автором за даними UkraineInvest, 2023 р.; Звіту про виконання МОЗ плану заходів, 2024 р.

Визначальними чинниками розвитку є рівень медичної інфраструктури, транспортна доступність і сервісно-інфраструктурне забезпечення, взаємодія яких зумовлює формування кластерів медико-туристичних послуг. Конкурентоспроможність України підтримується поєднанням доступної вартості лікування, природно-лікувальних ресурсів і професійної кваліфікації медичних кадрів, однак подальший розвиток потребує гармонізації стандартів якості та міжнародної акредитації закладів.

Післявоєнне відновлення створює нові можливості для модернізації медичної та курортної інфраструктури, розвитку реабілітаційних центрів і формування кластерів у Карпатському та Причорноморському регіонах. Ефективна просторово-інституційна політика має базуватися на принципах поліцентричності, міжрегіональної взаємодії та державно-приватного партнерства, що сприятиме входженню України в європейський медико-туристичний простір і зміцненню регіональної конкурентоспроможності.

Список використаної літератури

Баєв В. Сучасні тенденції розвитку медичного туризму в Україні. *Агросвіт.* 2015. № 7. С. 35–38. [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrosvit_2015_7_8 (дата звернення 08.09.2025).

Галасюк С. Концептуальні підходи до визначення терміна «лікувально-оздоровчий туризм». *Економіка та суспільство.* 2023. Вип. 47. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-8

Галасюк С., Галасюк К. Проблеми розвитку лікувально-оздоровчого туризму в Україні. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки.* Серія «Економічні науки». 2013. № 5(254). С. 16–21. [Електронний ресурс]. URL: https://dspace.oneu.edu.ua/handle/123456789/2290 (дата звернення 08.09.2025).

Гапонова Е. Ринок медичних послуг в Україні: проблеми та протиріччя. *East European Scientific Journal.* 2016. Vol. 3. № 2(6). P. 24–26. [Електронний ресурс]. URL: https://surl.li/nzaznb (дата звернення 08.09.2025).

Гнедик Є. Засоби регулюючого впливу держави у сфері медичного туризму. *Підприємництво, господарство та право.* 2019. № 3. С. 80–86. [Електронний ресурс]. URL: http://www.pgp-journal.kiev.ua/archive/2019/3/16.pdf (дата звернення 08.09.2025).

Гнедик Є. Медичний туризм як вид господарської діяльності: проблеми нормативно-правового визначення. *Актуальніпроблемивітчизняноїюриспруденції.*2017.№6.Т.2.С.18–22.[Електронний ресурс]. URL: http://apnl.dnu.in.ua/6_tom_2_2017/6.pdf (дата звернення 08.09.2025).

Державне агентство розвитку туризму України [Електронний ресурс]. URL: https://www.tourism.gov.ua/ (дата звернення 08.09.2025).

Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. URL: https://ukrstat.gov.ua/metaopus/2023/2_03_12_05_2023.htm (дата звернення 09.09.2025).

Звіт про виконання МОЗ плану заходів. *Міністерство охорони здоров'я України* [Електронний ресурс]. URL: https://moz.gov.ua/uploads/ckeditor/%D0%91%D0%B5%D0%B7%D0%B1%D0%B0%D1%80'%D1%94%D1%80%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C/2024/03-2024/22-03-2024/%D0%97%D0%B2%D1%96%D1%82%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%9C%D0%9E%D0%97%20%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%83%20%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%B2.pdf (дата звернення 08.09.2025).

Мальська М., Бордун О. Медичний туризм: теорія та практика. Київ, 2018. 128 с.

Молодецький А., Остра В. Лікувально-оздоровчий туризм в українських Карпатах і Причорномор'ї: сучасний стан і тенденції. *Вісник Одеського національного університету імені І.І. Мечникова. Серія «Географічні і геологічні науки».* 2020. Т. 25. № 1 (36). С. 126–140. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1(36).205173

Парфіненко А., Волкова І., Щербина В. Проблеми та перспективи розвитку лікувально-оздоровчого туризму в Україні (у порівнянні із країнами Центральної Європи). *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.* Серія «Міжнародні відносини, економіка, країнознавство». 2018. № 7. С. 130–135 [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKhMv_2018_7_21 (дата звернення 08.09.2025).

Статистичний щорічник України. *Державна служба статистики України* [Електронний ресурс]. 2024. 273 с. URL: https://stat.gov.ua/uk/publications/statystychnyy-shchorichnyk-ukrayiny-2024 (дата звернення 08.09.2025).

Українська асоціація медичного туризму (УАМТ) [Електронний ресурс]. URL: https://uamt.com.ua/UA/ (дата звернення 08.09.2025).

Яворська В., Ляшкова О. Особливості розвитку медичного туризму в Україні. *Вісник Одеського національного університету. Серія «Географічні та геологічні науки».* 2025. Т. 30. Вип. 1 (46). С. 222–233. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1(46).332730

European Medicines Agency (EMA) [Електронний ресурс]. URL: https://www.ema.europa.eu/en/homepage (дата звернення 08.09.2025).

Li H., Cui W. Patients without Borders. The Historical Changes of Medical Tourism. *University of Western Ontario Medical Journal.* 2014. Vol. 83. № 2. P. 20–22. https://doi.org/10.5206/uwomj.v83i2.4434

Lunt N., Smith R., Exworthy M., Green T.S., Horsfall D., Mannion R. Medical Tourism: Treatments, Markets and Health System Implications: A Scoping Review. OECD Publications Service. 2011. 55 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.birmingham.ac.uk/documents/college-social-sciences/social-policy/hsmc/publications/2011/medical-tourism-scoping-review.pdf (дата звернення 08.09.2025).

UkraineInvest. *Investment Opportunity of Healthcare Sector in Ukraine* [Електронний ресурс]. URL: https://ukraineinvest.gov.ua/wp-content/uploads/2025/06/investment-opportunity-of-healthcare-sector-in-ukraine.pdf?utm (дата звернення 08.09.2025).

References

Baiev, V.V. (2015). Suchasni tendentsii rozvytku medychnoho turyzmu v Ukraini [Current trends in the development of medical tourism in Ukraine]. *Ahrosvit*, 7, 35–38. [Electronic resource] URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrosvit_2015_7_8 (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Halasiuk, S.S. (2023). Kontseptualni pidkhody do vyznachennia terminu "likuvalno-ozdorovchyi turyzm" [Conceptual approaches to defining the term "health and wellness tourism"]. *Ekonomika ta suspilstvo [Economy and Society],* 47. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-8 [in Ukrainian].

Halasiuk, S.S., & Halasiuk, K.A. (2013). Problemy rozvytku likuvalno-ozdorovchoho turyzmu v Ukraini [Problems of development of health and wellness tourism in Ukraine]. *Naukovyi visnyk Skhidnoievropeiskoho natsionalnoho universytetu im. Lesi Ukrainky. Seriia: Ekonomichni nauky [Scientific Bulletin of Lesya Ukrainka Eastern European National University. Economic Sciences Series]*, 5(254), 16–21. [Electronic resource] URL: https://dspace.oneu.edu.ua/handle/123456789/2290 (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Haponova, E.O. (2016). Rynok medychnykh posluh v Ukraini: problemy ta protyrichchia [The market of medical services in Ukraine: problems and contradictions]. *East European Scientific Journal (Warsaw)*, 3(2), 24–26. [Electronic resource] URL: https://surl.li/nzaznb (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Hnedyk, Ye.S. (2019). Zasoby rehuliuiuchoho vplyvu derzhavy u sferi medychnoho turyzmu [Instruments of state regulatory influence in the field of medical tourism]. *Pidpryiemnytstvo, hospodarstvo ta pravo [Entrepreneurship, Economy and Law],* 3, 80–86. [Electronic resource] URL: http://www.pgp-journal.kiev.ua/archive/2019/3/16.pdf (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Hnedyk, Ye.S. (2017). Medychnyi turyzm yak vyd hospodarskoi diialnosti: problemy normatyvno-pravovoho vyznachennia [Medical tourism as a type of economic activity: problems of regulatory and legal definition]. *Aktualni problemy vitchyznianoi yurysprudentsii [Current Issues of National Jurisprudence],* 6(2), 18–22. [Electronic resource] URL: http://apnl.dnu.in.ua/6_tom_2_2017/6.pdf (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Derzhavne ahentstvo rozvytku turyzmu Ukrainy [State Agency for Tourism Development of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://www.tourism.gov.ua/ (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. (2023). Turystychna diialnist v Ukraini: statystychnyi biuleten [Tourist activity in Ukraine: statistical bulletin]. *Kyiv: Derzhstat.* [Electronic resource] URL: https://ukrstat.gov.ua/metaopus/2023/2_03_12_05_2023.htm (access date 09.09.2025) [in Ukrainian].

Malska, M.P., & Bordun, O.Yu. (2018). Medychnyi turyzm: teoriia ta praktyka [Medical tourism: theory and practice]. Kyiv, 128 p. [in Ukrainian].

Ministerstvo okhorony zdorov'ia Ukrainy. Zvit pro vykonannia MOZ planu zakhodiv [Report on the Implementation of the Ministry of Health Action Plan]. MOZ Ukrainy. [Electronic resource] URL: https://moz.gov.ua/uploads/ckeditor/%D0%91%D0%B5%D0%B7%D0%B1%D0%B0%D1%80'%D1%94%D1%80%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C/2024/03-2024/22-03-2024/%D0%97%D0%B2%D1%96%D1%82%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%9C%D0%9E%D0%97%20%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%83%20%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%B2.pdf (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Molodetskyi, A.E., & Ostra, V.A. (2020). Likuvalno-ozdorovchyi turyzm v ukrainskykh Karpatakh i Prychornomor'i: suchasnyi stan i tendentsii [Health and wellness tourism in the Ukrainian Carpathians and the Black Sea region: current state and trends]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu imeni I.I. Mechnykova. Seriia: Heohrafichni i heolohichni nauky [Odesa I.I. Mechnikov National University Herald. Geography and Geology]*, 25 (1(36)), 126–140. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1(36).205173 [in Ukrainian].

Parfinenko, A.Yu., Volkova, I.I., & Shcherbyna, V.I. (2018). Problemy ta perspektyvy rozvytku likuvalno-ozdorovchoho turyzmu v Ukraini (u porivnianni z krainamy Tsentralnoi Yevropy) [Problems and prospects of health and wellness tourism development in Ukraine (compared with Central European countries)]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriia: Mizhnarodni vidnosyny, ekonomika, krainoznavstvo [Kharkiv Karazin National University Bulletin. International Relations, Economics, Country Studies]*, 7, 130–135 [in Ukrainian].

Statystychnyj shchorichnyk Ukrajiny. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy (2024). [Statistical Yearbook of Ukraine. State Statistics Service of Ukraine]. 273 p. [Electronic resource] URL: https://stat.gov.ua/uk/publications/statystychnyy-shchorichnyk-ukrayiny-2024 (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Ukrainska asotsiatsiia medychnoho turyzmu (UAMT) [Ukrainian Association of Medical Tourism (UAMT). [Electronic resource] URL: https://uamt.com.ua/UA/ (access date 08.09.2025) [in Ukrainian].

Yavorska, V.V., & Liashkova, O.O. (2025). Osoblyvosti rozvytku medychnoho turyzmu v Ukraini [Features of the development of medical tourism in Ukraine]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Heohrafichni ta heolohichni nauky [Odesa National University Herald. Geography and Geology],* 30 (1(46)), 222–233. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1(46).332730 [in Ukrainian].

Bookman, M.Z., & Bookman, K.R. (2007). Medical Tourism in Developing Countries. New York: Palgrave Macmillan, 262 p. [in English].

European Medicines Agency (EMA). [Electronic resource] URL: https://www.ema.europa.eu/en/homepage (access date 08.09.2025) [in English].

Li, H., & Cui, W. (2014). Patients without Borders. The historical changes of medical tourism. *University of Western Ontario Medical Journal*, 83(2), 20–22. https://doi.org/10.5206/uwomj.v83i2.4434 [in English].

Lunt, N., Smith, R., Exworthy, M., Green, T. S., Horsfall, D., & Mannion, R. (2011). *Medical Tourism: Treatments, Markets and Health System Implications: A Scoping Review.* Paris: OECD Publications Service. 55. [Electronic resource] URL: https://www.birmingham.ac.uk/documents/college-social-sciences/social-policy/hsmc/publications/2011/medical-tourism-scoping-review.pdf (access date 08.09.2025) [in English].

UkraineInvest. *Investment Opportunity of Healthcare Sector in Ukraine*. [Electronic resource] URL: https://ukraineinvest.gov.ua/wp-content/uploads/2025/06/investment-opportunity-of-healthcare-sector-in-ukraine.pdf?utm (access date 08.09.2025) [in English].

Отримано: 24.10.2025
Прийнято: 10.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 631:[005.336]-[047.44 (477.86)] (045)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.12

ОЦІНКА ПРИРОДНОГО АГРАРНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

М. І. Хіміч[1]

У статті проведено комплексне оцінювання природного аграрного потенціалу Івано-Франківської області з урахуванням просторових відмінностей природно-географічних факторів, що визначають придатність території для сільськогосподарського виробництва. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю науково обґрунтованого планування ефективного й екологічно безпечного землекористування в умовах активних кліматичних змін, деградації ґрунтового покриву та зростання антропогенного навантаження на агросферу. Методика дослідження базується на поєднанні природно-географічного аналізу, картографічного моделювання та кількісної оцінки за системою інтегральних показників. Для розрахунку природного аграрного потенціалу (ПАП) використано мультиплікативну модель інтегрального індексу, яка враховує три ключові природно-ресурсні фактори: родючість ґрунтів (ваговий коефіцієнт 0,6), кліматичні умови (0,1) та еродованість ґрунтів (0,3). Результати дослідження показали істотну просторову диференціацію природного аграрного потенціалу в межах області. Найвищий показники природного аграрного потенціалу встановлено для Коломийського (84,3) району, високий для Івано-Франківського (62,2) та Надвірнянського районів (61,1), середній рівень виявлено в Калуському (57,0) та Верховинському (55,1) районах, найнижчий потенціал характерний для Косівського району (44,0). Отримані результати відображають закономірності територіальної організації агросфери Івано-Франківської області: у рівнинній північно-східній частині зосереджені найсприятливіші умови для землеробства, тоді як у гірській південно-західній частині (Косівський, Верховинський райони) домінують екологічні обмеження, що визначають доцільність розвитку альтернативних форм природокористування.

Ключові слова: *природний аграрний потенціал, родючість ґрунтів, ерозійна небезпека, інтегральна оцінка, агросфера, сільське господарство.*

[1] доктор філософії зі спеціальності «Науки про Землю»,
викладач кафедри географії, геодезії та землеустрою
(Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань)
e-mail: uzhela.mariya1994@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2383-5636

ASSESSMENT OF THE NATURAL AGRICULTURAL POTENTIAL OF THE IVANO-FRANKIVSK REGION

M. I. Khimich

The article provides a comprehensive assessment of the natural agricultural potential of Ivano-Frankivsk region, taking into account spatial differences in natural and geographical factors that determine the suitability of the territory for agricultural production. The relevance of the study is due to the need for scientifically sound planning of effective and environmentally safe land use in conditions of active climate change, soil degradation and increasing anthropogenic load on the agrosphere. The research methodology is based on a combination of natural and geographical analysis, cartographic modeling and quantitative assessment using a system of integral indicators. To calculate the natural agricultural potential (PAP), a multiplicative model of the integral index was used, which takes into account three key natural resource factors: soil fertility (weight coefficient 0,6), climatic conditions (0,1) and soil erodibility (0,3). The results of the study showed significant spatial differentiation of natural agricultural potential within the region. The highest PAP indicators were established for Kolomyia (84,3) district, high for Ivano-Frankivsk (62,2) and Nadvirna districts (61,1), the average level of PAP was found in Kalusa (57,0) and Verkhovyna (55,1) districts, the lowest potential is characteristic of Kosiv district (44,0). The results obtained reflect the patterns of territorial organization of the agrosphere of Ivano-Frankivsk region: the most favorable conditions for agriculture are concentrated in the flat north-eastern part, while in the mountainous south-western part (Kosiv, Verkhovyna districts) ecological restrictions dominate, which determine the expediency of developing alternative forms of nature management.

Key words: *natural agrarian potential, soil fertility, erosion hazard, integral assessment, agrosphere, agriculture.*

Вступ

Дослідження природного аграрного потенціалу є ключовим завданням низки наук – ґрунтознавства, географії ґрунтів, економічної географії, оскільки вони формують наукову основу для планування ефективного землекористування. У сучасних умовах активних кліматичних змін, інтенсифікації сільськогосподарського виробництва та загострення процесів деградації ґрунтів особливо актуальною стає просторово-структурна оцінка природно-аграрного потенціалу територій. Результати таких досліджень мають велике практичне значення для розроблення регіональних програм сталого розвитку агросфери, збереження родючості ґрунтів та запобігання їхній ерозійній деградації. Складність дослідження території Івано-Франківської області виражена в коливаннях амплітуд перепаду висот від 230 м на північному сході до 2 061 м на півдні. Відповідно, це вплинуло на формування суттєвих відмінностей у ґрунтово-кліматичних умовах. Тому комплексне оцінювання природно-географічних факторів і аналіз їхніх просторових відмінностей у межах адміністративних районів Івано-Франківської області дають змогу кількісно і якісно визначити їхні продуктивні можливості та перспективи сільськогосподарської спеціалізації.

Проблеми оцінювання аграрного потенціалу територій висвітлювались у працях українських науковців. Я.О. Григоренко запропонував комплексний підхід до оцінювання ефективності аграрного потенціалу регіонів України, поєднуючи методи кількісного аналізу та стратегічного менеджменту, що дозволяє здійснювати порівняльне оцінювання регіональних особливостей аграрного сектору (Григоренко, 2017). Соціально-економічні аспекти розвитку сільського господарства гірських територій Івано-Франківської області розглянуто в роботі І.А. Колодійчук зі співавторами, де проаналізовано стан виробництва продукції, проблеми зайнятості та землезабезпечення гірських районів, підкреслено необхідність врахування природних і соціально-економічних факторів у плануванні агровиробництва (Колодійчук та ін., 2011). У статті М.А. Лендєл, М.В. Газуда, Н.М. Жулканич визначені складники ресурсного потенціалу аграрного сектору та пріоритетні напрями розвитку виробництва (Лендєл та ін., 2005). С.В. Степаненко розглядає ресурсний потенціал як комплексну категорію, що включає не лише традиційні складники (землю, капітал, працю), але й інтелектуальний та іміджевий капітал, які формують стійкі конкурентні переваги аграрних підприємств (Степаненко, 2022). В.В. Россоха запропонував методичні підходи до оцінювання складників природного потенціалу з урахуванням впливу техногенного наван-

таження на довкілля (Россоха, 2009). Попри значну наявність наукових праць, присвячених оцінюванню аграрного потенціалу, деякі аспекти досліджені ще не досить. Саме тому в цій статті зроблено спробу оцінити природно-географічні фактори та просторові відмінності аграрного потенціалу адміністративних районів Івано-Франківської області, що дозволяє конкретизувати регіональні особливості формування аграрного виробництва.

Метою дослідження є комплексне оцінювання природного аграрного потенціалу Івано-Франківської області на основі аналізу природно-географічних факторів (родючості ґрунтів, кліматичних умов і ерозійної небезпеки) для визначення просторових відмінностей і виокремлення територій з різним рівнем придатності до агровиробництва.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких основних *завдань:*

– охарактеризувати природно-географічні умови Івано-Франківської області (геологічну будову, рельєф, клімат, гідромережу, ґрунтово-рослинний покрив);

– проаналізувати родючість ґрунтів адміністративних районів області та встановити їх просторовий розподіл за якісними категоріями;

– оцінити рівень ерозійної небезпеки ґрунтів і визначити ступінь деградації орних земель у межах районів;

– узагальнити кліматичні показники, що впливають на агровиробничу придатність території;

– розробити інтегральний показник природного аграрного потенціалу (далі – ПАП);

– виконати порівняльне оцінювання районів області за рівнем природного аграрного потенціалу.

Матеріал і методи

Для оцінювання природного аграрного потенціалу Івано-Франківської області використано картографічні, статистичні та літературні джерела. Для виконання дослідження були використані загальнонаукові (аналіз і синтез, методи індукції і дедукції, літературний, порівняння, узагальнення), конкретно-наукові (порівняльно-географічний, картографічний, візуально-аналітичного зонування) та міждисциплінарні (математико-статистичний) методи дослідження.

Результати та їх обговорення

Природний аграрний потенціал (ПАП) є складовою частиною інтегрального аграрно-ресурсного потенціалу території, що відображає сукупність природних умов і ресурсів, необхідних для розвитку сільськогосподарського виробництва.

Природний аграрний потенціал визначається як сукупність невичерпних (енергетичних, атмосферних, водних, кліматичних) і вичерпних (земельних, лісових, біологічних, мінеральних, рекреаційних) природних ресурсів, які забезпечують умови для розвитку агропромислового виробництва. Найважливішими складниками цього потенціалу є земельні, лісові, водні ресурси й повітряний басейн, а економічна ефективність агросектора значною мірою залежить від їх якості, розподілу та можливостей використання, зокрема родючості ґрунтів, водних ресурсів для зрошення та лісових масивів для захисту агроландшафтів (Мазур, 2013). М.В. Питуляк виокремлює три основні складові частини ПАП: компонентну, функціональну та територіальну структури (Притуляк, 2003). Компонентна структура відображає співвідношення між видами природних ресурсів, функціональна – їхнє значення в сільськогосподарському виробництві, а територіальна – просторову організацію природних компонентів у межах регіону. Р.А. Іванух природно-ресурсний потенціал сільськогосподарського виробництва представляє як сукупну (інтегральну) продуктивність природних ресурсів (земельних, водних, рослинних) у їх компонентному поєднанні й відображену в обсягах виробництва продукції землеробства й тваринництва на одиницю площі (Іванух, 1985).

Для визначення рівня природного аграрного потенціалу пропонуємо використовувати комплексну оцінку за базовими природно-географічними факторами (рис. 1).

Таким чином, обрана система показників дозволяє охопити як продуктивний аспект ПАП (через родючість і клімат), так і екологічний аспект (через ерозійну небезпеку), що забезпечує комплексність і наукову обґрунтованість оцінки.

Тектонічну будову Івано-Франківської області формують Східно-Європейська платформа, Середземноморський рухливий пояс, представлений складчастою областю Українських Карпат, і Західноєвропейська платформа (Маринич і Шищенко, 2006; Гнилко, 2012). Орографічно територію області можна поділити на три частини: 1) рівнинну, де переважають лісостепові ландшафти, яка охоплює північний схід Івано-Франківщини до Дністра, тобто територію Опілля (обабіч Дністра) та

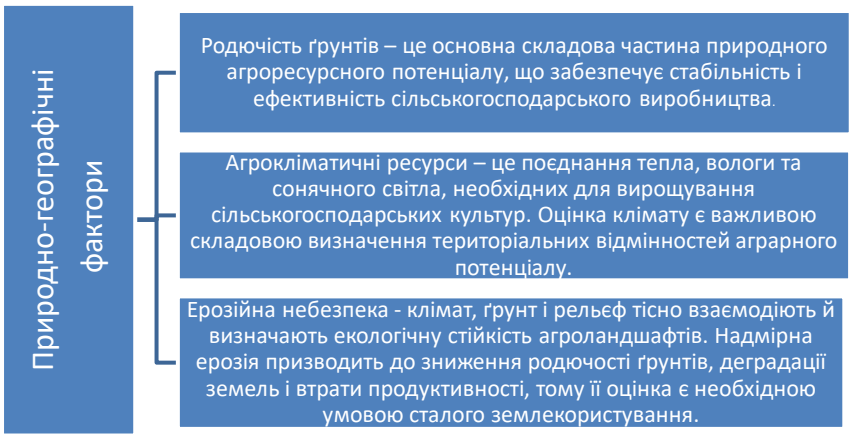


Рис. 1. Фактори для оцінювання природного аграрного потенціалу

Покуття (у межиріччі Прута та Дністра). Вона належить до Подільської височини й Верхньодністровської улоговини. За формою рельєфу є рівнинно-хвилястою (230–300 м) і горбисто-пасмовою (300–400 м); 2) середнє передгір'я, характеризоване наявністю лісолучних і лісо-лучно-степових ландшафтів, простягається вузькою смугою між Дністром і північно-східними схилами Українських Карпат. Передкарпаття є рівнинно-передгірською провінцією Українських Карпат, його складають горбисті передгір'я з висотами 400–600 м; 3) гірська частина, яка починається на південний захід від умовної, чітко вираженої ізогіпси, що проходить поблизу населених пунктів Болехів – Долина – Перегінське – Солотвин – Надвірна – Яблунів – Косів – Кути. Тут переважає середньогірний тип рельєфу, висоти коливаються в межах 1 000–1 500 м. Гірська частина Івано-Франківщини представлена Східними Карпатами, які розділені долинами на гірські масиви й пасма, зокрема – Ґорґани, Покутсько-Буковинські Карпати, Чорногора, Гринява, Чивчини тощо (Маринич і Шищенко, 2006). Складна геологічна й орографічна структура території зумовлює значну різноманітність кліматичних умов області. Рельєф і висотна поясність визначають особливості температурного режиму, кількість опадів і характер циркуляційних процесів, які безпосередньо впливають на формування агрокліматичних ресурсів регіону.

Циркуляція атмосфери відіграє важливу роль у формуванні клімату Івано-Франківської області, виявляє вплив на переміщення атлантичних, континентальних і арктичних повітряних мас. Для території характерною є велика кількість опадів внаслідок частого проходження циклонів і пов'язаних із ними фронтів. Вітровий режим залежить від умов циркуляції повітряних мас над місцевістю та розподілу атмосферного тиску й сильно спотворюється рельєфом місцевості. Упродовж усього року на Івано-Франківщині найбільш характерними напрямками вітру є північно-західний і південно-східний, річний хід температури повітря в області континентальний. Середня температура найтеплішого місяця (липень) становить 19–19,5 °С, а найхолоднішого (січень) – −4 – −5,5 °С. У гірській місцевості температура в липні спадає на 0,7 °С на кожні 100 м підняття. У січні вертикальний температурний градієнт удвічі менший, порівняно з липнем. Отже, у цей період зниження температури зі зростанням висоти відбувається повільніше. Континентальність клімату в Івано-Франківській області є однією з найнижчих серед усіх областей України. У місті Івано-Франківську вона становить 33, з підняттям в Карпати континентальність зменшується до 24 (Киналь, 2008; Kynal & Kholiavchuk, 2016). Середні річні суми опадів на Івано-Франківщині коливаються в межах від 600 до 1 400 мм, вони змінюються залежно від висоти над рівнем моря. У рівнинній частині області річний обсяг опадів становить від 600 до 800 мм. На гірських теренах приріст опадів на кожних 100 метрах підняття становить 11% від кількості опадів, яка зафіксована на висоті 300 метрів. 73% від річної кількості опадів випадає в теплий період (квітень – жовтень), найбільш дощовими є літні місяці, упродовж яких випадає приблизно 44% опадів. У результаті проведеного аналізу річного коефіцієнта зволоження території бачимо, що на рівнинній

частині зволоження є достатнім і коливається в межах від 1,1 до 1,49, а в горах перевищує 1,5 – що є надмірним (Киналь, 2008). Агрокліматична оцінка території Івано-Франківської області свідчить, що більшість районів належать до зони достатнього або достатньо-надмірного зволоження з гідротермічним коефіцієнтом від 1,3 до понад 1,6, що забезпечує сприятливі умови для вирощування більшості сільськогосподарських культур (Агрокліматичне …, 2025).

Поверхневі води Івано-Франківської області формують переважно річки. Територією області протікають 8 294 річки, загальна довжина яких становить 15 754 км. 4 688 річок належать басейну річки Дністер, вони мають загальну довжину 9 111 км. 3 606 річок належать басейну річки Прут, із загальною довжиною 6 643 км. Загальна густота річок у середньому по області становить 0,2–0,4 км/км^2; в окремих басейнах цей показник вищий, наприклад, у басейнах Лімниці та Бистриці, де він дорівнює 1,3 км/км^2, а в басейнах Білого і Чорного Черемошів досягає 1,7–2,5 км/км^2 (Звіт …, 2025).

Прикарпаття в межах Івано-Франківської області об'єднує гірські, передгірні та рівнинні ландшафти. Для кожного з них характерний свій специфічний ґрунтовий і рослинний покрив, а також тваринний світ. Натуральні ландшафти області дослідження представлені класами гірських і рівнинних ландшафтів. Гірські ландшафти Карпатської гірської країни в Івано-Франківській області представлені такими типами натуральних ландшафтів, як: передгірні акумулятивно-денудаційні височини з антропогеновим покривом на неогенових відкладах (глибоко розчленовані височини з дерновими-середньопідзолистими поверхневооглеєними ґрунтами в поєднанні з буроземно-підзолистими, із грабово-буковими дібровами; денудаційні увалисто-пасмові височини із сірими опідзоленими ґрунтами, розорані з дубово-грабовими бучинами; піщано-глинисті й лесові рівнини з дерново-середньопідзолистими опідзоленими ґрунтами, розорані, із грабовими бучинами; розчленовані високотерасові рівнини з дерновими опідзоленими ґрунтами, із грабовими дібровами; низькотерасові слабкодреновані рівнини із глейовими дерновими й дерново-підзолистими ґрунтами, з вологими грабовими дібровами та судібровами); низькогір'я з елювіально-делювіальними відкладами на палеогеновому-крейдовому фліші (крутосхилове низькогір'я з бурими лісовими щебенюватими ґрунтами, із грабово-смерековими дібровами; круте пологосхилове низькогір'я з бурими лісовими щебенюватими ґрунтами, із грабовими бучинами та вторинними луками; круте пологосхилове низькогір'я з бурими лісовими щебенюватими ґрунтами, з ялицево-буковими яличинами; пологосхилове низькогір'я з бурими й буроземно-підзолистими щебенюватими ґрунтами, з буковими яличинами і ялиновими бучинами; улоговинне пологосхилове низькогір'я з бурими й дерново-буроземними ґрунтами (частково розорані), із вторинними луками; крутосхилові низькогір'я (стрімчаки екзотичних юрських вапняків) з бурими лісовими ґрунтами, буковими дібровами); низькогір'я з елювію на неогенових вулканічних породах (острівне горбоогір'я з бурими щебенюватими ґрунтами, з дубово-буковими лісами, виноградниками, садами; виположені розчленовані передгір'я з буроземно-підзолистими ґрунтами, з виноградниками й садами; крутосхилове низькогір'я з бурими лісовими щебенюватими ґрунтами, із грабовими бучинами); середньогір'я з елювії на палеогеново-крейдовому фліші (крутосхилове середньогір'я з бурими лісовими щебнюватими ґрунтами, з бучинами й субучинами; крутосхилове середньогір'я з бурими й буроземно-підзолистими щебнюватими ґрунтами, смерековими раменами та ялицево-буковими яличинами); середньогір'я з елювії на палеозойських породах (різко розчленоване середньогір'я з бурими й дерново-буроземними щебнюватими ґрунтами, з ялиновими сураменами); середньогір'я з елювіальними й давньольодовиковими відкладами на палеогеновому фліші (карпатське високогір'я) (субальпійське плосковершинне середньогір'я з дерново-буроземними й торф'яно-лучними щебенюватими ґрунтами, із криволіссям і гірськими луками (полонинами); субальпійське різкорозчленоване середньогір'я з дерново-буроземними та лучними щебенюватими ґрунтами, із криволіссям і гірськими луками). Лісо-лучні ландшафти в області представлені пагорбами із четвертинним покривом на крейдових і неогенових карбонатних і піщано-глинистих породах (ерозійно-денудаційні лесові височини із сірими й темно-сірими опідзоленими ґрунтами, із грабовими й буковими дібровами; закарстовані рівнини із сірими, темно-сірими опідзоленими й чорноземними ґрунтами; терасові лесові розчле-

новані рівнини із сірими й темно-сірими опідзоленими ґрунтами, із грабовими дібровами, з виходами палеозойських порід). Заплавні ландшафти рівнин представлені лісовими, лучними остепненими та солонцюватими ґрунтами. Заплавні ландшафти гір представлені гірськими галечниковими, передгірними піщано-галечниковими суглинисто-галечниковими міжгірськими улоговинами (Маринич і Шищенко, 2006). Лісистість Івано-Франківської області становить приблизно 41 %, що зумовлює істотний вплив лісової рослинності на ґрунтовий покрив (Державне …, 2025). Під лісовими масивами в різних природно-географічних зонах регіону формуються генетично опідзолені, дерново-підзолисті й інші типи ґрунтів із підвищеним вмістом кислих форм, зокрема в умовах передгір'я та гірських районів (Данилів, 2022).

У межах Івано-Франківської області чітко простежується географічна зональність ґрунтів. Горизонтальна (широтна) зональність спостерігається у зміні типів ґрунтів у напрямку від рівнинної північно-східної частини (сірі опідзолені, темно-сірі опідзолені та чорноземоподібні ґрунти) через центральну передгірну зону (дерново-підзолисті, буроземно-підзолисті, глейові ґрунти) до гірської південно-західної частини. У гірській частині Івано-Франківської області виражена вертикальна (висотна) зональність, де типи ґрунтів змінюються від бурих гірсько-лісових на передгір'ях до дерново-буроземних та гірсько-лучних у високогір'ї.

Виявлені закономірності ґрунтової зональності створюють основу для подальшої кількісної оцінки їхнього аграрного потенціалу. Показник родючості є головним критерієм у визначенні придатності земель до сільськогосподарського використання. Родючість ґрунтів на території Івано-Франківської області є просторово неоднорідною та зумовлена як природно-географічними умовами (висотна поясність, клімат, зволоження), так і ландшафтною структурою (рівнинні, передгірні та гірські ландшафти). Для оцінювання родючості ґрунтового покриву Івано-Франківської області використано (бонітет) бальну шкалу, розроблену на основі середньої багаторічної врожайності зернових культур без урахування витрат на їх вирощування. Для аналізу просторового розподілу родючості ґрунтів у межах області було використано картографічні матеріали (рис. 2), на яких родючість ґрунтів поділено на чотири категорії: добрі, середні, малородючі й особливо малородючі. З метою визначення частки кожної категорії ґрунтів у межах адміністративних районів області було проведено візуально-аналітичне зонування. Для кожного району оцінили орієнтовну площу територій, зайнятих ґрунтами відповідної родючості, на основі порівняння контурів адміністративного поділу з тематичною картою родючості.

Отримані значення були перераховані у відсоткове співвідношення, яке відображає частку кожної категорії ґрунтів у межах району (табл. 1). Такий підхід дозволяє встановити загальні тенденції розподілу ґрунтових ресурсів за якісними характеристиками в системі районування.

Максимальне значення (100 балів) відповідає ґрунтам з найвищим потенціалом урожайності. За цією шкалою, у межах Івано-Франківської області спостерігається така

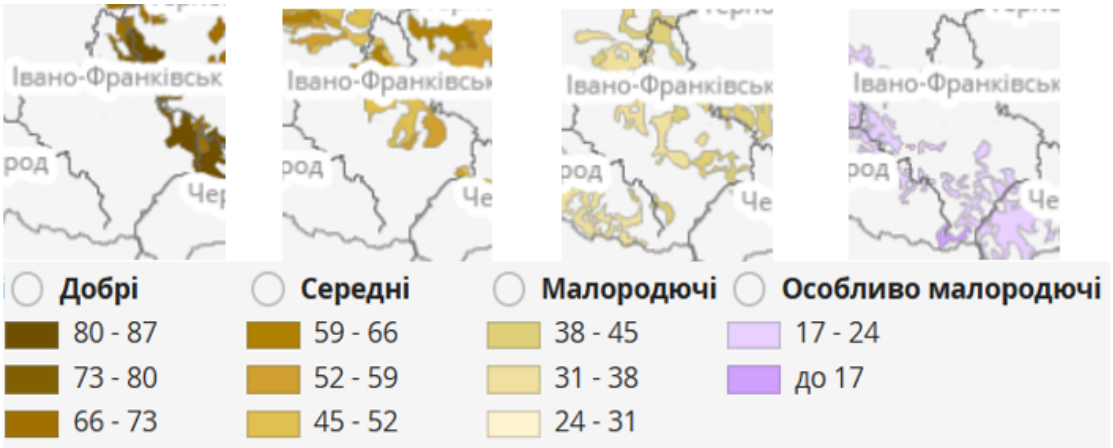


Рис. 2. Родючість ґрунтів Івано-Франківської області (Родючість …, 2025)

Таблиця 1

Відсоткове співвідношення ґрунтів за ступенем родючості в адміністративних районах Івано-Франківської області

Адміністративний район	**Добрі (66–87 балів)**	**Середні (45–66 балів)**	**Малородючі (24–45 балів)**	**Особливо малородючі (17–24 бали), ліси**
Івано-Франківський район	15%	45%	35%	5%
Калуський район	5%	15%	40%	40%
Коломийський район	35%	30%	13%	12%
Надвірнянський район	0%	10%	35%	55%
Косівський район	0%	0%	5%	95%
Верховинський район	0%	0%	5%	95%

характеристика ґрунтового покриву в адміністративних районах:

– Івано-Франківський район – у північно-східній частині району переважають добрі ґрунти, що проходять смугою вздовж східного кордону області. У центральній, південній і південно-східній частинах спостерігається поширення ґрунтів середньої родючості, подекуди із вкрапленнями лісових ділянок. Малородючі ґрунти в районі частково поширені на півночі, півдні та південному заході. Особливо малородючі ґрунти охоплюють малі площі на південному заході району;

– Калуський район – південно-східна частина району має незначні площі добрих ґрунтів, східна частина представлена ґрунтами середньої родючості, центральна й північна – малородючими ґрунтами, західна частина району значною мірою вкрита лісами, де поширені особливо малородючі ґрунти;

– Коломийський район – територія району характеризується доброю родючістю ґрунтів, що є типовим для північно-східної та східної частин. У північно-західній і південно-східній частинах району поширені середньородючі ґрунти. Малородючі ґрунти простягаються на півдні району. У південно-західній частині наявні незначні площі особливо малородючих ґрунтів і лісові масиви;

– Надвірнянський район – у північно-східній частині району трапляються площі середньородючих ґрунтів, основну частину території становлять малородючі й особливо малородючі ґрунти. Південна та південно-східна частини району вкриті лісами;

– Косівський район – ґрунтовий покрив території району представлений малородючими й особливо малородючими ґрунтами. Лісові масиви охоплюють понад половину площі району;

– Верховинський район – увесь район розташований у межах гірської частини області, де переважають особливо малородючі ґрунти. На заході району спостерігається незначна частина малородючих ґрунтів. Ліси охоплюють приблизно дві третини території району.

Однак родючість ґрунтів не завжди гарантує стабільну продуктивність агроландшафтів. Важливим обмежувальним чинником є розвиток ерозійних процесів, які суттєво впливають на стан ґрунтового покриву й ефективність землекористування. Тому наступним етапом дослідження є оцінювання рівнів еродованості території. Важливо зазначити, що всі наведені рівні ерозійної небезпеки визначаються як відсоток еродованої площі від загальної площі ріллі району. Це означає, що оцінюється саме ступінь деградації сільськогосподарських угідь, які активно використовуються.

Характеристика ерозійних процесів у розрізі адміністративних районів області:

– Івано-Франківський район – ерозійні процеси на території району мають виражений мозаїчний характер. У північній частині фіксується катастрофічний рівень еродованості ґрунтів, що охоплює приблизно чверть території району. Південніше розташована зона з дуже сильним рівнем ерозійної небезпеки, яка займає ще близько чверті території. Центральна та південно-західна частини мають слабкий рівень еродованості, що свідчить про відносну стабільність ґрунтового покриву. Південно-східна частина характеризується істотним рівнем ерозії. Отже, район відзначається значною контрастністю стану ґрунтів, поєднанням сильно еродованих ділянок із

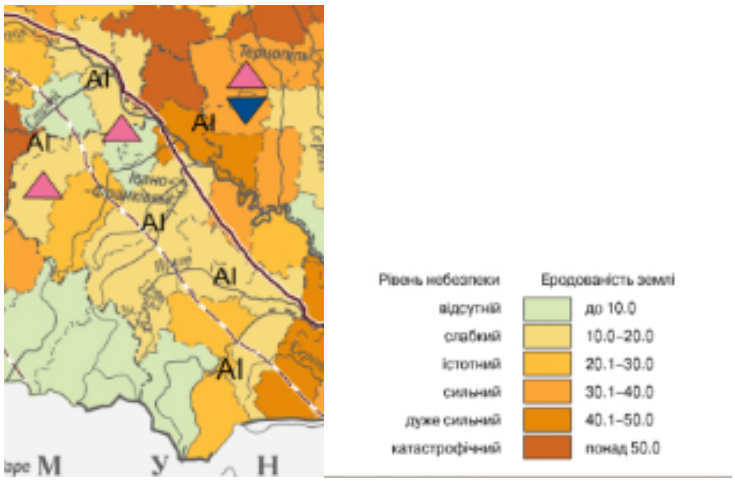


Рис. 3. Еродовані орні землі Івано-Франківської області (Еродовані …, 2025)

відносно стабільними зонами, що потребує диференційованих заходів землеохоронного управління;

– Калуський район – для території району характерна помірна диференціація рівнів еродованості. Східна частина зберігає відсутній рівень ерозії. Північна та північно-східна території мають слабкий рівень еродованості, а південна та центральна – істотний рівень. Отже, переважна частина території перебуває в межах слабкої та істотної ерозійної небезпеки, що пов'язано з активним землеробським використанням схилових земель і середніми ухилами рельєфу;

– Коломийський район – більша частина території району характеризується слабким рівнем еродованості. У північно-східній частині виділяються ділянки з істотним рівнем ерозійної небезпеки. Така структура свідчить про помірний розвиток процесів ерозії, район належить до категорії територій із відносно сприятливими умовами для землеробства;

– Надвірнянський район – у межах усього району спостерігається слабкий рівень еродованості ґрунтів. Такий стан пояснюється значною лісистістю території, що знижує швидкість поверхневого стоку та стабілізує схилові системи;

– Косівський район – для всієї території району характерний істотний рівень еродованості ґрунтів. Район належить до зони підвищеного ризику деградації ґрунтів;

– Верховинський район – територія району характеризується відсутнім або дуже слабким рівнем еродованості. Незважаючи на складні орографічні умови, більша частина земель перебуває під природною лісовою або лучною рослинністю, що ефективно стримує процеси змиву ґрунтів.

Для комплексної кількісної оцінки природного аграрного потенціалу районів Івано-Франківської області ми пропонуємо інтегральний показник природного аграрного потенціалу (ПАП). Цей показник ураховує значення трьох факторів, кожен з яких представлений як нормалізований показник:

$$ПАП = 100 R_n w_r V_n w_v E w_e,$$

$$w_{r = 0,6};\ w_{v = 0,1};\ w_{e = 0,3},$$

де R_n – нормалізований показник родючості ґрунтів, V_n – нормалізований кліматичний показник; E – показник еродованості ґрунтів, ω – коефіцієнти ваги фактору.

Такий вибір коефіцієнтів ваги фактору вважаємо найбільш збалансованим розподілом значущості, де родючість є основою потенціалу, еродованість виступає як критичний екологічний обмежувач, а кліматичний фактор є найменш вагомим через відносно однорідну зону достатнього зволоження на більшій частині території Івано-Франківської області.

1. Показник родючості – середнє значення родючості ґрунтів (*R*) – визначається сумою добутків середньозваженої суми балів родючості та відсоткової частки у площі району (табл. 2).

$$R = \sum_{i}^{4} p_i b_i,$$

де R – середнє значення родючості ґрунтів, p_i – частка ґрунту за ступенем родючості в загальній площі району (використовується як десятковий дріб, наприклад, 15% = 0,15)

(див. табл. 1), b_i – середній бал ступеня родючості ґрунту.

Середні значення балів для кожного ступеня родючості ґрунту такі: добрі – 76,5, середні – 55,5, малородючі – 34,5, особливо малородючі, ліси – 20,5.

Нормалізацію показника родючості (R_n) ґрунтів здійснювали шляхом поділу середньозваженого бала родючості ґрунтів кожного адміністративного району (R) на максимальне середньозважене значення родючості в межах області ($R_{max} = 57{,}75$). Такий підхід забезпечив отримання безрозмірного нормалізованого коефіцієнта, значення якого варіює в межах від 0,37 до 1, що дозволяє зберегти відносні пропорції аграрного потенціалу територій і забезпечує коректність порівняльного аналізу між районами.

2. Кліматичний показник (K_n) – визначений шляхом зважування гідротермічного коефіцієнта (далі – ГТК) (райони, що повністю або більше 90% площі перебувають у зоні достатнього зволоження, отримують 1,00 (оптимум) (табл. 3). ГТК – відношення суми опадів за сталий період з температурою повітря, вищою за 10 °С, до суми позитивних температур за цей самий період, зменшеної в 10 разів.

Для Косівського та Верховинського районів кліматичний показник (K_n) був суттєво знижений, незважаючи на їхню класифікацію як «надмірного» або «достатнього» зволоження, оскільки ці коефіцієнти відображають інтегрований негативний вплив суворих високогірних умов, що характеризуються найнижчою сумою активних температур і критичним рельєфом, які спільно створюють найгірші кліматичні обмеження для агровиробництва в області.

3. Показник еродованості ґрунтів (*E*) – для районів області був визначений шляхом систематизації та інтерпретації наявних картографічних і статистичних даних щодо ерозійних процесів, середнього рівня еродованості орних земель та частки ріллі в загальній площі району (табл. 4). Категорії ерозійної небезпеки («слабка», «істотна», «сильна», «катастрофічна») були перетворені на числові значення індексу, нормовані до шкали від 0 до 1, де 1 відповідає найсприятливішим умовам (мінімальна ерозія), а 0 – критичному рівню деградації ґрунтів.

Результати розрахунків інтегральних показників природного аграрного потенціалу представлені в таблиці 5.

Комплексне оцінювання природного аграрного потенціалу районів Івано-Франківської області, виконане на основі аналізу родючості ґрунтів, кліматичних умов і еродованості ґрунту, виявило значні

Таблиця 2

Результати розрахунків показників родючості адміністративних районів Івано-Франківської області

№	Назва адміністративного району	R	R_n
1	Івано-Франківський район	51,80	0,9
2	Калуський район	31,35	0,54
3	Коломийський район	57,75	1,0
4	Надвірнянський район	28,60	0,5
5	Косівський район	21,20	0,37
6	Верховинський район	21,20	0,37

Таблиця 3

Результати агрокліматичного оцінювання адміністративних районів Івано-Франківської області

№	Назва адміністративного району	Агрокліматична зона	ГТК	K_n
1	Івано-Франківський район	Достатнього зволоження	від 1,3 до 1,6	1,00
2	Калуський район	Дост./надм. зволоження	від 1,3 до більше 1,6	0,92
3	Коломийський район	Достатнього зволоження	від 1,3 до 1,6	1,00
4	Надвірнянський район	Дост./надм. зволоження	від 1,3 до більше 1,6	0,90
5	Косівський район	Надмірного зволоження	більше 1,6	0,75
6	Верховинський район	Достатнього зволоження	від 1,3 до 1,6	0,70

Таблиця 4

Оцінка еродованості ґрунтів Івано-Франківської області

№	Назва адміністративного району	Якісна характеристика рівня ерозійної небезпеки	E
1	Івано-Франківський район	Висока – поєднання істотної (20,1–30,0%) і сильної (30,1–50,0%) ерозії; значна деградація орних земель.	0,3
2	Калуський район	Помірна – переважають слабкий (10,0–20,0%) та істотний (20,1–30,0%) рівні еродованості.	0,4
3	Коломийський район	Невисока – слабкий (10,0–20,0%) рівень ерозії з окремими осередками істотного (до 30,0%).	0,6
4	Надвірнянський район	Низька – повсюдно слабкий рівень ерозії (10,0–20,0%), відносно стабільний стан ґрунтів.	0,7
5	Косівський район	Підвищена – істотна еродованість (20,1–30,0%).	0,5
6	Верховинський район	Дуже низька – ерозія незначна (до 10,0%).	0,9

Таблиця 5

Результати розрахунків інтегральних показників природного аграрного потенціалу адміністративних районів Івано-Франківської області

№	Назва адміністративного району	ПАП	Аграрний потенціал	Ранг
1	Івано-Франківський район	62,2	Високий	2
2	Калуський район	57,0	Середній	4
3	Коломийський район	84,3	Дуже високий	1
4	Надвірнянський район	61,1	Високий	3
5	Косівський район	44,0	Низький	6
6	Верховинський район	55,1	Середній	5

просторові відмінності у придатності територій для сільськогосподарського виробництва. Для візуалізації результатів дослідження в межах області розроблена карта (рис. 4).

Найвищий потенціал зосереджений у рівнинній північно-східній частині області (Коломийський, Івано-Франківський райони). Коломийський район отримав найвищу оцінку аграрного потенціалу, оскільки

Рис. 4. Карта результатів оцінювання природного аграрного потенціалу Івано-Франківської області (розроблено автором)

ґрунти району мають високу родючість та низький рівень ризику ерозії. Район міг би стати центром аграрного виробництва в Івано-Франківській області. Найнижчий потенціал характерний для південної частини області (Косівський, Верховинський райони). Косівський район має низький аграрний потенціал. Основними обмежувальними факторами є низька родючість ґрунтів (95% мають особливо низьку родючість) та підвищений рівень ризику ерозії (істотна еродованість).

Висновки

Отримані результати є основою для розроблення диференційованих регіональних стратегій раціонального землекористування: для районів з високим потенціалом (Коломийський, Івано-Франківський) – необхідна пріоритетна реалізація комплексних ґрунтозахисних заходів, особливо в Івано-Франківському районі, для боротьби з ерозією та стабілізації продуктивності; для гірських районів (Косівський, Верховинський) – варто зосередитись на розвитку спеціалізованих галузей, які відповідають природним умовам, як-от високогірне рослинництво, луківництво, тваринництво, агротуризм і лісове господарство, мінімізуючи використання малопродуктивних орних земель.

Список використаної літератури

Агрокліматичне районування України [Електронний ресурс]. URL: https://geomap.land.kiev.ua/zoning-3.html (дата звернення 15.10.2025).

Гнилко О.М. Тектонічне районування Карпат у світлі терейнової тектоніки. Ст. 2. Флішові Карпати – давня акреційна призма. *Геодинаміка.* 2012. Вип. 1. С. 67–78.

Григоренко Я.О. Оцінка регіональних особливостей аграрного потенціалу України в системі забезпечення економічної безпеки держави. *Стратегічні пріоритети.* 2017. № 2. С. 137–147.

Данилів О.О. Ґрунтові ресурси Івано-Франківської області та їх охорона. *Вісник Уманського національного університету садівництва. Агрономія.* 2022. № 2. С. 18–22. https://doi.org/10.32782/2310-0478-2022-2-18-22

Державне агентство лісових ресурсів України [Електронний ресурс]. URL: https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisi-ukrayini/zagalna-harakteristika-lisiv-ukrayini (дата звернення 17.10.2025).

Еродовані орні землі України [Електронний ресурс]. URL: https://stat.nonews.co/wp-content/uploads/2016/11/29wuvq9.jpg (дата звернення 15.10.2025).

Звіт про стратегічну екологічну оцінку [Електронний ресурс]. URL: https://saee.gov.ua/sites/default/files/blocks/4 (дата звернення 15.10.2025).

Іванух Р.А. Охорона і раціональне використання природно-ресурсного потенціалу сільського господарства. Київ : Урожай, 1985. 285 с.

Киналь О.В. Мезокліматичні властивості ландшафтів Українських Карпат. *Наукові записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Географія».* 2008. Т. 21(60). № 3. С. 176–187.

Колодійчук І.А., Герзанич В.М., Мартинюк М.В. Стан та шляхи розвитку сільського господарства гірських районів Івано-Франківської області. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка».* 2011. Спецвип. 33. Ч. 4. С. 50–55.

Лендєл М.А., Газуда М.В., Жулканич Н.М. Особливості аграрного господарювання в Карпатському регіоні. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка».* 2005. Вип. 18. С. 39–50.

Маринич О.М., Шищенко П.Г. Фізична географія України : підручник. Київ : Знання, 2006. 511 с.

Мазур Г.Ф. Природно-ресурсний потенціал розвитку агропромислового виробництва України. *Економіка АПК.* 2013. № 10. С. 80–86.

Питуляк М.В. Еколого-економічна оцінка земельно-ресурсного потенціалу Тернопільщини. *Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету. Серія «Географія».* 2003. № 1(7). С. 83–87.

Родючість ґрунтів України [Електронний ресурс]. URL: https://superagronom.com/karty/rodjuchist-gruntiv-ukrainy (дата звернення 15.10.2025).

Россоха В.В. Методичні підходи до оцінювання і використання потенціалу природних ресурсів в аграрній сфері економіки. *Економіка і прогнозування.* 2009. № 2. С. 83–96.

Степаненко С. В. Ресурсний потенціал аграрних підприємств: елементи та особливості їх поєднання в сучасних умовах. *Ефективна економіка.* 2022. № 2. С. 1–7. https://doi.org/10.32702/2307-2105-2022.2.96

Kynal O., Kholiavchuk D. Climate variability in the mountain river valleys of the Ukrainian Carpathians. *Quaternary International.* 2016. № 415. P. 154–163. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.053.

References

Ahroklimatychne raionuvannia Ukrainy [Agroclimatic zoning of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://geomap.land.kiev.ua/zoning-3.html (access date 15.10.2025) [in Ukrainian].

Hnylko, O.M. (2012). Tektonichne raionuvannia Karpat u svitli tereinovoi tektoniky. St. 2. Flishovi Karpaty – davnia akretsiina pryzma [Tectonic zoning of the Carpathians in the light of terrain tectonics. 2. Flysch Carpathians – an ancient accretionary prism]. *Heodynamika [Geodynamics],* 1, 67–78 [in Ukrainian].

Hryhorenko, Ya.O. (2017). Otsinka rehionalnykh osoblyvostei ahrarnoho potentsialu Ukrainy v systemi zabezpechennia ekonomichnoi bezpeky derzhavy [Assessment of regional features of the agricultural potential of Ukraine in the system of ensuring the economic security of the state]. *Stratehichni priorytety [Strategic Priorities],* 2, 137–147 [in Ukrainian].

Danyliv, O.O. (2022). Gruntovi resursy Ivano-Frankivskoi oblasti ta yikh okhorona [Soil resources of Ivano-Frankivsk region and their protection]. *Visnyk Umanskoho natsionalnoho universytetu sadivnytstva. Ahronomiia [Bulletin of the Uman National University of Horticulture. Agronomy],* 2, 18–22. https://doi.org/10.32782/2310-0478-2022-2-18-22 [in Ukrainian].

Derzhavne ahentstvo lisovykh resursiv Ukrainy [State Agency of Forest Resources of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisi-ukrayini/zagalna-harakteristika-lisiv-ukrayini (access date 17.10.2025) [in Ukrainian].

Erodovani orni zemli Ukrainy [Eroded arable land in Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://stat.nonews.co/wp-content/uploads/2016/11/29wuvq9.jpg (access date 15.10.2025) [in Ukrainian].

Zvit pro stratehichnu ekolohichnu otsinku [Strategic Environmental Assessment Report]. [Electronic resource] URL: https://saee.gov.ua/sites/default/files/blocks/4 (access date 15.10.2025) [in Ukrainian].

Ivanukh, R.A. (1985). Okhorona i ratsionalne vykorystannia pryrodno-resursnoho potentsialu silskoho hospodarstva [Protection and rational use of the natural resource potential of agriculture]. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].

Kynal, O.V. (2008). Mezoklimatychni vlastyvosti landshaftiv Ukrainskykh Karpat [Mesoclimatic features of the landscapes of the Ukrainian Carpathians]. *Naukovi zapysky tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V.I. Vernadskoho. Seriia "Heohrafiia" [Scientific notes of the Tavrichesky National University im. V.I. Vernadsky. Series "Geography"],* 21(60), № 3, 176–187 [in Ukrainian].

Kolodiichuk, I.A., Herzanych, V.M., & Martyniuk, M.V. (2011). Stan ta shliakhy rozvytku silskoho hospodarstva hirskykh raioniv Ivano-Frankivskoi oblasti [The state and ways of development of agriculture in the mountain regions of Ivano-Frankivsk region]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriia: Ekonomika [Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: Economics],* 33(4), 50–55 [in Ukrainian].

Lendiel, M.A., Hazuda, M.V., & Zhulkanych, N.M. (2005). Osoblyvosti ahrarnoho hospodariuvannia v Karpatskomu rehioni [Peculiarities of agricultural management in the Carpathian region]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriia: Ekonomika [Scientific Bulletin of Uzhgorod University. Series: Economics],* 18, 39–50 [in Ukrainian].

Marynych, O.M., & Shyshchenko, P.H. (2006). Fizychna heohrafiia Ukrainy [Physical Geography of Ukraine]. Kyiv: Znannia [in Ukrainian].

Mazur, H.F. (2013). Pryrodno-resursnyi potentsial rozvytku ahropromyslovoho vyrobnytstva Ukrainy [Natural resource potential of the development of agro-industrial production in Ukraine]. *Ekonomika APK [Economics of the Agricultural Complex],* 10, 80–86 [in Ukrainian].

Pytuliak, M.V. (2003) Ekoloho-ekonomichna otsinka zemelno-resursnoho potentsialu Ternopilshchyny [Ecological and economic assessment of the land and resource potential of the Ternopil region]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu. Seriia: heohrafiia [Scientific notes of the Ternopil State Pedagogical University. Series: geography],* 1(7), 83–87 [in Ukrainian].

Rodiuchist gruntiv Ukrainy [Soil fertility of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://superagronom.com/karty/rodjuchist-gruntiv-ukrainy (access date 15.10.2025) [in Ukrainian].

Rossokha, V.V. (2009). Metodychni pidkhody do otsiniuvannia i vykorystannia potentsialu pryrodnykh resursiv v ahrarnii sferi ekonomiky [Methodological approaches to the assessment and use of natural resources potential in the agricultural sector of the economy]. *Ekonomika i prohnozuvannia [Economics and Forecasting],* (2), 83–96 [in Ukrainian].

Stepanenko, S.V. (2022). Resursnyi potentsial ahrarnykh pidpryiemstv: elementy ta osoblyvosti yikh poiednannia v suchasnykh umovakh [Resource potential of food enterprises: elements and features of their organization in modern conditions]. *Efektyvna ekonomika [Effective economics],* 2, 1–7. https://doi.org/10.32702/2307-2105-2022.2.96 [in Ukrainian].

Kynal, O., & Kholiavchuk, D. (2016). Minlyvist klimatu v dolynakh hirskykh richok Ukrainskykh Karpat [Climate variability in the mountain river valleys of the Ukrainian Carpathians]. *Chetvertynnyi mizhnar [Quaternary International],* 415, 154–163. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.053 [in English].

Отримано: 29.10.2025
Прийнято: 21.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

ХІМІЯ

УДК 544.7;546.3;549.5
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.13

СОРБЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОРОЗМІРНОГО FE_3O_4 ЩОДО ІМУНОГЛОБУЛІНУ ЛЮДИНИ IG

Н. В. Кусяк[1], К. П. Свиридюк[2], О. В. Ходюк[3], А. П. Кусяк[4], П. П. Горбик[5]

Проведено дослідження сорбційних характеристик нанорозмірного магнетиту (Fe_3O_4) щодо імуноглобуліну людини нормального (Ig). Синтезовані зразки Fe_3O_4 схарактеризовані комплексом фізико-хімічних методів: досліджено розмір і морфологію (TEM/SEM-EDX), проведено якісний аналіз (ІЧ-Фур'є спектроскопія), рентгенівський дифракційний аналіз (XRD), визначено питому площу поверхні (S_{BET}), величину дзета-потенціалу.

Потенціометрично досліджено кислотно-основні властивості поверхні в модельному фізіологічному середовищі – 0,9% розчині NaCl (pH 6,86), досліджено процеси сорбції та встановлено сорб-

[1] кандидат хімічних наук,
доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
докторант
(Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України, м. Київ)
e-mail: nkusyak@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0143-3399
[2] магістр,
асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: sviridyukk-97@ukr.net
ORCID: 0009-0000-1258-7644
[3] магістр,
асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: sasahoduk1@gmail.com
ORCID: 0009-0008-9653-7641
[4] кандидат хімічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу наноматеріалів
(Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України, м. Київ)
e-mail: a_kusyak@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1005-5497
[5] доктор фізико-математичних наук,
професор, зав. відділу наноматеріалів
(Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України, м. Київ)
e-mail: phorbyk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0533-4427

ційну активність поверхні наночастинок Fe_3O_4 щодо Ig. Так, значення ζ-потенціалу для частинок Fe_3O_4 свідчить про достатню стабільність дисперсії в діапазоні pH ~ 2–5, і втрату її за pH ~ 7. Встановлено, що на поверхні Fe_3O_4 переважають нейтральні центри, які однаково характеризуються як кислотними, так і основними властивостями. Проведено аналіз кінетичних залежностей (моделі псевдопершого та псевдодругого порядків) та ізотерм сорбції (моделі Ленгмюра та Фрейндліха) Ig із використанням лінійного і нелінійного моделювання. Одержані параметри вказують на можливість застосування кінетичної моделі псевдопершого порядку для коректного опису залежності сорбції від часу та придатності моделі Фрейндліха для ізотерм сорбції Ig на поверхні Fe_3O_4. Максимальна сорбційна ємність (A_{max}) становить 12 мг·г$^{-1}$. Показник Фрейндліха свідчить про неоднорідність геометрії сорбційних центрів, їхню енергетичну нееквівалентність та переважно фізичну природу сорбції. Завдяки високій біосумісності отримані наночастинки магнетиту можуть бути потенційно придатними для створення сорбційних матеріалів та композитів щодо білкових речовин, зокрема імуноглобулінів.

Ключові слова: *магнетит, імуноглобулін, сорбційні моделі, моделювання, кислотно-основні властивості.*

SORPTION PROPERTIES OF NANOSIZED FE_3O_4 TOWARD HUMAN IMMUNOGLOBULIN IG

N. V. Kusiak, K. P. Svyrydiuk, A. P. Kusyak, O. V. Khodiuk, P. P. Gorbyk

The sorption characteristics of nanosized magnetite (Fe_3O_4) towards human normal immunoglobulin (Ig) were studied. The synthesized Fe_3O_4 samples were characterized by a complex of physicochemical methods: size and morphology were investigated (TEM/SEM-EDX), qualitative analysis was performed (IR-Fourier spectroscopy), X-ray diffraction analysis (XRD), specific surface area (S_{BET}), and zeta potential were determined. The acid-base properties of the surface were potentiometrically investigated in a model physiological medium of 0,9% NaCl solution (pH 6,86), the sorption processes were investigated and the sorption activity of the surface of Fe_3O_4 nanoparticles towards normal human immunoglobulin (Ig) was established. Thus, the value of the ζ-potential for Fe_3O_4 particles indicates sufficient dispersion stability in the pH range ~ 2–5, and its loss at pH ~ 7. It was found that neutral centers predominate on the Fe_3O_4 surface, which are equally characterized by both acidic and basic properties. The kinetic dependences (pseudo-first and pseudo-second order models) and sorption isotherms (Langmuir and Freundlich models) of Ig were analyzed using linear and nonlinear modeling. The obtained parameters indicate the possibility of using the pseudo-first order kinetic model to correctly describe the dependence of sorption on time and the suitability of the Freundlich model for sorption isotherms of Ig on the Fe_3O_4 surface. The maximum sorption capacity (A_{max}) is 12 mg·g^{-1}. The Freundlich index indicates the hetergeneity of the geometry of the adsorption centers, their energy non-equivalence and, mainly, the physical nature of the sorption. Due to the high biocompatibility, the obtained magnetite nanoparticles may be potentially suitable for creating adsorption materials and composites for protein substances, in particular immunoglobulins.

Key words: *magnetite, immunoglobulin, sorption models, modeling, acid-base properties.*

Вступ

Використання наноматеріалів як субстратів для іммобілізації органічних речовин медико-біологічного призначення в біологічному середовищі потребує детального вивчення взаємодії таких матеріалів як із препаратами, так і з компонентами біологічного середовища (Peng et al., 2020; Vega-Vásquez et al., 2020). Фізико-хімічні параметри таких матеріалів мають відповідати принципам біосумісності, сорбційної активності, часу перебування в біологічному середовищі, гідрофільності/гідрофобності тощо (Shalmani et al., 2019; Auría-Soro et al., 2019). Важливо розуміти процес та механізм взаємодії біологічних речовин з поверхнями наночастинок (далі – НЧ) різної природи, вплив на конформацію та функціональну здатність речовин, зокрема білкових (Bayramoglu et al., 2019). Ця взаємодія буде визначатися хімічною природою реагентів, фізико-хімічними (поверхневий заряд, реакційні групи, $pH_{ІЕТ}$) та геометричними (розмір, структура поверхні) властивостями НЧ.

Серед біологічних реагентів ключове місце належить білковим речовинам, тому дослідження поведінки НЧ щодо них є важливими. Досліджено, що швидке та легке зв'язування білків із поверхнею НЧ зумов-

лено електростатичною взаємодією, водневими зв'язками, гідрофобними взаємодіями й утворенням координаційних зв'язків. Ступінь та специфічність взаємодії визначаються трьома основними факторами, комбінація яких контролює сорбцію. Першим фактором є характеристики НЧ (природа, форма та розмір) та її поверхні (заряд і гідрофобність). Другим – середовище. Тому зазвичай використовуються складні буферні суміші, іони яких, імовірно, конкурують з біомолекулами за місця сорбції (Blank-Shim et al., 2017). Тому вибір середовища є одним із вирішальних факторів у процесі дослідження. Третім фактором, що впливає на взаємодію, є сам білок і особливості його структури, оскільки білки можуть зазнавати структурних змін через взаємодію з НЧ (Abarca-Cabrera et al., 2021). З метою збереження функціональності молекули важливою є підтримка її нативної структури.

Тому вивчення поведінки поверхні НЧ щодо біологічних речовин є принциповим. Серед біосумісних композитів магніточутливі на основі Fe_3O_4 залишаються одними із ключових (Martins et al., 2021; Islam et al., 2021). Так, у роботах (Cao et al., 2020; Kaveh-Baghbaderani et al., 2021) досліджено іммобілізацію білкових сполук на композитах Fe_3O_4. Деякі демонструють іммобілізуючу активність щодо IgG (Jofre et al., 2020; Khuyen et al., 2020; Kusyak et al., 2023). IgG визначали також за допомогою електронно-спінової резонансної спектроскопії з використанням НЧ Fe_3O_4 (Tian et al., 2018).

Основною метою цієї роботи було вивчення фізико-хімічних властивостей синтезованого нанорозмірного Fe_3O_4 та процесів сорбційної іммобілізації Immunoglobulinum humanum (Ig). Як середовище під час сорбційних тестів використовувався 0,9% NaCl (ФР) для збереження початкової структури білків, який має простий іонний склад, що спрощує інтерпретацію отриманих результатів. Досліджені особливості кінетики сорбції, необхідні для розуміння взаємодії білка з НЧ Fe_3O_4.

Матеріал і методи

Монодисперсний нанорозмірний магнетит Fe_3O_4 синтезовано за реакцією Елмора. Постійне перемішування та поступове рівномірне додавання розчину солей заліза (Fe(II) та Fe(III)) до розчину аміаку, взятому в надлишку, зумовлює утворення монодисперсного нанорозмірного магнетиту та сприяє максимальному виходу продукту реакції. Рентгеноструктурні дослідження проведено методом порошкової рентгенівської дифракції (XRD) (DRON-UM1 з Fe-фільтром CuK_a (λ = 1,54056 Å), у діапазоні 2θ від 20° до 80° із кроком 0,05° та експозицією 15 с. Запис інфрачервоних спектрів (Tensor 27 (Bruker Optik GmbH)) проведено в діапазоні 4 000–400 $см^{-1}$ (таблетки KBr) з роздільною здатністю 2 $см^{-1}$. Морфологічні характеристики і розмір одержаних НЧ досліджено методом електронної мікроскопії (JEOL 1200 EX (Токіо, Японія). Для визначення дзета-потенціалу (Zetasizer Nano ZS (Malvern)) зразки суспендували у ФР за концентрації зразка 2 $г·л^{-1}$.

Проведено дослідження кислотно-основних характеристик поверхні НЧ Fe_3O_4 методом pH-метрії окремих наважок, що дозволяє оцінити інтегральну кислотність поверхні за зміною pH водної суспензії досліджуваних зразків (I-160M). Значення pH ізоелектричної точки ($pH_{ІР}$) визначали відповідно до методики (Kusyak et al., 2021; Кусяк та ін., 2025). За допомогою основних рівнянь кислотно-основного балансу експериментально отримані значення $[H^+]_0$ та $[H^+]_{екв}$ були використані для розрахунку концентрацій і відносної частки протонованих $-E-OH_2^+$ та депротонованих $-E-O^-$ активних центрів поверхні НЧ, розраховано значення їх *pK*.

Для дослідження сорбції Ig на поверхні НЧ було використано препарат імуноглобулін (нормальний людський, розчин для ін'єкцій 10%, Biopharma). Препарат містить від 9 до 11% білка (антитіла різної специфічності) і являє собою імунологічно активну білкову фракцію із сироватки або плазми людини, очищену та концентровану з використанням відповідних методів. У цій роботі Ig кількісно визначено як загальний. Вплив сумісної сорбції кількох видів антитіл не вивчався. Було виготовлено серію зразків з різною концентрацією Ig у діапазоні 0,15–1,15 мг $мл^{-1}$у ФР з pH 6,86. Сорбцію Ig проводили протягом 2 годин у статичному режимі (T = 298 K). Кількість сорбованого препарату на поверхні магнетиту визначали шляхом вимірювання концентрації розчинів Ig до та після сорбції. Спектрофотометричні дослідження (Helios Gamma) сорбції Ig проведено за λ = 280 нм, довжина оптичного шляху становить 1 см. Сорбційну ємність (A, мг/г) розраховували за допомогою класичних рівнянь (Kusyak et al., 2022):

$$A = \frac{\left(C_o - C_{eq}\right)\cdot V}{m} \quad (1)$$

де A (мг г$^{-1}$) – кількість сорбованої речовини, C_o та C_{eq} (мг мл$^{-1}$) – початкова та рівноважна концентрації розчину Ig, V (мл) – об'єм розчину, m (мг) – маса використаного сорбенту.

Аналіз кінетичних характеристик проводили за концентрації Ig 0,6 мг мл $^{-1}$ у середовищі ФР (pH = 6,86). Одержані експериментальні кінетичні дані проаналізовані на відповідність кінетичним моделями псевдопершого та псевдодругого порядків. Кінетичне рівняння моделі псевдопершого порядку Лагенгрена в диференційній формі:

$$\frac{dA_t}{dt} = k_1 \cdot \left(A_{eq} - A_t\right) \quad (2)$$

згідно з яким у даній моделі швидкість сорбції пропорційна різниці між рівноважною сорбцією (A_{eq}) та сорбцією (A_t) у момент часу *t*. В інтегральній формі:

$$\lg\left(A_{eq} - A_t\right) = \lg A_{eq} - \frac{k_1}{2{,}303}\cdot t \quad (3)$$

де A_{eq} та A_t – сорбційна ємність у стані рівноваги та в момент часу *t* відповідно (мг/г); k_1 – константа швидкості сорбції моделі псевдопершого порядку (хв$^{-1}$); *t* – час (хв).

Побудова графічної залежності в координатах $ln(A_{eq} - A_t) = f(t)$ дозволяє отримати відповідну лінійну функцію та знайти k_1 та A_{eq}.

Кінетичне рівняння моделі псевдодругого порядку Хо та Маккея в диференційній формі :

$$\frac{dA_t}{dt} = k_1 \cdot \left(A_{eq} - A_t\right)^2 \quad (4)$$

де k_2 – константа швидкості псевдодругого порядку (г мг$^{-1}$ хв $^{-1}$).

В інтегральній формі:

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 \cdot A_{eq}^2} + \frac{1}{A_{eq}}\cdot t \quad (5)$$

Побудова графічної залежності в координатах $t/A_t = f(t)$ дозволяє отримати відповідну лінійну функцію та знайти k_2. Розраховано початкову швидкість сорбції h_0. Для даних моделей були розраховані теоретичні значення сорбційної ємності (A_{teop}) у момент часу *t*.

Експериментальні ізотерми проаналізовані на відповідність моделями Ленгмюра та Фрейндліха. Для водних розчинів нелінійний математичний вираз моделі ізотерми Ленгмюра:

$$A_{eq} = A_{max}\frac{K_L \cdot C_{eq}}{1 + K_L \cdot C_{eq}} \quad (6)$$

де A_{eq} і A_{max} – рівноважна та гранична сорбційна ємність (мг/г або моль/г);

C_{eq} – рівноважна концентрація сорбату (мг мл $^{-1}$ або моль мл $^{-1}$);

K_L – константа Ленгмюра, яка пов'язана із сорбційною здатністю (л мг $^{-1}$ або л моль $^{-1}$).

Лінійних математичних рівнянь моделі ізотерми Ленгмюра відомо багато. У роботі для розрахунків використовували два, які найчастіше застосовують:

$$\frac{C_{eq}}{A_{eq}} = \frac{1}{K_L \cdot A_{max}} + \frac{1}{A_{max}}\cdot C_{eq} \quad (7)$$

та

$$\frac{1}{A_{eq}} = \frac{1}{K_L \cdot A_{max}}\cdot\frac{1}{C_{eq}} + \frac{1}{A_{max}} \quad (8)$$

Побудова графічних залежностей лінійного рівняння (7) у координатах $C_{eq}/A_{eq} = f(C_{eq})$, а рівняння (8) у координатах $1/A_e = f(1/C_{eq})$ дозволила знайти K_L та A_{max}.

Модель ізотерми сорбції Фрейндліха використовується переважно для діапазону середніх концентрацій. Нелійна форма ізотерми сорбції має вигляд:

$$A_{eq} = K_F \cdot C_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

де K_F– константа Фрейндліха, відносна сорбційна здатність сорбенту (мг/г або моль/г); n – показник у рівнянні Фрейндліха, який характеризує інтенсивність сорбційного процесу й розподіл активних центрів на адсорбенті.

Побудова графічної залежності рівняння лінійної форми

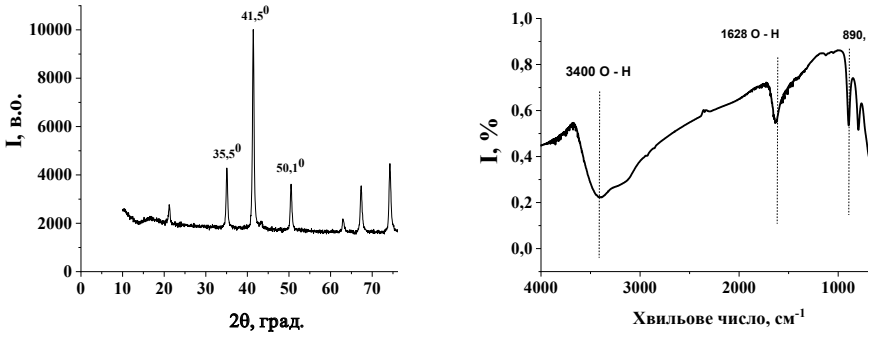
$$lnA_{eq} = lnK_F + \frac{1}{n}lnC_{eq} \quad (10)$$

у координатах $ln\ A_{eq} = f\ (ln\ C_{eq})$ дозволяє отримати відповідне лінійне рівняння та знайти K_F та n.

Результати та їх обговорення

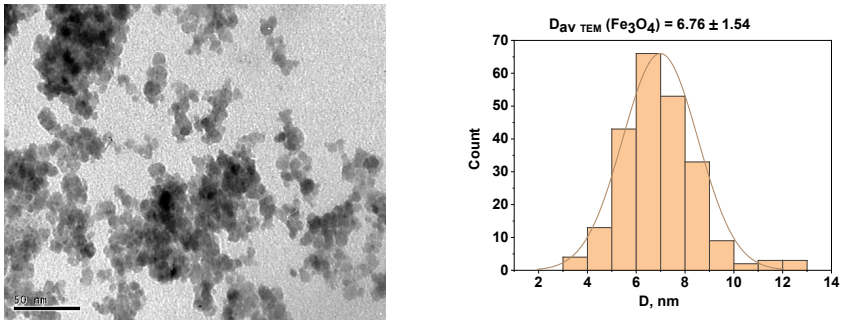
На дифрактограмах XRD (рис. 1-*а*) магнетиту спостерігаються рефлекси (за 2θ = 30,1; 35,6; 44; 53,3; 57,4; 62,8 з міжплощинними відстанями 2,96; 2,52; 2,05; 1,71; 1,60; 1,47), що відповідають кристалічній фазі магнетиту. Смуги ІЧ поглинання (рис. 1-*б*) у діапазоні 570 см $^{-1}$ (валентні коливання, пов'язані зі зв'язками Fe-O) та 790 см $^{-1}$, 890 см $^{-1}$ та 1 628 см $^{-1}$ (Fe-OH) відповідають магнетиту.

Дані ТЕМ (рис. 2-*а*) ілюструють сферичну форму НЧ із середнім діаметром 6,76 ± 1,54 нм (рис. 2-*б*) без значної агрегації.



а *б*

Рис. 1. XRD дифрактограма (а) та ІЧ-спектр (б) зразка Fe_3O_4



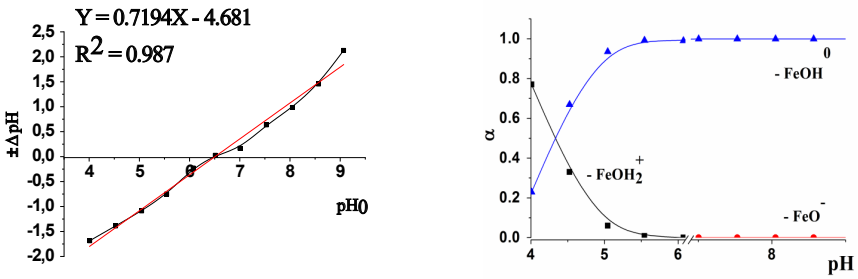
б

а

Рис. 2. ТЕМ зображення НЧ Fe_3O_4 (масштаб 50 нм) (а); гранулометричний склад (б)

Дисоціація поверхневих ≡*E-OH* груп оксидів металів, процеси сорбції іонів H^+ і OH^- у результаті гетеролітичної дисоціації молекул води або адсорбтиву в суспензіях призводять до зміни pH водної суспензії і, як наслідок, поверхневого заряду оксидів. Аналіз залежності гідролітичної сорбції дозволяє з'ясувати кислотно-основну природу поверхневих груп оксиду (Kosmulski, 2016). Так, різниця у значеннях кислотності розчинів до (pH_0) і після (pH_{eq}) гідролітичної сорбції показує зміну $\pm\rho pH$: $\pm\rho pH=pH_0-pH_{eq}$, а точка перетину прямої $\pm\rho pH=f(pH_0)$ з віссю pH_0 вказує на значення ізоелектричної точки pH_{IET} (pH, за якого спостерігається рівність сорбції іонів H^+ і OH^-). *tg* кута нахилу свідчить про обмінну ємність поверхневих груп (рис. 3-*а*). На основі одержаних експериментальних даних (Кусяк та ін., 2025) були визначені інтегральні показники кислотно-основних властивостей суспензій на основі констант іонізації поверхневих гідроксильних груп, частки негативно (a^-), позитивно (a^+) заряджених і нейтральних (a^0) груп у діапазоні pH ($a^+ -E-OH_2^+$, $a^0 -E-OH$, $a^- -E-O^-$). Розраховано значення іонної сили та коефіцієнт активності. Побудовано діаграму залежності часток поверхневих груп поверхні Fe_3O_4 від pH середовища. Так, за результатами аналізу (див. рис. 3-*а*) pH_{IET} = 6,5 – 6,8 форма кривої гідролітичної сорбції відповідає наявності на поверхні Fe_3O_4 різних типів кислотно-основних активних центрів (рис. 3-*б*).

Згідно з результатами досліджень, на поверхні Fe_3O_4 переважають нейтральні центри, які однаково характеризуються як кислотними, так і основними властивостями, що дає змогу утворювати центри кислотного й основного типів у діапазоні pH 4–9 з максимальною часткою після pH 6 (Кусяк та ін., 2025). У досліджуваному діапазоні pH частка позитивно заряджених груп *-E-OH*$_2^+$ на поверхні Fe_3O_4 зменшується зі збільшенням pH, найбільше значення 0,84 за pH 4,01, зменшується за pH 4,52. Частка негативно заряджених груп *-E-O*$^-$ на поверхні фіксується після pH 6,5 у дуже



а *б*

Рис. 3. Залежність $\pm ppH$ від pH_0 (*а*) та крива гідролітичної сорбції (*б*) для поверхні Fe_3O_4

малих кількостях: $1{,}39 \cdot 10^{-6}$ – $8{,}84 \cdot 10^{-7}$. Частка теоретично розрахованих позитивно і негативно заряджених центрів більша, ніж експериментально одержаних, оскільки нейтральні групи залежно від pH середовища беруть участь у процесах протонування або депротонування.

Значення ζ-потенціалу для НЧ Fe_3O_4 перебуває в діапазоні 28,7 ± 1,68 – 27,47 ± 2,61 mV (Kusyak et al., 2021; Kusyak et al., 2022) (рис. 4), свідчить про достатню стабільність дисперсії НЧ у діапазоні pH ~ 2-5, яка втрачається за pH ~ 7.

Кінетичні криві, основні параметри та статистичні показники залежності сорбції Ig у середовищі ФР на зразках Fe_3O_4 від часу наведені на рис. 5 та в таблиці. Значення сорбційної ємності з використанням лінійного і нелінійного моделювання псевдопершого та псевдодругого порядків, а також

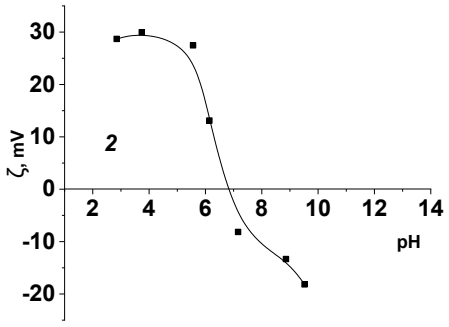
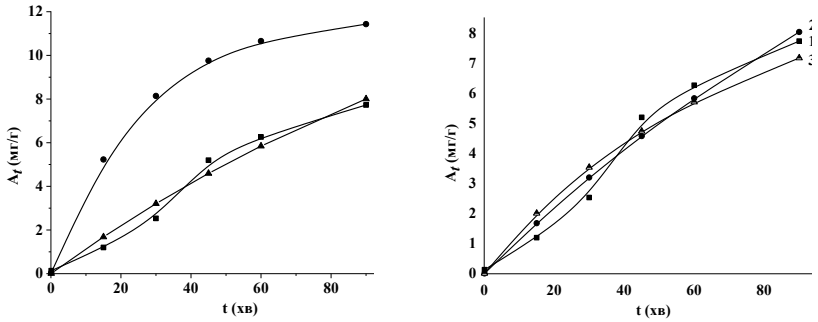


Рис. 4. Залежність електрокінетичного потенціалу НЧ Fe_3O_4 від pH



а *б*

Рис. 5. Залежність сорбції Ig у середовищі ФР на поверхні МН Fe_3O_4 від часу (pH = 6,86) у координатах моделі псевдопершого порядку (*а*) та моделі псевдодругого порядку (*б*) (C_0 = 0,6 мг/мл, T = 298 K) (*1* – експериментальна, *2* – лінійне моделювання, *3* – нелінійне моделювання)

Таблиця

Кінетичні параметри моделей псевдопершого та псевдодругого порядків сорбції Ig на поверхні МН Fe_3O_4

Кінетичні моделі порядків	**Параметри**			**Статистичні показники**		
				RSS	**x²**	**R²**
Псевдопершого	***$A_{eq,}$ (мг·г⁻¹)***	***$K_{1,}$ (хв⁻¹)***				
Нелінійне	17,8866	0,00659		1,32836	1,71343	0,97063
Лінійне	11,78003	0,03915		0,60135	0,68494	0,93035
Псевдодругого	***$A_{eq,}$ (мг·г⁻¹)***	***$K_{2,}$ (г·мг⁻¹·хв⁻¹)***	***$h_{0,}$ (мг·г⁻¹ хв⁻¹)***			
Нелінійне	32,91534	1,08964E-4	0,11805	1,35828	1,71469	0,96997
Лінійне	14,73494	7,14387E-4	0,15511	71,89169	10,0351	0,2514

статистичні показники дозволяють більш точно встановити характер сорбції препарату на поверхні зразків.

Високі значення коефіцієнта кореляції, задовільні параметри та значення $A_{теор}$, близькі до експериментально отриманих, вказують на можливість застосування кінетичної моделі псевдопершого порядку для коректного опису залежності сорбції від часу.

Результати досліджень сорбції Ig у діапазоні концентрацій 0,15–1,15 мг мл$^{-1}$ використано для побудови ізотерм, розрахунку параметрів і визначення можливого механізму сорбції за відповідністю моделям Фрейндліха та Ленгмюра (рис. 6).

Згідно з розрахованими з різних лінійних форм, відповідно до рівнянь 7 та 8, даними розбіжність між значеннями K_L та A_{max}, ізотерм Ленгмюра (відповідно криві *3* та *4*) може свідчити про нелінійність природи рівнянь, можливий вплив крайніх точок і неповне насичення або непридатність моделі Ленгмюра для даного діапазону концентрацій. Повна узгодженість одна з одною теоретичних ізотерм Фрейндліха (криві *5, 6*) та параметрів K_F і n може свідчити про придатність даної моделі для коректного опису ізотерм сорбції Ig на поверхні НЧ Fe_3O_4. Теоретичне значення A_{max} приблизно 12 мг г$^{-1}$. Показник n, розрахований з рівняння Фрейндліха, становить 1,658, відповідно, коефіцієнт неоднорідності $1/n$ поверхні адсорбенту відповідає умові $0 < 1 / n < 1$, що свідчить про неоднорідність геометрії сорбційних центрів, їхню енергетичну нееквівалентність та переважно фізичну природу сорбції.

Висновки

Комплексом фізико-хімічних методів проаналізовано морфологічні та фізико-хімічні характеристики синтезованих зразків наночастинок Fe_3O_4. Досліджено сорбційну активність поверхні наночастинок Fe_3O_4 щодо імуноглобуліну людини нормального. Проведено аналіз кінетич-

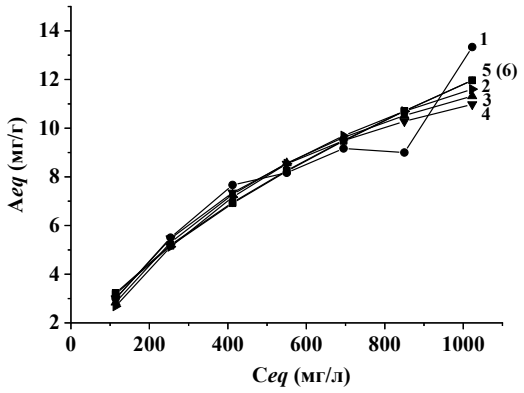


Рис. 6. Експериментальна (*1*) та теоретично розраховані (*2-6*) ізотерми сорбції Ig на поверхні МН Fe_3O_4 (C_0 = 0,15–1,15 мг/мл, T = 298 К), одержані з використанням констант Ленгмюра (*2–4*) та Фрейндліха (*5,6*) (*2, 5* – нелінійне моделювання, *3, 4, 6* – лінійне моделювання)

них залежностей (моделі псевдопершого та псевдодругого порядків) та ізотерм сорбції (моделі Ленгмюра та Фрейндліха) Ig з використанням лінійного та нелінійного моделювання. Одержані параметри вказують на можливість застосування кінетичної моделі псевдопершого порядку для коректного опису залежності сорбції від часу та придатності моделі Фрейндліха для ізотерм сорбції Ig на поверхні Fe_3O_4. Максимальна сорбційна ємність (A_{max}) становить 12 мг·г$^{-1}$. Показник Фрейндліха n (1,658) свідчить про неоднорідність геометрії сорбційних центрів, їхню енергетичну нееквівалентність та переважно фізичну природу сорбції.

Список використаної літератури

Кусяк Н.В., Свиридюк К.П., Кичкирук О.Ю., Листван В.В., Горбик П.П. Кислотно-основні властивості поверхні нанорозмірного Fe_3O_4. *Український журнал природничих наук.* 2025. № 12. С. 138–145. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.13

Abarca-Cabrera L., Fraga-García P., Berensmeier S. Bio-nano interactions: binding proteins, polysaccharides, lipids and nucleic acids onto magnetic nanoparticles. *Biomaterials Research.* 2021. Vol. 25. № 1. P. 12. https://doi.org/10.1186/s40824-021-00212-y

Auría-Soro C., Nesma T., Juanes-Velasco P., Landeira-Viñuela A., Fidalgo-Gomez H., Acebes-Fernandez V., Gongora R., Almendral Parra M.J., Manzano-Roman R., Fuentes M. Interactions of nanoparticles and biosystems: microenvironment of nanoparticles and biomolecules in nanomedicine. *Nanomaterials (Basel).* 2019. Vol. 9. P. 1365–1385. https://doi.org/10.3390/nano9101365

Bayramoglu G., Salih B., Arica M.Y. Catalytic activity of immobilized chymotrypsin on hybrid silica-magnetic biocompatible particles and its application in peptide synthesis. *Applied Biochemistry and Biotechnology.* 2019. Vol. 190. P. 1224–124. https://doi.org/10.1007/s12010-019-03158-z

Blank-Shim S.A., Schwaminger S.P., Borkowska-Panek M. et al. Binding patterns of homo-peptides on bare magnetic nanoparticles: insights into environmental dependence. *Scientific Reports.* 2017. Vol. 7. № 1. P. 14047. https://doi.org/10.1038/s41598-017-13928-6

Cao L., Zhao Y., Chu Z., Zhang X., Zhang W. Core-shell magnetic bimetallic MOF material for synergistic enrichment of phosphopeptides. *Talanta.* 2020. Vol. 206. P. 120165. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120165

Islam M.M., Akter L., Pervez A.K.M.K., Nabi M.N., Uddin M.M., Arifin Z. Application of combined SWOT and AHP for strategy development: evidence from pottery industry of Bangladesh. *Asian Journal of Management.* 2020. Vol. 11. № 1. P. 30–39. https://doi.org/10.18488/journal.1005/2020.10.1/1005.1.81.94

Jofre C.F., Regiart M., Fernández-Baldo M.A., Bertotti M., Raba J., Messina G.A. Electrochemical microfluidic immunosensor based on TES-AuNPs@Fe_3O_4 and CMK-8 for IgG anti-Toxocara canis determination. *Analytica Chimica Acta.* 2020. Vol. 1096. P. 120–129. https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.10.040

Kaveh-Baghbaderani Y., Allgayer R., Schwaminger S.P., Fraga-García P., Berensmeier S. Magnetic separation of antibodies with high binding capacity by site-directed immobilization of Protein A-domains to bare iron oxide nanoparticles. *ACS Applied Nano Materials.* 2021. Vol. 4. № 5. P. 4956–4963. https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00487

Khuyen H.T., Huong T.T., Huong N.T., Ha V.T.T., Van N.D., Nghia V.X., Anh T.K., Minh L.Q. Luminescence properties of a nanotheranostics based on a multifunctional Fe_3O_4/Au/Eu[1-(2-naphthoyl)-3,3,3-trifluoroacetone]$_3$ nanocomposite. *Optical Materials.* 2020. Vol. 109. P. 110229. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110229

Kosmulski M. Isoelectric points and points of zero charge of metal (hydr)oxides: 50 years after Parks' review. *Advances in Colloid and Interface Science.* 2016. Vol. 238. P. 1–61. https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.10.005

Kusyak N., Behunova D. M., Yankovych H., Kusyak A., Findoráková L., Melnyk I. Specific aspects of human immunoglobulin interactions with Fe_3O_4/≡Si$(CH_2)_3NH_2$ nanocomposite surface. *Applied Nanoscience.* 2023. Vol. 13. P. 7219–7230. https://doi.org/10.1007/s13204-023-02883-6

Kusyak N., Kusyak A., Petranovska A. et al. Features of adsorption of human Ig on the surface of magnetically sensitive nanocomposites. *Applied Nanoscience.* 2022. Vol. 12. P. 679–689. https://doi.org/10.1007/s13204-021-01692-z

Kusyak N.V., Kusyak A.P., Svyrydiuk K.P., Petranovska A.L., & Gorbyk P.P. Evaluation of the acid–base surface properties of nanoscale Fe_3O_4 and Fe_3O_4/SiO_2 by potentiometric method. *Molecular*

Crystals and Liquid Crystals. 2021. Vol. 719. P. 140–152. https://doi.org/10.1080/15421406.2021.1878744

Martins P.M., Lima A.C., Ribeiro S., Lanceros-Mendez S., Martins P. Magnetic nanoparticles for biomedical applications: from the soul of the Earth to the deep history of ourselves. *ACS Applied Bio Materials.* 2021. Vol. 4. № 8. P. 5839–5870. https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00440

Peng Y., Chen L., Ye S., Kang Y., Liu J., Zeng S., Yu L. Research and development of drug delivery systems based on drug transporter and nano-formulation. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences.* 2020. Vol. 15. № 2. P. 220–236. https://doi.org/10.1016/j.ajps.2020.02.004

Peng Z., Liu X., Zhang W., Zeng Z., Liu Z., Zhang C., Liu Y., Shao B., Liang Q., Tang W., Yuan X. Advances in the application, toxicity and degradation of carbon nanomaterials in environment: A review. *Environment International.* 2020. Vol. 134. P. 105298. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105298

Shalmani A.A., Sarihi P., Raoufi M. Nanoparticles and biological environment interactions. In: Rahmandoust M., Ayatollahi M. (eds) Nanomaterials for *Advanced Biological Applications. Advanced Structured Materials.* Springer : Cham, 2019. Vol. 104. P. 1–17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10834-2_1

Tian S., Jiang J., Zang S., Wang K., Yu Y., Li X., Zhang H., Yu A., Zhang Z. Determination of IgG by electron spin resonance spectroscopy using Fe_3O_4 nanoparticles as probe. *Microchemical Journal.* 2018. Vol. 141. P. 444–450. https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.06.001

Vega-Vásquez P., Mosier N.S., Irudayaraj J. Nanoscale drug delivery systems: from medicine to agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.* 2020. Vol. 8. P. 79. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00079

References

Kusyak, N.V., Svyrydiuk, K.P., Kychkyruk, O.Yu., Lystvan, V.V., & Gorbyk P.P. (2025). Acid-base properties of nanoscale Fe_3O_4 surface. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 12, 138–145. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.13 [in Ukrainian].

Abarca-Cabrera, L., Fraga-García, P., & Berensmeier, S. (2021). Bio-nano interactions: binding proteins, polysaccharides, lipids and nucleic acids onto magnetic nanoparticles. *Biomaterials Research,* 25(1), 12. https://doi.org/10.1186/s40824-021-00212-y [in English].

Auría-Soro, C., Nesma, T., Juanes-Velasco, P., Landeira-Viñuela, P., Fidalgo-Gomez, A., Acebes-Fernandez, H., Gongora, V.R., Almendral Parra, M.J., Manzano-Roman, R., & Fuentes, M. (2019). Interactions of nanoparticles and biosystems: microenvironment of nanoparticles and biomolecules in nanomedicine. *Nanomaterials (Basel),* 9, 1365–1385. https://doi.org/10.3390/nano9101365 [in English].

Bayramoglu, G., Salih, B., & Arica, M.Y. (2019). Catalytic activity of immobilized chymotrypsin on hybrid silica-magnetic biocompatible particles and its application in peptide synthesis. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 190, 1224–124. https://doi.org/10.1007/s12010-019-03158-z [in English].

Blank-Shim, S.A., Schwaminger, S.P., & Borkowska-Panek, M. (2017). Binding patterns of homo-peptides on bare magnetic nanoparticles: insights into environmental dependence. *Scientific Reports,* 7(1), 14047. https://doi.org/10.1038/s41598-017-13928-6 [in English].

Cao, L., Zhao, Y., Chu, Z., Zhang, X., & Zhang, W. (2020). Core-shell magnetic bimetallic MOF material for synergistic enrichment of phosphopeptides. *Talanta*, 206, 120165. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120165 [in English].

Islam, M.M., Akter, L., Pervez, A.K.M.K., Nabi, M.N., Uddin, M.M., & Arifin, Z. (2020). Application of combined SWOT and AHP for strategy development: evidence from pottery industry of Bangladesh. *Asian Journal of Management,* 11(1), 30–39. https://doi.org/10.18488/journal.1005/2020.10.1/1005.1.81.94 [in English].

Jofre, C.F., Regiart, M., Fernández-Baldo, M.A., Bertotti, M., Raba, J., & Messina, G.A. (2020). Electrochemical microfluidic immunosensor based on TES-AuNPs@Fe_3O_4 and CMK-8 for IgG anti-Toxocara canis determination. *Analytica Chimica Acta,* 1096, 120–129. https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.10.040 [in English].

Kaveh-Baghbaderani, Y., Allgayer, R., Schwaminger, S.P., Fraga-García, P., & Berensmeier, S. (2021). Magnetic separation of antibodies with high binding capacity by site-directed immobilization of Protein A-domains to bare iron oxide nanoparticles. *ACS Applied Nano Materials,* 4(5), 4956–4963. https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00487 [in English].

Khuyen, H.T., Huong, T.T., Huong, N.T., Ha, V.T.T., Van, N.D., Nghia, V.X., Anh, T.K., & Minh L.Q. (2020). Luminescence properties of a nanotheranostics based on a multifunctional Fe_3O_4/Au/Eu[1-(2-naphthoyl)-3,3,3-trifluoroacetone]$_3$ nanocomposite. *Optical Materials,* 109, 110229. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110229 [in English].

Kosmulski, M. (2016). Isoelectric points and points of zero charge of metal (hydr)oxides: 50 years after Parks' review *Advances in Colloid and Interface Science,* 238, 1–61. https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.10.005 [in English].

Kusyak, N., Behunova, D., Yankovych, H., Kusyak, A., Findoráková, L., & Melnyk, I. (2023) Specific aspects of human immunoglobulin interactions with Fe_3O_4/≡Si$(CH_2)_3NH_2$ nanocomposite surface. *Applied Nanoscience*, 13, 7219–7230. https://doi.org/10.1007/s13204-023-02883-6 [in English].

Kusyak, N., Kusyak, A., Petranovska, A., Gorbyk, P. & Abramov, N. (2022) Features of adsorption of human Ig on the surface of magnetically sensitive nanocomposites. *Applied Nanoscience*, 12, 679–689. https://doi.org/10.1007/s13204-021-01692-z [in English].

Kusyak, N.V., Kusyak, A.P., Svyrydiuk, K.P., Petranovska, A.L., & Gorbyk, P.P. (2021). Evaluation of the acid–base surface properties of nanoscale Fe_3O_4 and Fe_3O_4/SiO_2 by potentiometric method. *Molecular Crystals and Liquid Crystals.* 719, 140–152. https://doi.org/10.1080/15421406.2021.1878744 [in English].

Martins, P.M., Lima, A.C., Ribeiro, S., Lanceros-Mendez, S., & Martins, P. (2021). Magnetic nanoparticles for biomedical applications: from the soul of the Earth to the deep history of ourselves. *ACS Applied Bio Materials,* 4 (8), 5839–5870. https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00440 [in English].

Peng, Y., Chen, L., Ye, S., Kang, Y., Liu, J., Zeng, S., & Yu, L. (2020). Research and development of drug delivery systems based on drug transporter and nano-formulation. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences,* 15(2), 220–236. https://doi.org/10.1016/j.ajps.2020.02.004 [in English].

Peng, Z., Liu, X., Zhang, W., Zeng, Z., Liu, Z., Zhang, C., Liu, Y., Shao, B., Liang, Q., Tang, W., & Yuan, X. (2020). Advances in the application, toxicity and degradation of carbon nanomaterials in environment: A review. *Environment International,* 134, 105298. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105298 [in English].

Shalmani, A.A., Sarihi, P., & Raoufi, M. (2019). Nanoparticles and biological environment interactions. In: Rahmandoust M., Ayatollahi M. (eds) *Nanomaterials for Advanced Biological Applications. Advanced Structured Materials*, Springer, Cham, 104, 1–17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10834-2_1 [in English].

Tian, S., Jiang, J., Zang, S., Wang, K., Yu, Y., Li, X., Zhang, H., Yu, A., & Zhang, Z. (2018). Determination of IgG by electron spin resonance spectroscopy using Fe_3O_4 nanoparticles as probe. *Microchemical Journal,* 141, 444–450. https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.06.001 [in English].

Vega-Vásquez, P., Mosier, N.S., & Irudayaraj, J. (2020). Nanoscale drug delivery systems: from medicine to agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,* 8, 79. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00079 [in English].

Отримано: 03.11.2025
Прийнято: 05.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 547.279
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.14

МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ВІЛЬЯМСОНА У СИНТЕЗІ НОВИХ ТІОЕТЕРІВ

В. В. Листван[1]

Досліджено можливість використання модифікованого варіанту реакції Вільямсона, що полягає у взаємодії тіолів із заміщеними алкілгалогенідами у присутності основи без проміжного виділення тіолятів, для одержання нових сполук, що поєднують сульфідний зв'язок із функціональними групами інших типів. Тіоетери відомі своєю різнобічною біологічною активністю: протипухлинною дією, антимікробною та противірусною, антиоксидантною активністю тощо. Значна частина використовуваних методів отримання тіоетерів потребує застосування сильних основ, чутливих до вологи літійорганічних сполук чи реактивів Гріньяра, металоорганічних каталізаторів тощо. Усе це ускладнює методику синтезу й обмежує можливості його практичного застосування. Взаємодія тіолятів як нуклеофільних реагентів з алкілгалогенідами залишається простим і доступним методом синтезу тіоетерів. Використання як реагентів тіолів і галогенопохідних у присутності еквімольної кількості лугу дозволяє спростити методику синтезу, уникнути виділення меркаптидів у вільному стані. Одна із груп отриманих тіоетерів містить ацетаніліднийний фрагмент. Похідні ацетаніліду відомі широким спектром своєї біологічної дії, зокрема антипіретичною, антимікробною, протизапальною, протипухлинною, антигіперглікемічною активністю. Поєднання даного фрагмента з тіоетерною групою робить отримані продукти перспективними з погляду подальшого дослідження їхньої біологічної активності. Іншим напрямом дослідження стало алкілування 2-меркаптобензоксазолу з утворенням сульфідів, що містять бензоксазольний фрагмент. Похідні цього гетероциклу цікаві як потенційні протипухлинні, антибактеріальні, антивірусні, фунгіцидні агенти тощо. Описаний метод виявився придатним також для отримання похідних бензотіазолу. Сполуки з бензотіазольним фрагментом відомі передусім завдяки своїй протипухлинній активності, проте вони мають перспективи застосування і в інших сферах медицини, зокрема в кардіології.

Ключові слова: *тіоетер, сульфід, сульфон, нуклеофільне заміщення, реакція Вільямсона.*

MODIFIED WILLIAMSON METHOD IN THE SYNTHESIS OF NEW THIOETHERS

V. V. Lystvan

The possibility of the application of a modified version of the Williamson reaction, that involves the interaction of thiols with substituted alkyl halides in the presence of a base without the intermediate isolation of thiolates, has been investigated to obtain new compounds that combine a sulfide bond with

[1] кандидат хімічних наук,
доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: listvan@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8366-2813

other types of functional groups. Thioethers are known for their diverse biological activities, including antitumor, antimicrobial, antiviral, antioxidant effects etc. Many of the commonly used methods for obtaining thioethers require strong bases, moisture-sensitive organolithium compounds or Grignard reagents or organometallic catalysts, which complicate the synthesis procedure and limit its practical applicability. The reaction of thiolates as nucleophilic reagents with alkyl halides remains a simple and accessible method for the synthesis of thioethers. An application of thiols and halogen derivatives as reagents in the presence of an equimolar amount of alkali simplifies the synthesis procedure and avoids the isolation of mercaptides in an individual state. One group of the obtained thioethers contains an acetanilide fragment. Acetanilide derivatives are known for their wide range of biological activities, including antipyretic, antimicrobial, anti-inflammatory, antitumor, and antihyperglycemic effects. The combination of this fragment with a thioether group makes the obtained products promising for further investigation of their biological activity. Another direction of the study was the alkylation of 2-mercaptobenzoxazole, leading to the formation of sulfides containing a benzoxazole fragment. Derivatives of this heterocycle are of interest as potential antitumor, antibacterial, antiviral, and fungicidal agents. The described method also proved suitable for obtaining benzothiazole derivatives. Compounds containing a benzothiazole fragment are primarily known for their antitumor activity, but they also show promise in other fields of medicine, particularly in cardiology.

Key words: *thioether, sulfide, sulphon, nucleophilic substitution, Williamson reaction.*

Вступ

Тіоетери. Тіоетери, або органічні сульфіди, – речовини, що містять двокоординований атом Сульфуру, сполучений із двома аліфатичними або ароматичними залишками. Сульфідний зв'язок R-S-R відіграє важливу роль у живих організмах, зокрема, входить до складу однієї зі стандартних амінокислот – метіоніну, а також деяких ферментів, зокрема як фрагмент коферменту біотину, що відіграє важливу роль у різноманітних метаболічних процесах. Сполуки, що містять сульфідні фрагменти, мають цінну біологічну активність і можуть застосовуватись як лікарські засоби. Зокрема, завдяки своїй цитотоксичності вони мають виражену протиракову активність (Han & Küçükgüzel, 2022; Zheng et al., 2023). Зокрема, ефективна протипухлинна дія притаманна комплексним сполукам Паладію(II) з тіоетерними лігандами (Naskar et al., 2022). Похідні флавоноїду миріцетину з тіоетерним фрагментом виявили помітну антимікробну та противірусну активність (Ruan et al., 2018; Liu et al., 2022). Похідні пірокатехолу, що містять алкілтіо- й арилтіогрупи, за даними DPPH-тесту, виявили помітну антиоксидантну (антирадикальну) активність (Smolyaninov et al., 2018).

Сільське господарство та ветеринарія – інша сфера потенційного застосування органічних сульфідів, точніше сполук, що містять у складі молекули тіоетерні групи. Модифікування відомого антибіотика плевромутиліну, що застосовується у ветеринарній медицині, шляхом уведення до складу молекули тіоетерної групи значно підвищує його антимікробну активність (Mu et al., 2017).

Похідні імідазотіодіазолу, що містять тіоетерний фрагмент, виявили помітну фунгіцидну дію (Tunel et al., 2021), що робить перспективним його дослідження як потенційного засобу захисту рослин. У цьому ж напрямі – пошуку нових перспективних пестицидів – досліджувались нові похідні піримідину, що містять сульфонатні групи. Їх модифікування через уведення сульфідного фрагмента розширило спектр їхньої антибактеріальної та інсектицидної дії (Li et al., 2023). Аналогічний вплив мало також уведення тіоетерної групи до складу похідних 1,3,4-оксадіазолу (Song et al., 2018).

Можливості практичного застосування тіоетерів значно розширюються завдяки їхній здатності окиснюватись з утворенням сульфоксидів і сульфонів. Сульфоксидний фрагмент входить до складу молекул деяких біологічно активних природних сполук, наприклад сульфорафану, що міститься в різних видах капусти та редиски й має протизапальну й антиоксидантну дію, аліїну, що міститься в часнику й також виявляє антиоксидантну активність. Варто згадати також широковідомі синтетичні препарати Омепразол (рацемат) та його S-ізомер Езомепразол, що належать до інгібіторів протонної помпи й активно застосовуються в гастроентерології. Натомість препарати – похідні сульфонів натепер не дістали широкого розповсюдження у фармакології, помітно поступаючись активністю сульфонамідам, їх представники, однак, присутні на фармацевтичному ринку завдяки антибактеріальним властивостям, зокрема, відомі такі препарати, як Дапсон (протилепрозна й антипротозойна дія) і Промін

(антималярійна, протитуберкульозна та протилепрозна дія).

Отримання тіоетерів. Найчастіше тіоетери отримують шляхом алкілування тіолів за загальною схемою:

$$R\text{-}SH + R'\text{-}X \rightarrow R\text{-}S\text{-}R' + HX.$$

У ролі алкілуючих агентів найчастіше використовуються алкілгалогеніди, можуть однак застосовуватись також діалкілсульфати, епоксиди чи азиридини. Для одержання ароматичних тіоетерів як арилюючі реагенти можна використовувати солі діазонію:

$$Ar\text{-}S^- + Ar'\text{-}N{\equiv}N^+ \rightarrow Ar\text{-}S\text{-}Ar' + N_2.$$

Подібним чином дисульфіди можуть утворювати тіоетери, реагуючи з літій- чи магнійорганічними сполуками:

$$R_1S\text{-}SR_2 + R_3CLi \rightarrow R_1CSR_3 + R_2SLi.$$

Широке розповсюдження протягом останніх років набув інший метод отримання тіоетерів, що полягає у приєднанні тіолів до алкенового подвійного зв'язку (Cramer & Bowman, 2017):

$$R\text{-}CH{=}CH_2 + H\text{-}SR' \rightarrow R\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}S\text{-}R'.$$

Реакція цікава тим, що може відбуватись за радикальним або іонним механізмами. У першому випадку ініціювання реакції відбувається під впливом типових для радикальних реакцій факторів, як-от: яскраве світло (або УФ-випромінювання), висока температура чи додання в ролі ініціаторів сполук, що є джерелами вільних радикалів. Реакція характеризується високою стереоселективністю, приєднання відбувається проти правила Марковнікова (Sinha & Equbal, 2018). Іншим варіантом приєднання є реакція Міхаеля (Chauhan et al., 2014), що, хоча й відбувається за іншим механізмом, приводить однак до аналогічних результатів (приєднання проти правила Марковнікова) (Nair et al., 2014).

Існують також інші методи одержання органічних сульфідів, зокрема, перегрупування за Пумерером (Zhao et al., 2025), декарбонілування тіолестерів тощо. Значна частина використовуваних методів передбачає застосування сильних основ, чутливих до вологи літійорганічних сполук чи реактивів Гріньяра, металоорганічних каталізаторів тощо. Усе це ускладнює методику синтезу й обмежує можливості його практичного застосування.

Реакція Вільямсона, що полягає у взаємодії алкоголятів і фенолятів як нуклеофільних реагентів з алкілгалогенідами, залишається простим і доступним методом синтезу етерів. Цей же метод може бути застосований і для синтезу їх тіоаналогів. Зазвичай як нуклеофільні реагенти використовують тіоли чи тіоляти. У першому випадку реакція іде повільно через недостатню нуклеофільність тіоспиртів, другий потребує попереднього отримання і виділення тіолятів, що підвищує працемісткість методу. Поєднати переваги обох методів можна шляхом використання як реагентів тіолів і галогенопохідних у присутності еквімольної кількості лугу, що дозволяє уникнути виділення меркаптидів у вільному стані.

Матеріал і методи

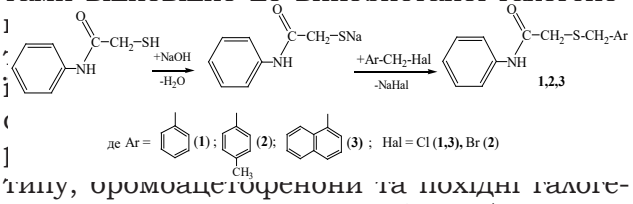
У даній роботі показана можливість використання модифікованого варіанту реакції Вільямсона, що полягає у взаємодії тіолів із заміщеними алкілгалогенідами у присутності основи без проміжного виділення тіолятів, для одержання нових сполук, що поєднують сульфідний зв'язок із функціональними групами інших типів. Отримані тіоетери можуть слугувати напівпродуктами для подальшого перетворення на відповідні сульфоксиди чи сульфони, або бути перспективними об'єктами дослідження з огляду на потенційну біологічну активність.

Результати та їх обговорення

Для отримання диалкіл-, алкіларил- чи алкілгетарилсульфідів ми використовували алкілування тіолятів, що утворюються безпосередньо в реакційній суміші за дії лугу на відповідні тіоли. Меркаптан попередньо розчиняли у спирті (зазвичай 2-пропанолі) або диметилформаміді; далі додавали натрій гідроксид. З'ясувалось, що останній можна використовувати або у дрібно розтертому кристалічному стані або як водний розчин, що не впливає суттєво на вихід продукту реакції. До підігрітої реакційної суміші додавали галогенопохідну, розчин нагрівали протягом 0,5–3 годин, залежно від застосованого алкілгалогеніду. Отримані продукти осаджували зі спиртового розчину водою, відфільтровували й очищували перекристалізацією.

Першою групою отриманих продуктів реакції Вільямсона були похідні меркаптоацетаніліду. Похідні ацетаніліду вже більше ста років досліджуються з огляду на їхні цінні біологічні властивості. Сам фенілацетамід використовувався свого часу в лікарській практиці як антипіретик. Пізніше серед його похідних виявлено речовини з антимікробною, протизапальною, про-

типухлинною, антигіперглікемічною дією, періодично з'являються повідомлення про нові виявлені види біологічної активності (Singh et al., 2019). Тож поєднання даного фрагмента в молекулі з тіоетерною групою, а також іншими структурними фрагментами відповідно до використаної галогено-

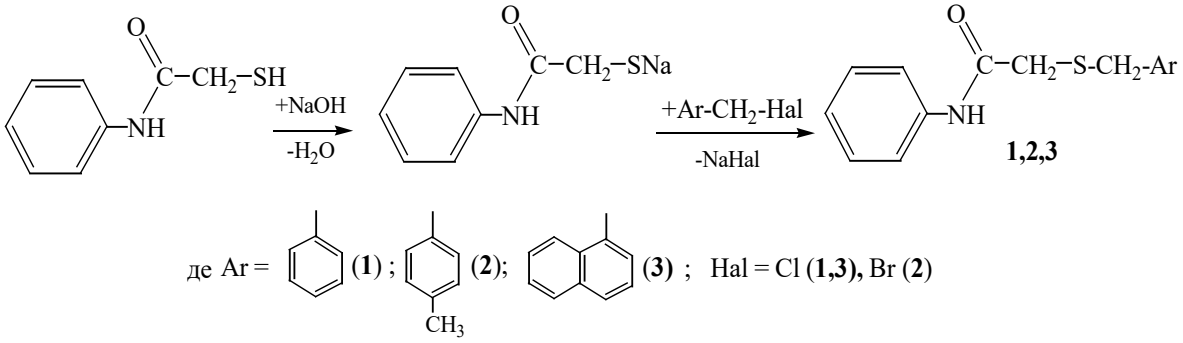


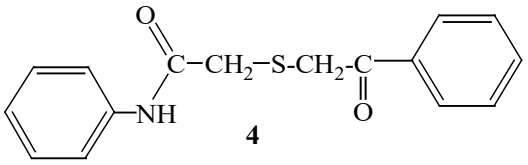
типу, бромоацетофенони та похідні галогеноцтової кислоти. Взаємодія з бензилхлоридом, 4-(хлорометил)толуеном та 1-(хлорометил)нафталеном дозволила отримати продукти **1–3** – безбарвні кристалічні сполуки, нерозчинні у воді:

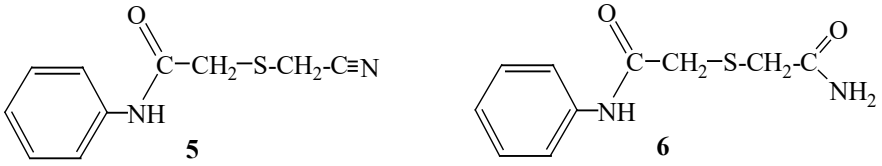
Реакція з бромоацетофеноном приводить до утворення похідної **4**:

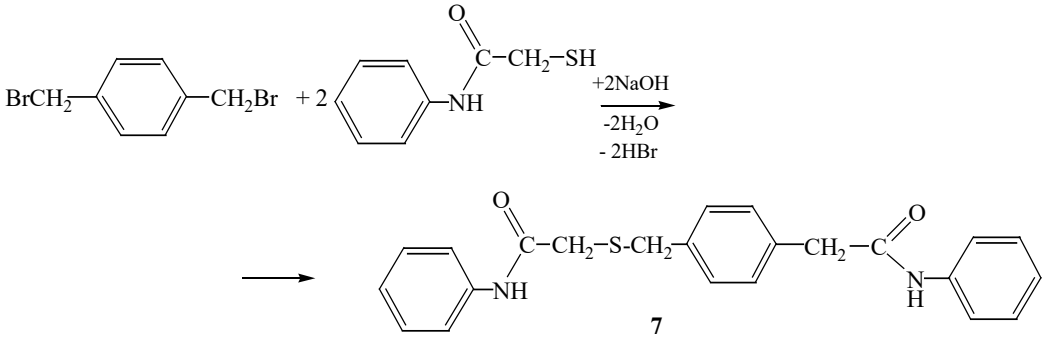
Застосування хлороацетонітрилу дозволило одержати продукт **5**, що поєднує в молекулі амідний, сульфідний та нітрильний фрагменти, натомість реакція із хлороацетамідом приводить до утворення сульфіду із двома амідними групами **6**:

Окремо варто відзначити взаємодію подвійної кількості меркаптоацетаніліду з 1,4-біс(хлорометил)бензену. У результаті реакції було отримано похідну симетричної будови **7**, що містить дві сульфідні та дві анілідні групи:









Будова отриманих речовин підтверджена даними ПМР-спектроскопії.

Іншим напрямом синтезу заміщених тіоетерів із застосуванням реакції Вільямсона стало одержання похідних, що поєднують сульфідний фрагмент з бензоксазольним. Похідні бензоксазолу відомі завдяки широкому спектру своєї біологічної активності. Зокрема, серед них виявлено сполуки із протипухлинною дією (Ghoshal & Patel, 2015), антибактеріальною, антивірусною, фунгіцидною дією тощо (Sattar et al., 2020).

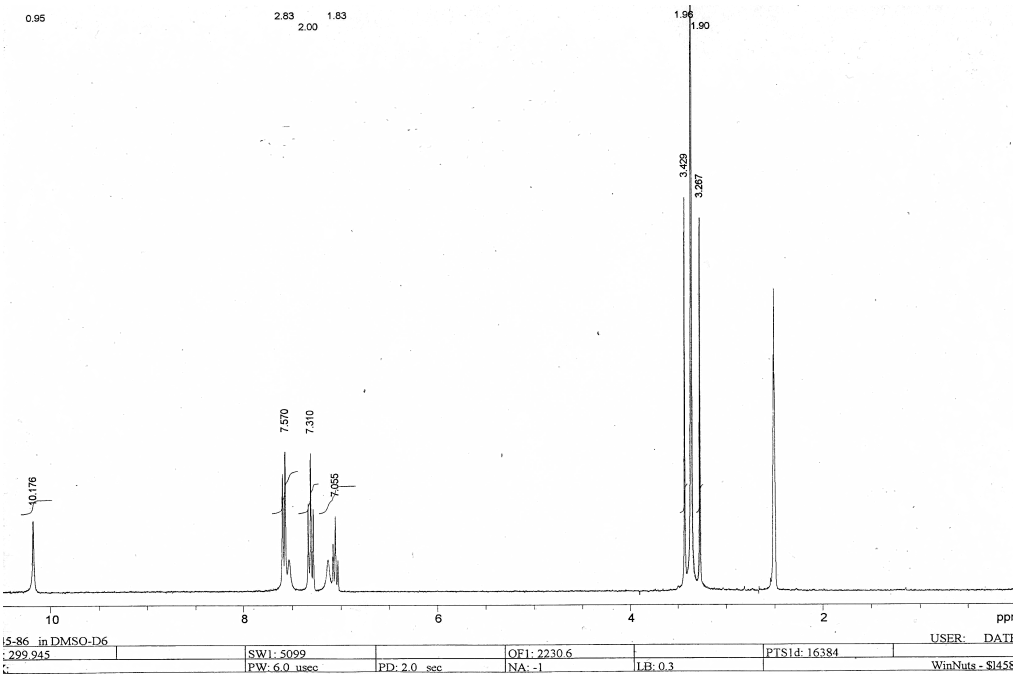
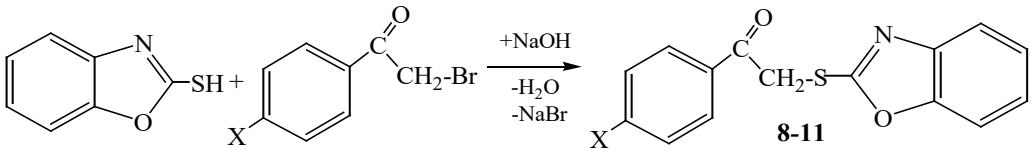


Рис. 1. Спектр ПМР карбамоїлметилтіоацетаніліду **(6)**

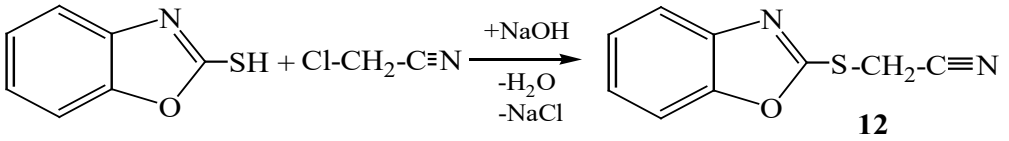
Як вихідний тіол для алкілування ми використовували 2-меркаптобензоксазол. Реакція відбувалась переважно з додаванням до реакційної суміші твердого дрібно розтертого NaOH і приводила до утворення кристалічних, малорозчинних у воді продуктів. На відміну від похідних меркаптоацетаніліду, отримані бензоксазоли мали забарвлення від світло-жовтого до коричневого. Варто також відзначити кращий вихід продуктів реакції порівняно з анілідами.

Так, наприклад, меркаптобензоксазол реагує у присутності лугу із заміщеними бромоацетофенонами з утворенням сульфідів **8–11**:

Реакція із хлороацетонітрилом приводить до утворення нітрилу **12**:



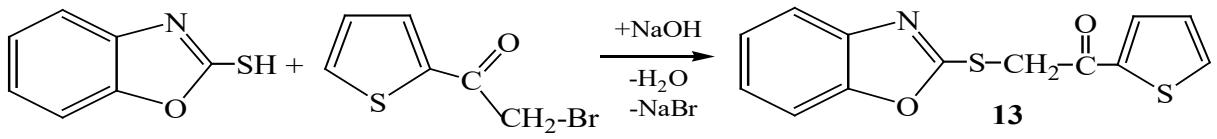
де X = H (**8**), Cl (**9**), Br (**10**), NO_2 (**11**)



Взаємодія вихідного тіолу із хлороацетилтіофеном дає продукт **13**, що поєднує в молекулі два гетероциклічні фрагменти:

Будова отриманих похідних оксазолу підтверджена даними спектрів ЯМР.

Описаний метод виявився придатним також для отримання похідних бензотіазолу. Сполуки з бензотіазольним фрагментом відомі передусім завдяки своїй протипухлинній активності, проте вони мають



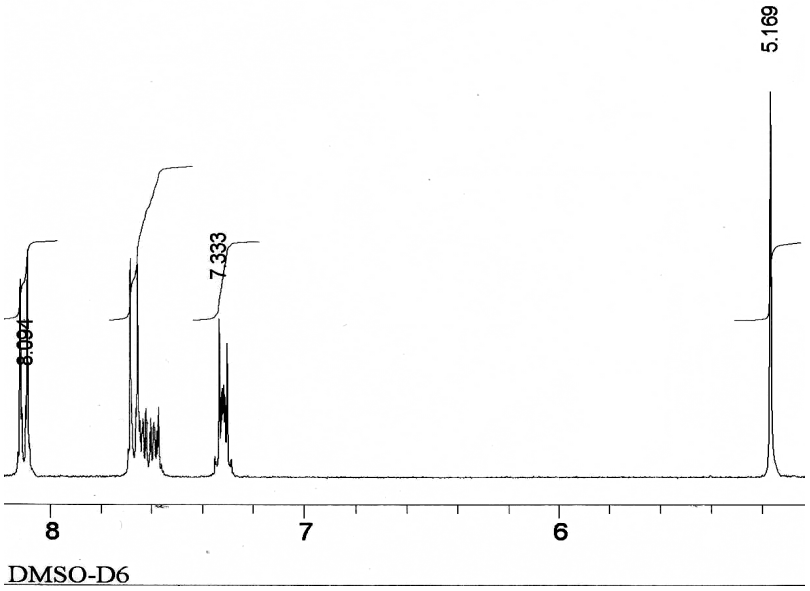


Рис. 2. Спектр ПМР 2-(4-хлоробензоїлметилтіо)бензоксазолу (**9**)

перспективи застосування і в інших сферах медицини, зокрема в кардіології (Yadav et al., 2023).

Під час взаємодії 2-меркаптобензотіазолу із хлороацетамідом утворився (2-бензотіазолілтіо)ацетамід **14**:

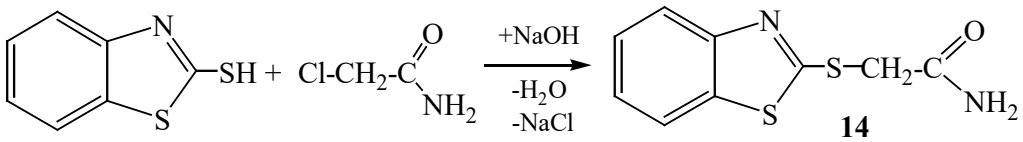
Експериментальна частина

Загальна методика одержання похідних меркаптоацетаніліду

(сполуки 1–7)

До розчину 0,005 моль (0,84 г) меркаптоацетаніліду в 15 мл 2-пропанолу додавали 0,6 мл 10 н NaOH. До отриманого розчину додавали під час нагрівання еквімольну кількість відповідного галогеніду, реакційну суміш кип'ятили протягом 1,5 год. Після охолодження до розчину додавали 10 мл води до розчинення натрій галогеніду. Під час подальшого охолодження випадав оліїстий осад, що поступово кристалізувався. Отриманий продукт відфільтровували, промивали й очищували кристалізацією із CCl_4.

У разі біс-сульфіду (**7**) використовували подвійну кількість (0,01 моль) тіолу і 0,005 моль галогенопохідної; продукт кристалізували з етилацетату.



Характеристики отриманих сполук (1–7):

Бензилтіоацетанілід (1): Mr – 257,35; m – 0,73 г; Тпл 73–74°; η – 57%;

(4-Метилбензилтіо)ацетанілід (2): Mr – 271,40; m – 0,72 г; Тпл 71–72°; η – 53%;

α-Нафтилметилтіоацетанілід (3): Mr – 307,41; m – 0,74 г; Тпл 119–120°; η – 48%;

Бензоїлметилтіоацетанілід (4): Mr – 285,36; m – 0,90 г; Тпл 94–95°; η – 63%;

Ціанометилтіоацетанілід (5): Mr – 206,26; m – 0,54 г; Тпл 83–84°; η – 52%;

Карбамоїлметилтіоацетанілід (6): Mr – 224,28; m – 0,55 г; Тпл 125–126°; η – 49%;

Біс(N-фенілкарбамоїлметилтіометил)-4-фенілен: Mr – 436,52; m – 0,79 г; Тпл 171–172°; η – 36%.

Загальна методика одержання похідних бензотіазолу (сполуки 8–13):

0,005 моль (0,75 г) 2-меркаптобензоксазолу розчиняли у 20 мл 2-пропанолу, до розчину додавали при перемішуванні еквімольну кількість дрібно розтертого кристалічного NaOH. До реакційної суміші порціями додавали 0,005 моль галогенопохідної, після чого кип'ятили протягом 3 год. Після часткового охолодження додавали 8 мл води. Продукт, що поступово випадав в осад, відфільтровували, сушили та кристалізували із CCl_4.

Характеристики отриманих сполук (8–13):

2-(Бензоїлметилтіо)бензоксазол (8): Mr – 269,32; m – 1,05 г; Тпл 116°; η – 78%;

2-(4-Хлоробензоїлметилтіо)бензоксазол (9): Mr – 303,76; m – 1,14 г; Тпл 122–123°; η – 75%;

2-(4-Бромобензоїлметилтіо)бензоксазол (10): Mr – 348,22; m – 1,31 г; Тпл 131–132°; η – 75%;

2-(4-Нітробензоїлметилтіо)бензоксазол (11): Mr – 314,32; m – 1,57г; Тпл 144–145°; η – 76%;

2-(Ціанометилтіо)бензоксазол (12): Mr – 190,22; m – 0,57 г; Тпл 93–94°; η – 60%;

2-(Тієнілметилтіо)бензоксазол (13): Mr – 275,34; m – 0,73 г; Тпл 89–90°; η – 53%.

Одержання 2-(карбамоїлметилтіо)бензотіазолу (14)

До суспензії 0,01 моль (1,7 г) 2-меркаптобензотіазолу у 15 мл 2-пропанолу додали 1,3 мл 10 н розчину NaOH. Тіол розчинився, утворюючи тіолят. До розчину додали 1 г хлороацетаміду, реакційну суміш нагрівали протягом 30 хв. До охолодженого розчину додали порціями 6 мл води. Продукт реакції, що випав в осад, промивали водним етанолом, сушили та кристалізували з етилацетату.

Характеристики сполуки (14): Mr – 224,30; m – 0,57 г; Тпл 144–145°; η – 51%.

Висновки

Досліджено можливість використання модифікованого варіанту реакції Вільямсона для отримання тіоетерів (органічних сульфідів), що містять структурні фрагменти речовин інших класів. Підтверджено простоту й ефективність застосування методу для синтезу тіоетерів.

Опрацьовано методики отримання заміщених сульфідів з різними структурними групами – похідні карбонових кислот, гетероциклічні фрагменти тощо. Показано можливість проведення реакцій в одну стадію, без попереднього отримання проміжних продуктів – тіолятів.

Одержано низку нових аліфатично-ароматичних тіоетерів, зокрема таких, що містять у складі молекул структурні фрагменти відомих біологічно активних речовин.

Список використаної літератури

Cramer N.B., Bowman C.N. Chemoselective and Bioorthogonal Ligation Reactions (Concepts and Applications) / W.R. Algar, P.E. Dawson, I.L. Medintz (ed.). Chapter : Thiol-Ene Chemistry, 2017. P. 117–145. https://doi.org/10.1002/9783527683451.ch5

Ghoshal T., Patel T.M. Anticancer activity of benzoxazole derivative (2015 onwards): a review. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2020. Vol. 6. P. 94. https://doi.org/10.1186/s43094-020-00115-0

Han M.İ., Küçükgüzel G. Thioethers: An Overview. Current Drug Targets. 2022. Vol. 23(2). P. 170–219. https://doi.org/10.2174/1389450122666210614121237

Li C., Liu Y., Ren X., Tan Y., Jin L., Zhou X. Design, Synthesis and Bioactivity of Novel Pyrimidine Sulfonate Esters Containing Thioether Moiety. International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24(5). P. 4691. https://doi.org/10.3390/ijms24054691

Liu T., Peng F., Zhu Y. et al. Design, synthesis, biological activity evaluation and mechanism of action of myricetin derivatives containing thioether quinazolinone. Arabian Journal of Chemistry. 2022. Vol. 15(8). P. 104019. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104019

Mu S., Liu H., Zhang L., Wang X., Xue F., Zhang Y. Synthesis and Biological Evaluation of Novel Thioether Pleuromutilin Derivatives. Biological and Pharmaceutical Bulletin. 2017. Vol. 40(8). P. 1165–1173. https://doi.org/10.1248/bpb.b16-00160

Nair D.P., Podgórski M., Chatani S., Gong T., Xi W., Fenoli C.R., Bowman C.N. The Thiol-Michael Addition Click Reaction: A Powerful and Widely Used Tool in Materials Chemistry. Chemistry of Materials. 2014. Vol. 26(1). P. 724–744. https://doi.org/10.1021/cm402180t

Naskar R., Ghosh P., Manna C.K., Murmu N., Mondal T.K. Palladium(II) complexes with thioether based ONS donor ligand: Synthesis, characterization, X-ray structure, DFT study and anti-cancer activity. Inorganica Chimica Acta. 2022. Vol. 534. P. 120802. https://doi.org/10.1016/j.ica.2022.120802

Ruan X., Zhang C., Jiang S. et al. Design, Synthesis, and Biological Activity of Novel Myricetin Derivatives Containing Amide, Thioether, and 1,3,4-Thiadiazole Moieties. Molecules. 2018. Vol. 23(12). P. 3132. https://doi.org/10.3390/molecules23123132

Sattar R., Mukhtar R., Atif M., Hasnain M., Irfan A. Synthetic transformations and biological screening of benzoxazole derivatives: A review. *Journal of Heterocyclic Chemistry*. 2020. Vol. 57(5). P. 2079–2107. https://doi.org/10.1002/jhet.3944

Singh R.K., Kumar A., Mishra A.K. Chemistry and Pharmacology of Acetanilide Derivatives: A Mini Review. *Letters in Organic Chemistry*. 2019. Vol. 16(1). P. 6–15. https://doi.org/10.2174/1570178616566181129150925

Sinha A.K., Equbal D. Thiol-Ene Reaction as a Sharping Stone of Click Chemistry: Recent Advances in Synthetic Aspects and Mechanistic Studies of Anti-Markovnikov-selective Hydrothiolation of Olefins. Asian Journal of Organic Chemistry. 2018. Vol. 8(1). P. 32–47. https://doi.org/10.1002/ajoc.201800639

Smolyaninov I., Pitikova O., Korchagina E. et al. Electrochemical behavior and anti/pro-oxidant activity of thioethers with redox-active catechol moiety. Monatshefte für Chemie. 2018. Vol. 149. P. 1813–1826. https://doi.org/10.1007/s00706-018-2264-1

Song X., Li P., Li M. et al. Synthesis and investigation of the antibacterial activity and action mechanism of 1,3,4-oxadiazole thioether derivatives. Pesticide Biochemistry and Physiology. 2018. Vol. 147. P. 11–19. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2017.10.011

Tunel H., Er M., Alici H., Onaran A., Karakurt T., Tahtaci H. Synthesis, structural characterization, biological activity, and theoretical studies of some novel thioether-bridged 2,6-disubstituted imidazothiadiazole analogues. Journal of Heterocyclic Chemistry. 2021. Vol. 58(6). P. 1321–1343. https://doi.org/10.1002/jhet.4260

Yadav K.P., Rahman M.A., Nishad S., Maurya S.K., Anas M., Mujahid M. Synthesis and biological activities of benzothiazole derivatives: A review. *Intelligent Pharmacy*. 2023. Vol. 1(3). P. 122–132. https://doi.org/10.1016/j.ipha.2023.06.001

Zhao M., Zhou Z., Tang P. Synthesis of α-trifluoromethoxy-sulfide through the Pummerer rearrangement. *Organic & Biomolecular Chemistry*. 2025. Vol. 25. P. 6127–6132. https://doi.org/10.1039/D5OB00673B

Zheng Y., Qin C., Li F. et al. Self-assembled thioether-bridged paclitaxel-dihydroartemisinin prodrug for amplified antitumor efficacy-based cancer ferroptotic-chemotherapy. *Biomaterials Science.* 2023. Vol. 9. P. 3321–3334. https://doi.org/10.1039/D2BM02032G

References

Cramer, N.B., & Bowman, C.N. (2017). Thiol-ene chemistry. In W.R. Algar, P. E. Dawson, & I.L. Medintz (Eds.), *Chemoselective and bioorthogonal ligation reactions: Concepts and applications,* 117–145. https://doi.org/10.1002/9783527683451.ch5 [in English].

Ghoshal, T., & Patel, T.M. (2020). Anticancer activity of benzoxazole derivative (2015 onwards): A review. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences,* 6, 94. https://doi.org/10.1186/s43094-020-00115-0 [in English].

Han, M.I., & Küçükgüzel, G. (2022). Thioethers: An overview. *Current Drug Targets,* 23(2), 170–219. https://doi.org/10.2174/1389450122666210614121237 [in English].

Li, C., Liu, Y., Ren, X., Tan, Y., Jin, L., & Zhou, X. (2023). Design, synthesis and bioactivity of novel pyrimidine sulfonate esters containing thioether moiety. *International Journal of Molecular Sciences,* 24(5), 4691. https://doi.org/10.3390/ijms24054691 [in English].

Liu, T., Peng, F., Zhu, Y., et al. (2022). Design, synthesis, biological activity evaluation and mechanism of action of myricetin derivatives containing thioether quinazolinone. *Arabian Journal of Chemistry,* 15(8), 104019. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104019 [in English].

Mu, S., Liu, H., Zhang, L., Wang, X., Xue, F., & Zhang, Y. (2017). Synthesis and biological evaluation of novel thioether pleuromutilin derivatives. *Biological and Pharmaceutical Bulletin,* 40(8), 1165–1173. https://doi.org/10.1248/bpb.b16-00160. [in English].

Nair, D.P., Podgórski, M., Chatani, S., Gong, T., Xi, W., Fenoli, C.R., & Bowman, C.N. (2014). The thiol-Michael addition click reaction: A powerful and widely used tool in materials chemistry. *Chemistry of Materials,* 26(1), 724–744. https://doi.org/10.1021/cm402180t [in English].

Naskar, R., Ghosh, P., Manna, C.K., Murmu, N., & Mondal, T.K. (2022). Palladium(II) complexes with thioether based ONS donor ligand: Synthesis, characterization, X-ray structure, DFT study and anti-cancer activity. *Inorganica Chimica Acta,* 534, 120802. https://doi.org/10.1016/j.ica.2022.120802 [in English].

Ruan, X., Zhang, C., Jiang, S., et al. (2018). Design, synthesis, and biological activity of novel myricetin derivatives containing amide, thioether, and 1,3,4-thiadiazole moieties. *Molecules,* 23(12), 3132. https://doi.org/10.3390/molecules23123132 [in English].

Sattar, R., Mukhtar, R., Atif, M., Hasnain, M., & Irfan, A. (2020). Synthetic transformations and biological screening of benzoxazole derivatives: A review. *Journal of Heterocyclic Chemistry,* 57(5), 2079–2107. https://doi.org/10.1002/jhet.3944 [in English].

Singh, R.K., Kumar, A., & Mishra, A.K. (2019). Chemistry and pharmacology of acetanilide derivatives: A mini review. *Letters in Organic Chemistry,* 16(1), 6–15. https://doi.org/10.2174/1570178615666181129150925 [in English].

Sinha, A.K., & Equbal, D. (2018). Thiol-ene reaction as a sharping stone of click chemistry: Recent advances in synthetic aspects and mechanistic studies of anti-Markovnikov-selective hydrothiolation of olefins. *Asian Journal of Organic Chemistry,* 8(1), 32–47. https://doi.org/10.1002/ajoc.201800639 [in English].

Smolyaninov, I., Pitikova, O., Korchagina, E., et al. (2018). Electrochemical behavior and anti/prooxidant activity of thioethers with redox-active catechol moiety. *Monatshefte für Chemie,* 149, 1813–1826. https://doi.org/10.1007/s00706-018-2264-1 [in English].

Song, X., Li, P., Li, M., et al. (2018). Synthesis and investigation of the antibacterial activity and action mechanism of 1,3,4-oxadiazole thioether derivatives. *Pesticide Biochemistry and Physiology,* 147, 11–19. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2017.10.011 [in English].

Tunel, H., Er, M., Alici, H., Onaran, A., Karakurt, T., & Tahtaci, H. (2021). Synthesis, structural characterization, biological activity, and theoretical studies of some novel thioether-bridged 2,6-disubstituted imidazothiadiazole analogues. *Journal of Heterocyclic Chemistry,* 58(6), 1321–1343. https://doi.org/10.1002/jhet.4260 [in English].

Yadav, K.P., Rahman, M.A., Nishad, S., Maurya, S.K., Anas, M., & Mujahid, M. (2023). Synthesis and biological activities of benzothiazole derivatives: A review. *Intelligent Pharmacy,* 1(3), 122–132. https://doi.org/10.1016/j.ipha.2023.06.001 [in English].

Zhao, M., Zhou, Z., & Tang, P. (2025). Synthesis of α-trifluoromethoxy-sulfide through the Pummerer rearrangement. *Organic & Biomolecular Chemistry,* 25, 6127–6132. https://doi.org/10.1039/D5OB00673B [in English].

Zheng, Y., Qin, C., Li, F., et al. (2023). Self-assembled thioether-bridged paclitaxel–dihydroartemisinin prodrug for amplified antitumor efficacy-based cancer ferroptotic-chemotherapy. *Biomaterials Science,* 9, 3321–3334. https://doi.org/10.1039/D2BM02032G [in English].

Отримано: 31.10.2025
Прийнято: 03.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

АГРОНОМІЯ

UDC 631.95:631.86
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.15

ANALYSIS OF THE BENEFITS OF GREEN MANURE RETURNING AND ITS APPLICATION IN ECOLOGICAL FARMS

Huang Chaolin[1], R. A. Yaroshchuk[2]

Green manure, a traditional practice of incorporating plant materials into soil, enhances soil fertility and structure. After a decline post-1990s, its use in China has rebounded due to green agriculture policies, reaching 3.71 million hectares by 2022. However, adoption on ecological farms remains limited (42.9%), often hampered by single-species use and suboptimal management.

This study conducted a meta-analysis of 15 articles (183 effect sizes) to evaluate green manure's ecological benefits. Results show it generally increases subsequent crop yields (78.7% of data showed positive effects), with a mean increase of 13.8%. Benefits depend on species, crop type, and climate; legume green manures, for example, increased wheat yield by 5.1%, while non-legumes decreased it. Green manure consistently improved soil microorganisms (100% positive effects) and nutrient cycling (82.9% positive), boosting available nitrogen, phosphorus, and potassium. It also enhanced soil organic carbon (87.5% positive), sequestering carbon with a mean increase of 17.3%.

Trade-offs exist: green manure can reduce soil moisture and increase greenhouse gas emissions by an average of 40.7%. In China, primary models include intercropping (e.g., in maize fields, tea plantations, orchards) and rotation (e.g., in rice-wheat systems).

For ecological farms, which require multi-functional technologies, green manure supports soil health and nutrient management. Successful application requires selecting species suited to local conditions and integrating it with practices like fertilizer reduction.

Challenges to wider adoption include insufficient evidence of direct economic benefits for farmers and a lack of strong policy support. Overcoming these requires better policy incentives, improved ecological compensation, and synergistic application with other sustainable practices to realize green manure's full potential in agriculture's green transformation.

Key words: *Green Manure, Ecological Farm, Meta-analysis, Soil Health, Sustainable Agriculture.*

[1] Postgraduate Student
Faculty of agricultural technologies and environmental
(Sumy National Agrarian University, Sumy)
e-mail: 857904446@qq.com
ORCID: 0009-0004-6293-6207
[2] Doctor of Agricultural Sciences,
Associate Professor,
Department of Ecology and Botany,
(Sumy National Agrarian University, Sumy)
e-mail: jaroschukr@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2591-5592

АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ПОВЕРНЕННЯ ЗЕЛЕНОГО ДОБРИВА ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ЕКОЛОГІЧНИХ ФЕРМАХ

Хуан Чаолінь, Р. А. Ярощук

Зелене добриво, традиційна практика закопування рослинних матеріалів у ґрунт, покращує родючість і структуру ґрунту. Після спаду в його використанні після 1990-х років у Китаї воно відновилося завдяки політиці зеленого сільського господарства, до 2022 року площа його посівів досягла 3,71 мільйона гектарів. Однак його застосування на екологічних фермах залишається обмеженим (42,9%) часто через використання одного виду й неоптимальне управління. Дослідження провело метааналіз 15 статей (183 розміри ефекту) для оцінки екологічних переваг зеленого добрива. Результати показують, що воно загалом підвищує врожайність культур (78,7% даних показали позитивний ефект) із середнім збільшенням на 13,8%. Переваги залежать від виду, типу культури та клімату; наприклад, бобові зелені добрива підвищили врожайність пшениці на 5,1%, тоді як небобові – знизили.

Зелене добриво стабільно покращувало стан ґрунтових мікроорганізмів (100% позитивних ефектів) і кругообіг поживних речовин (82,9% позитивних), підвищуючи вміст доступного азоту, фосфору та калію. Воно також підвищувало органічний вуглець у ґрунті (87,5% позитивних), секвеструючи вуглець із середнім збільшенням на 17,3%.

Існують компроміси: зелене добриво може знижувати вологість ґрунту й підвищувати викиди парникових газів у середньому на 40,7%. У Китаї основні моделі включають сумісні посіви (наприклад, на полях кукурудзи, чайних плантаціях, фруктових садах) і сівозміни (наприклад, у системах рис-пшениця).

Для екологічних ферм, які потребують багатофункціональних технологій, зелене добриво підтримує здоров'я ґрунту й управління поживними речовинами. Успішне застосування вимагає підбору видів, пристосованих до місцевих умов, та інтеграції з практиками, як-от зменшення використання добрив.

Проблемами для ширшого впровадження є недостатність доказів прямого економічного ефекту для фермерів і брак сильної політичної підтримки. Для подолання цих проблем потрібні кращі політичні стимули, покращена екологічна компенсація та синергетичне застосування з іншими сталими практиками для реалізації повного потенціалу зеленого добрива в зеленій трансформації сільського господарства.

Ключові слова: *зелене добриво, екологічна ферма, метааналіз, здоров'я ґрунтів, стале сільське господарство.*

Introduction

Green manure refers to plant materials that are directly plowed under or applied to farmland after composting. It was once an important source of organic matter in farmland. Green manure is a quintessential part of traditional Chinese agriculture, capable of enhancing soil fertility, improving soil structure, and promoting increased crop yields (Cao Weidong et al., 2017; Cao Weidong et al., 2024). China has a long history of green manure cultivation, with the planting area reaching 13 million hectares in the 1970s, before declining after the 1990s due to rural reforms and the widespread use of chemical fertilizers. With the rise of green agriculture concepts, the national Soil Organic Matter Enhancement Subsidy Project was launched in 2006, and the Green Manure Industry Technology System was established in 2017, driving the national green manure planting area to recover to 3.71 million hectares by 2022, covering 4.12 million hectares of farmland (Cao Weidong et al., 2017; Cao Weidong & Gao Songjuan, 2023). In 2017, the Ministry of Agriculture included green manure in the modern agricultural system, making it a key technology for national farmland ecological construction. Currently, numerous green manure varieties with good ecological adaptability have emerged across China, and planting models are continuously being innovated (Wang Qiangsheng et al., 2021; Huang Weihong et al., 2024). However, a survey by Hu Xiaofang et al. (Hu Xifang et al., 2024) based on 431 national-level ecological farms found that only 42.9% of farms adopted green manure planting, and existing models generally suffer from issues such as single species selection, unreasonable spatiotemporal configuration, and poor functional synergy, leading to the ecological value of green manure not being fully realized.

The construction of ecological farms is an important vehicle for promoting the green transformation of agriculture (Xu Xiangbo et al., 2024). As of 2023, 776 ecological farms

in China have been awarded the title of National-level Ecological Farm (Xu Xiangbo et al., 2024). As composite systems practicing agricultural ecology principles, the construction of ecological farms needs to follow the principles of "holism, coordination, recycling, regeneration, and diversity". According to the "Technical Specification for Ecological Farm Evaluation" by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2018), ecological farms scientifically manage the agricultural bio-environmental system to achieve efficient resource recycling while ensuring the quality and safety of agricultural products. This multi-objective synergistic system characteristic places higher demands on green manure technology: it must not only undertake the traditional function of nutrient supply but also play a comprehensive role in aspects such as crop-livestock integration [e.g., the forage-fertilizer coupling of legume (Fabaceae) green manure and farming systems], landscape ecology (spatiotemporal optimization of perennial green manure and crop rotation), and biodiversity maintenance (configuration of nectar plants and natural enemy conservation green manure). However, existing research mostly focuses on the evaluation of single functional benefits of green manure, lacking a comprehensive and systematic assessment of its overall benefits.

In summary, comprehensively reviewing green manure planting and utilization models and systematically evaluating the benefits of green manure are of crucial significance for promoting green manure in ecological farms and enhancing their production efficiency. Based on relevant domestic and international research results, this paper uses the literature review method to outline green manure planting and utilization models and their ecological benefits, and proposes strategies for the application of green manure in ecological farms. Simultaneously, this paper analyzes specific cases of national-level ecological farms, aiming to explore practical and referential green manure utilization models for ecological farms and provide guidance for the rational application of green manure in ecological farms.

Material and Methods

Literature Review. Green manure returning, as an eco-friendly agricultural measure, has garnered widespread attention from scholars domestically and internationally. This study employed meta-analysis to summarize research on green manure planting and utilization models and the effects of green manure returning on improving soil fertility and crop yield, among other aspects. Meta-analysis, based on original observational data from a large number of research articles, can reveal underlying overall trends and serve as an important indicator for measuring the overall understanding of a particular topic (Gurevitch J et al., 2018). Therefore, the literature review section of this paper systematically summarizes green manure planting and utilization models and focuses on published meta-analysis articles to quantitatively analyze the ecological benefits of green manure. This study searched for journal articles published before October 1, 2025, using the keywords "green manure" and "meta-analysis" in "Web of Science" and "CNKI". Among these, 15 meta-analysis articles on green manure research were retrieved (Ding et al., 2018; Muhammad et al., 2020; Ma et al., 2021; Zhang et al., 2021; Kichamu-Wachira et al., 2021; Liang et al., 2022; Garba et al., 2022; Yue et al., 2022; Hu et al., 2023; Jia et al., 2024; Xu et al., 2024; Li et al., 2024; Khan et al., 2025; Huang et al., 2025; Xu et al., 2025), extracting information such as green manure species, soil properties, yield, and their corresponding effect sizes, totaling 183 data points. Green manure returning has multiple functions; this paper categorized the extracted indicators related to the effects of green manure into six categories: crop yield, soil physicochemical properties, nutrient cycling, carbon sequestration, soil microorganisms, and greenhouse gas emissions. The different categories and their specific indicators are shown in Table 1.

This paper first classified the effect of green manure on each specific indicator as a positive impact, negative impact, or no impact based on whether the effect size was significant and the nature of the indicator. For example, if green manure returning significantly increased crop yield, it was considered a positive impact; if it significantly increased greenhouse gas emissions, it was considered a negative impact. Then, according to the classification in Table 1, the number of effect sizes showing positive, negative, and no impact for specific indicators within the six ecological benefit categories was counted to reflect the role of green manure returning. Additionally, this paper extracted the specific numerical values of each indicator's effect size to reflect the magnitude of the effect of green manure returning in the six aspects: crop yield, soil physicochemical properties, etc.

Table 1

Categories of ecological benefits of green manure involved in this study and their specific indicators

Category of ecological benefit	**Specific indicator**
Crop yield (10, 61)	Crop yield (rice, maize, wheat, potato, etc.)
Soil physicochemical property (7, 40)	Soil bulk density, pH, moisture content, salt content, and activities of soil invertase / urease / phosphatase / catalase / xylosidase
Nutrient cycling (10, 41)	Total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen / phosphorus / potassium, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, hydrolyzable nitrogen, ammonia volatilization, and nitrogen use efficiency
Carbon sequestration (5, 16)	Soil organic carbon
Soil microorganism (4, 15)	Microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, total soil phospholipid fatty acids, total soil bacteria, total soil fungi, soil actinomycetes, and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) spore density
GHGs emissions (3, 10)	Methane emission, and nitrous oxide emission
The first and second numbers in parentheses represent the count of meta-analysis articles and effect sizes, respectively.	

Green manure returning has various ecological functions such as improving soil properties and increasing yield, but trade-offs may exist between different effects. To assess the trade-offs between different functions of green manure, this paper assigned values to the indicators of each ecological benefit category in each meta-analysis article: positive effect assigned +1, negative effect assigned -1, no effect assigned 0 (Yousefi et al., 2024). In this way, the specific performances in each ecological benefit category were converted into a unified numerical standard. Subsequently, this paper summed the numbers for the indicators of each ecological benefit category and divided by the number of records for that category's indicators, then ranked the performance of green manure based on this. This ranking method allows for the comparison of different ecological benefits of green manure and the analysis of their trade-off relationships.

Results

Green Manure Planting and Utilization Models. Currently, the main green manure planting and utilization models in China include intercropping/relay cropping and rotation with main crops (Table 2). Intercropping/relay cropping models are widely used. For grain crops, corn (Zea mays) is often intercropped with green manures such as alfalfa (Medicago sativa), soybean (Glycine max), konjac (Amorphophallus konjac), common vetch (Vicia sativa), rapeseed (Brassica napus), and yellow sweetclover (Melilotus officinalis), while wheat (Triticum aestivum) is intercropped with yellow sweetclover (Tian Fei et al., 2008; Xu Wenguo et al., 2009; Liu Zhongkuan et al., 2009; Wang Ting et al., 2010; Kong Deping et al., 2010; Meng Fengxuan et al., 2010; Li Wenting et al., 2021). In tea plantations and orchards, green manures like common vetch, hairy vetch (Vicia villosa), rat-tail fescue (Vulpia myuros), perennial ryegrass (Lolium perenne), white clover (Trifolium repens), alfalfa, roundleaf cassia (Chamaecrista rotundifolia), and Crotalaria micans are often interplanted (Wang Jianhong et al., 2009; Dong Hao et al., 2020; Gong Xue et al., 2023). Furthermore, orchards often intercorp multiple green manures; for example, apple (Malus pumila) orchards and grape (Vitis vinifera) vineyards often intercorp green manures like white clover, perennial ryegrass, alfalfa, and tall fescue (Festuca elata) (Hui Zhumei et al., 2004; Yue Taixin et al., 2009; Wang Yingjun et al., 2013; Qin Jingyi et al., 2016; Li Yuanxue et al., 2019; Cheng Bin et al., 2021; Cheng Bin et al., 2021). In rotation models, rice (Oryza sativa) fields often utilize the winter fallow period to plant green manure, which is later plowed under before planting rice (Yang Binjuan & Huang, 2016; Yang et al., 2017). In dryland wheat planting areas, the summer fallow period is typically used for rotation by planting green manures such as soybean, mung bean (Vigna radiata), Vigna cylindrica, sunn hemp (Crotalaria juncea), yellow sweetclover, common vetch, and rapeseed (Li et al., 2019; Lu Zhuocheng et al., 2021; Lu Yitong et al., 2021).

Table 2

Main cultivation and utilization patterns of green manure in China

Utilization pattern	**Crop type**	**Green manure type**	**Reference**
Intercropping	Maize	Alfalfa, soybean, konjac, common vetch, rapeseed, sweet clover, etc.	(Tian F et al., 2008; Xu W G et al., 2009; Liu Z K et al., 2009; Wang T et al., 2010; Kong D P et al., 2010; Li H T et al., 2021)
	Wheat	Sweet clover	(Meng F X et al., 2010)
	Tea garden	Common vetch, hairy vetch, rattail fescue, ryegrass, white clover, alfalfa, round leafed cassia, smooth crotalaria, etc.	(Gong X et al., 2023; Wang J H et al., 2009)
	Apple orchard	White clover, ryegrass, alfalfa, tall fescue, clover, bluegrass, rattail fescue, weeping lovegrass, wild oat, etc.	(Dong H et al., 2020; Cheng B et al., 2021; Qin J Y et al., 2016; Wang Y J et al., 2013; Li Y X et al., 2019)
	Grape vineyard	Alfalfa, white clover, tall fescue, etc.	(Xi Z M et al., 2004; Yue T X et al., 2009)
	Pear orchard	Ryegrass, sweet clover, white clover, etc.	(Liu C et al., 2014; Sun J P et al., 2016; Wu Y S et al., 2013)
	Peach orchard	Chicory, alfalfa, white clover, ryegrass, clover, hairy vetch, etc.	(Weng B Q et al., 2013; Zhang X X et al., 2011)
	Citrus, tangerine, and pomelo orchard	Rice bean, cowpea, soybean, mung bean, ryegrass, white clover, etc.	(Li F L et al., 2013; Fu X Q et al., 2015; Wen M X et al., 2011)
	Kiwifruit orchard	Ryegrass, white clover, grass vetch, hairy vetch, common vetch, little bluestem, etc.	(Wu X H et al., 2019; Qin Q et al., 2020)
	Walnut orchard	White clover	(Qian J F et al., 2019)
	Mulberry garden	Hairy vetch	(Pang J G et al., 2017)
Rotation	Rice	Chinese milk vetch, ryegrass, rapeseed, broad bean, hairy vetch, common vetch, etc.	(Yang W Y et al., 2017; Yang B J & Huang G Q, 2016)
	Wheat	Soybean, black bean, mung bean, cylindrical cowpea, sunhemp, sweet clover, common vetch, rapeseed, etc.	(Li W G et al., 2019; Lü Z C et al., 2021; Lyu Y T et al., 2021)

Analysis of Green Manure Benefits. This study systematically collated 15 meta-analysis articles related to green manure, extracting 183 effect size data points, revealing the effects of green manure on key indicators such as crop yield, carbon sequestration, and greenhouse gas emissions, providing a theoretical basis for subsequent strategy development and practice of green manure in ecological farms.

Impact of Green Manure on Crop Yield. There were 61 effect sizes for subsequent crop yield. Among these, 7 indicated that green manure had a negative impact on crop yield, 6 showed no impact, and 48 confirmed a positive impact, accounting for 11.5%, 9.8%, and 78.7% respectively. This fully indicates that in most cases, green manure promotes increased crop yield. The effect of green manure on increasing subsequent crop yield is relatively stable, with most study effect sizes concentrated between 5.0% and 20.0%, and a mean effect size of 13.8%. The impact of green manure on subsequent crop yield is related to the green manure species and the type of subsequent crop. Meta-analysis research shows that compared to fallow control, legume green manure increased wheat yield by 5.1%, while non-legume green manure decreased wheat yield by 7.2%; both legume

and non-legume green manure increased corn yield, with increases of 12.0% and 9.4% respectively; in potato (Solanum tuberosum) cultivation, legume green manure had no significant effect on yield, while non-legume green manure increased potato yield by 5.9% (Kichamu-Wachira et al., 2021). The impact of green manure on subsequent crop yield is also influenced by local climatic conditions. A meta-analysis study focusing on Africa showed that in humid regions, green manure returning increased crop yield by 98.9%, while in semi-arid regions, crop yield increased by 34.0% (Liang et al., 2022). A green manure meta-analysis study in China reached similar conclusions, indicating that green manure had a stronger yield-enhancing effect on subsequent crops in humid regions compared to arid regions (Zhang Shaohong et al., 2021). Furthermore, soil fertility and nitrogen application levels also influence the effect of green manure. Under low nitrogen levels [1-99 kg(N)·hm^{-2}], green manure returning increased crop yield by 66.3%, while under high nitrogen levels [>100 kg(N)·hm^{-2}], green manure returning had no significant effect on crop yield (Liang et al., 2022). When soil organic matter content was 0-10 g·kg^{-1}, grain crop yield increased by 32.6%; when soil organic matter content was 10-20 g·kg^{-1}, grain crop yield increased by 10.2%; however, when soil organic matter content was >30 g·kg^{-1}, green manure returning had no significant effect on crop yield (Zhang Shaohong et al., 2021).

Impact of Green Manure on Soil Physicochemical Properties, Microorganisms, and Nutrient Cycling. Green manure returning can improve soil properties and is of great significance for the sustainable development of soil fertility. Plowing under green manure can increase soil organic matter and available nutrient content, making it an important measure for soil fertilization. Regarding soil physicochemical properties, 17 effect sizes showed a negative impact from green manure, 3 showed no impact, and 20 effect sizes indicated a positive impact, accounting for 42.5%, 7.5%, and 50.0% respectively. The indicators showing negative impacts were all related to soil water content; green manure planting consumes soil moisture, thereby reducing soil water content and leading to water resource competition for subsequent crops. A meta-analysis by Zhang Shaohong et al. (Jia et al., 2024) based on data from 46 green manure-related literature sources on the Loess Plateau showed that although planting green manure reduced soil moisture in the Loess Plateau region, it significantly promoted the yield of subsequent grain crops. Plowing under green manure about 13 days earlier and controlling legume green manure biomass between 2200-3100 kg·hm^{-2} could effectively mitigate the negative impact of green planting on soil moisture. Compared to conventional tillage without green manure, green manure returning can increase the content of large aggregates in the 0-30 cm soil layer, enhance soil aggregate stability, and reduce soil bulk density (Li Yuanxue et al., 2019). There are many indicators for soil physicochemical properties, and the impact of green manure on them is complex, showing significant variation across different studies, with its effects influenced by multiple factors such as soil type, green manure species, and planting management practices.

Regarding soil microorganisms, all 15 effect sizes indicated a positive impact from green manure, accounting for 100%, with effect sizes ranging from 11.0% to 51.0% and a mean of 26.0%. This clearly shows that green manure promotes the growth and activity of soil microorganisms, helps maintain the biodiversity and functional stability of the soil ecosystem, plays a core role in soil ecological processes, and the promoting effect is quite significant. For example, reasonably intercropping forage rapeseed and returning it to the field can increase soil nutrient content and enzyme activity in subsequent wheat fields, effectively enhance bacterial community diversity, and promote the growth of beneficial soil microbial communities (Qin Jingyi et al., 2016). In nutrient cycling studies, 2 effect sizes showed a negative impact, 5 showed no impact, and 34 showed that green manure had a positive impact on nutrient cycling, accounting for 4.9%, 12.2%, and 82.9% respectively. Green manure returning can significantly increase soil nitrate nitrogen, available phosphorus, and available potassium content, with increases ranging from 6.2% to 60.0%. Additionally, green manure returning can reduce ammonia volatilization and soil nitrogen leaching (Ding et al., 2018; Kichamu-Wachira et al., 2021; Liang et al., 2022; Xu et al., 2024).

Impact of Green Manure on Carbon Sequestration and Greenhouse Gas Emissions. There were 16 effect sizes for carbon sequestration, of which 2 showed no impact and 14 indicated a positive impact, accounting for 12.5% and 87.5% respectively. The effect sizes ranged from -7.8% to 66.1%, with a mean of 17.3%. This indicates that, compared to

the no-green-manure control, green manure returning increased soil organic carbon content by 17.3%. This shows that green manure plays an important role in carbon sequestration, making key contributions to increasing soil carbon storage. Changes in soil organic carbon are affected by factors such as mean annual temperature, green manure species and planting duration, initial soil organic carbon content, microbial community status, green manure biomass and its incorporation amount, and soil texture (Tian Fei et al., 2008). Compared to the control, soil organic carbon content significantly increased by 30% after legume green manure returning and by 47% after non-legume green manure returning (Ding et al., 2018). A meta-analysis by Kichamu-Wachira et al. (Liang et al., 2022) focusing on Africa showed that the effect of green manure returning on soil organic carbon is influenced by time; in short-term (<3 years) experiments, soil organic carbon content increased by 12.6%, while in long-term (>20 years) experiments, green manure returning had no significant effect on soil organic carbon content.

Green manure returning can increase soil organic matter input, benefiting the accumulation of soil organic matter, but it also affects farmland greenhouse gas emissions. This study found that regarding greenhouse gas emissions, 6 data points found a negative impact, 2 showed no impact, and only 2 studies indicated a positive impact, accounting for 60.0%, 20.0%, and 20.0% respectively. The effect sizes ranged from -5.1% to 132.0%, with a mean of 40.7%. This indicates that, compared to the no-green-manure control, green manure returning increased farmland greenhouse gas emissions by an average of 40.7%.

Trade-offs Between Different Ecological Benefits. Planting green manure has multiple ecological benefits, but trade-off relationships exist between different benefits. Green manure returning has a positive impact on soil microorganisms, with a comprehensive value of 1.00, indicating that its promoting effect on soil microorganisms is extremely significant. The comprehensive value for carbon sequestration is 0.88, showing that green manure has a strong positive significance in carbon sequestration, playing an important role in increasing soil organic carbon content and soil carbon sink capacity, as well as mitigating climate change. The comprehensive value for crop yield is 0.67, fully illustrating that green manure plays a relatively obvious role in promoting crop yield in most cases, holding important application value in agricultural production. The comprehensive value for nutrient cycling is 0.78, meaning that green manure shows a positive role in promoting soil nutrient transformation, release, and recycling, helping to maintain the balance and sustainable supply of soil nutrients, meet plant growth nutrient demands, and enhance nutrient use efficiency in ecosystems. The comprehensive value for soil physicochemical properties is 0.08, mainly because green manure planting reduces soil moisture, but has positive effects on other physicochemical properties (such as soil bulk density, enzyme activity, etc.) (Kichamu-Wachira et al., 2021; Hu, 2023). Regarding greenhouse gas emissions, the comprehensive value is -0.40, indicating that green manure returning leads to an increase in greenhouse gas emissions. This is related to various factors such as the green manure decomposition process, soil microbial metabolic activity, and environmental conditions, requiring further in-depth research on its internal mechanisms to explore effective control measures (Xu et al., 2024; Li, 2024).

Application Strategies for Green Manure in Ecological Farms. Ecological farms are committed to achieving harmony and unity between agricultural production and ecological environmental protection, and their technical demands are diverse and comprehensive. From the perspective of soil quality improvement, ecological farms need technologies that can increase soil organic matter content, improve soil structure, and enhance soil water and fertilizer retention capacity to ensure long-term productivity of arable land. In nutrient management, there is a need to reduce dependence on external chemical fertilizers, establish sustainable nutrient cycling systems, and avoid soil degradation and environmental pollution caused by excessive fertilizer application. Simultaneously, ecological farms also focus on maintaining biodiversity, requiring technical means to create environments suitable for the survival of various organisms and promote ecosystem stability and balance. Green manure can largely meet these technical needs. Green manure has positive effects on soil microorganisms, carbon sequestration, crop yield, and nutrient cycling, but shows negative and relatively neutral impacts on greenhouse gas emissions and soil physicochemical properties, respectively. In agricultural ecosystem management, these differences should be fully considered, green

manure should be applied rationally according to local conditions to maximize the utilization of its ecological functions, and targeted measures should be taken to address potential negative impacts, promoting the sustainable development of agricultural ecosystems.

The realization of green manure's ecological functions is influenced by various factors, such as farmland fertilization levels, green manure biomass and incorporation amount, green manure species, and main crop species. Climate zone and soil characteristics are fundamental factors determining the benefits of green manure (Cao Weidong et al., 2017). Conditions like temperature, precipitation, and sunlight in different climate zones, as well as soil texture, fertility, and pH, affect the growth, development, biomass accumulation, and ecological functions of green manure. Under suitable climatic and soil conditions, green manure can better exert its ecological service functions and improve the sustainability of crop production systems. Deeply understanding the impact of these factors on the ecological benefits of green manure helps farmers scientifically and rationally select and manage green manure based on local actual conditions, achieving efficient and sustainable development of crop production systems.

Discussion

Although the ecological benefits of green manure are clear, its promotion and application in ecological farms still face many challenges. The current adoption rate of green manure in ecological farms still has significant room for improvement (Cao Weidong et al., 2017). How to more effectively promote the adoption of green manure in ecological farms, thereby achieving multiple goals such as reducing fertilizer and pesticide use and protecting biodiversity in ecological agriculture, still has many problems that need further resolution. A key bottleneck lies in the quantification and recognition of economic benefits. Numerous field experiments show that green manure, especially legume green manure, can not only improve soil fertility but even increase crop yields, thus the promotion of green manure has received widespread attention (Kichamu-Wachira, 2021; Hu Xifang et al., 2024; Xu, 2024). However, the effective promotion of green manure relies on farmers' recognition and active participation. Although relevant case studies exist (Qin Jingyi et al., 2017), current research on economic benefit indicators of concern to farmers is still insufficient. If a direct link between green manure planting and farmers' income increase cannot be clearly established, its promotion will always face the “last mile” obstacle. Besides, the integration and innovation of technical models are also core challenges for promotion and application. Currently, ecological farms have a high application rate of policy-driven single technical measures (such as soil testing and formulated fertilization, and straw returning); while the application rate of other, albeit more complex, technical measures that can achieve higher comprehensive benefits is relatively low (Cao Weidong et al., 2017). Based on this, policy guidance can be used to incentivize qualified ecological farms to actively explore and apply more comprehensive and effective ecological agricultural technical measures according to local conditions. Furthermore, synergistic implementation with other ecological measures should be explored, such as chemical fertilizer reduction, organic fertilizer application, and reduced tillage/no-tillage.

These practical challenges ultimately point to the necessity of systematic policy support. Promoting the use of green manure in ecological farms requires policy support and innovation. In the context of agricultural green transformation, policies have played a crucial role in promoting the development of ecological farms and the application of green manure within them. Currently, support policies oriented towards green ecological agriculture are still insufficient, subsidies for ecological technical measures need to be strengthened, and the mechanism for premium prices for high-quality products in the market is difficult to effectively achieve, causing difficulties in the construction of ecological farms (Hu Xifang et al., 2024). Green manure has a unique and irreplaceable role in China's major agricultural strategic tasks (such as farmland ecological improvement, integrated cultivation and maintenance of arable land, etc.) (Cao Weidong et al., 2017). Therefore, it is particularly important to introduce a series of policies to assist the development of ecological farms and improve ecological compensation mechanisms (Gao Shangbin et al., 2019). Simultaneously, relevant supporting policies should be established and improved, closely linking green manure promotion with supportive policies for ecological farm construction. Through synergistic policy efforts, the green transformation of agriculture can be comprehensively promoted, fully leveraging the advantages of green manure in ecological farms and facilitating the green transformation of agriculture.

Conclusions

Green manure provides effective technical support for the green and sustainable development of agriculture. It has unique and effective roles in reducing agricultural non-point source pollution, improving the farmland ecological environment, and integrating cultivation and maintenance of arable land. The construction of ecological farms is of great significance for the development of ecological agriculture. Integrating green manure into ecological farm construction has important practical significance for the sustainable development of Chinese agriculture. This study found that green manure returning can effectively improve soil properties and enhance soil fertility; however, this process consumes soil moisture. Although the effect size of green manure planting on subsequent crop yield fluctuates considerably, the overall trend is towards yield increase. Green manure returning is beneficial for promoting soil organic matter accumulation and has a positive effect on carbon sequestration, but it also leads to increased greenhouse gas emissions. Overall, planting green manure has multiple benefits, but trade-offs exist between its different effects. Therefore, this study extracted the core application strategy for green manure: it is essential to select varieties according to local conditions, rationally plan planting patterns, and coordinate with other ecological measures such as chemical fertilizer reduction and reduced tillage/no-tillage to maximize its benefits. Currently, the adoption rate of green manure in ecological farms still needs significant improvement, and many problems urgently need resolution. For example, current research on economic benefit indicators of concern to farmers is insufficient, and a direct link between green manure planting and farmers' income needs to be established. The integration of green manure planting and utilization models with ecological farm planting models requires innovation and optimization. Promoting the application of green manure also requires policy support and innovation, expanding comprehensive ecological agricultural technologies according to local conditions, improving the policy system, and assisting the green transformation of agriculture.

Bibliography

Cao W.D., Bao X.G., Xu C.X., Nie J., Gao Y.J., Geng M.J. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望 [Reviews and prospects on science and technology of green manure in China]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer.* 2017. № 23(6). P. 1450–1461. https://doi.org/10.11674/zwyf.17291.

Cao W.D., Gao S.J. 到2050年中国绿肥发展策略 [Chinese green manure development strategy by 2050]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning.* 2023. № 44(12). P. 1–9. [Електронний ресурс]. URL: http://cjarrp.ijournals.cn/zgnyzyyqh/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=202312001&flag=1 (дата звернення: 11.09.2025).

Cao W.D., Zhou G.P., Gao S.J. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制 [Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers.* 2024. № 30(7). P. 1274–1283. https://doi.org/10.11674/zwyf.2024269.

Cheng B., Zhao R.F., Hua X.Z., Wang S., Wang Z. 果园绿肥对土壤生境调控的研究进展 [Research progress of green manure mulching between rows of orchard on soil habitat regulation]. *Tianjin Agricultural Sciences.* 2021. № 27(12). P. 59–62. https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6500.2021.12.011.

Ding W.C., Xu X.P., He P., Sami U., Zhang J.J., Cui Z.L., Zhou W. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis. *Field Crops Research.* 2018. № 227. P. 11–18. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.001.

Dong H., Shi G.F., Mu X.L., Yu S.H., Zhu G.L., Tan D.S., Li L., Huang J.L. 四种果园绿肥种子在 PEG-6000 模拟干旱胁迫下的萌发特性与抗旱性评价 [Germination characteristics and evaluation on drought resistance of four kinds of orchard green manure crops under PEG-6000 stress]. *Shandong Agricultural Sciences.* 2020. № 52(11). P. 141–145. https://doi.org/10.14083/j.issn.1001-4942.2020.11.030.

Fu X.Q., Liu J.E., Huang W.X. 南丰蜜橘园自然生草对土壤微生物和养分及果实品质的影响 [Effects of natural grass on soil microbiology, nutrient and fruit quality of Nanfeng tangerine yard]. *Acta Horticulturae Sinica.* 2015. № 42(8). P. 1551–1558. https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2015-0023.

Gao S.B., Xu Z.Y., Jin T., Wei L.L., Ju X.H., Xi B., Xue Y.H. 乡村振兴视角下中国生态农业发展分析 [Analysis of eco-agriculture construction based on rural revitalization in China]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture.* 2019. № 27(2). P. 163–168. https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181009.

Garba I.I., Bell L.W., Williams A. Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development.* 2022. № 42(3). P. 34. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00760-0.

Gong X., Liu Y., Yang Y.S., Gong J. 茶园绿肥的研究进展 [Research progress of green manure in tea plantations]. *Tillage and Cultivation.* 2023. № 43(6). P. 53–56. https://doi.org/10.13605/j.cnki.52-1065/s.2023.06.042.

Gurevitch J., Koricheva J., Nakagawa S., Stewart G. Meta-analysis and the science of research synthesis. *Nature.* 2018. № 555(7695). P. 175–182. https://doi.org/10.1038/nature25753.

Hu Q.J., Thomas B.W., Powlson D., Hu Y.X., Zhang Y., Jun X., Shi X.J., Zhang Y.T. Soil organic carbon fractions in response to soil, environmental and agronomic factors under cover cropping systems: A global metaanalysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2023. № 355. P. 108591. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108591.

Hu X.F., Sun R.H., Sun Y.F., Li X.Y., Gao G., Xu Z.Y., Yan D.Q. 我国典型生态农业主体的实践特征与发展建议–基于431个国家级生态农场的研究分析 [Analysis and suggestions on agroecological practices in China: A study based on 431 national eco-farms]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture.* 2024. № 32(6). P. 1075–1085. https://doi.org/10.12357/cjea.20230676.

Huang H., Zhang Z.H., Wu Q., Liu Z.Y., Wang Q.G., Ying Y.H., Zhang Z.C., Zhang H.J., Wang Y.F., Zhang G.X., Bangura K., Liu E.K., Xue J.F., Gao Z.Q., Cai T., Zhang P., Wu P. Global comprehensive evaluation shows that green manure enhances crop productivity while mitigating gaseous nitrogen losses. *Resources, Conservation and Recycling.* 2025. № 220. P. 108351. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108351.

Huang W.H., Wang Q.Y., Qian H., Lin W.C., Weng Y.B., Zhang L., Mao Y.H., Li Z.Z., Li X. 间作绿肥对茶园生态系统的影响研究进展 [Research progress on the impact of intercropping green manure on tea garden ecosystems]. *China Tea.* 2024. № 46(8). P. 30–34.

Jia Q., Zheng H.J., Shi Z.J., Xing L., Donlin S., Jiaen Z. Effects of straw and green manure addition on crop yield, soil properties and CH4 emissions: A meta-analysis. *Agronomy.* 2024. № 14(11). P. 2724. https://doi.org/10.3390/agronomy14112724.

Khan A.A., Azeem I., Hui J., Adnan A.K., Imran A., Jing H., Yupei C., Yuqi Y., Tahir S., Muhammad A., Noman S., Rana M.A.A., Weidong C., Dabin Z., Yajun G. Non-leguminous green manures improve labile phosphorus availability and crop yield in agroecosystems: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research.* 2025. № 248. P. 106430. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106430.

Kichamu-Wachira E., Xu Z.H., Reardon-smith K., Duan B., Geoffrey W., Negar Om. Effects of climate-smart agricultural practices on crop yields, soil carbon, and nitrogen pools in Africa: A meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments.* 2021. № 21(4). P. 1587–1597. https://doi.org/10.1007/s11368-021-02885-3.

Kong D.P., Huang S.F., Yan X.D., Xu Y.P., Liu Z.K. 玉米-大豆合理间作模式研究 [Study on the reasonable soybean-maize intercropping pattern]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences.* 2021. № 14(1). P. 1–2. https://doi.org/10.16318/j.cnki.hbnykx.2010.01.014.

Li F.L., Zheng Y.R., Zheng T., Xu Y.P., Liu Z.K. 果园带状生草对果园面源污染的控制效果 [Influence of zonal grass on non-point source pollution control in orchard]. *Journal of Soil and Water Conservation.* 2013. № 27(3). P. 82–89. https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2013.03.026.

Li H.T., Chai Q., Wang Q.M., Yu A.Z., Zhao C., Yin W., Fan Z.L., Fan H. 绿洲灌区不同施氮水平下玉米绿肥间作模式的水分利用特征 [Water use characteristics of maize-green manure intercropping under different nitrogen application levels in the oasis irrigation area]. *Scientia Agricultura Sinica.* 2021. № 54(12). P. 2608–2618. https://doi.org/ 10.3864/j.issn.0578-1752.2021.12.011.

Li W.G., Yang X.X., Huang C.G., Xue N.W., Xia Q., Liu X.L, Zhang X.Q., Yang S., Yang Z.P., Gao Z.Q. 饲料油菜作绿肥对后茬麦田土壤肥力及细菌群落的影响 [Effects of rapeseed green manure on soil fertility and bacterial community in dryland wheat field]. *Scientia Agricultura Sinica.* 2019. № 52(15). P. 2664–2677. https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2019.15.010.

Li Y.J., Zhao W.L., Zhu H.J., Jia X.X. Green manure mediated improvement in saline soils in China: A meta-analysis. *Agronomy.* 2024. № 14(9). P. 2068. https://doi.org/10.3390/agronomy14092068.

Li Y.X., Zhang G.N., Miao Y., Lin X.J., Wang Y., Yu X.J., Zhen Y.Q. 鼠茅草生草对苹果园土壤理化性质的影响 [Effects of Vulpia myuros C.Gmelin planting on physical and chemical properties of soil in apple orchard]. *China Fruit & Vegetable.* 2019. № 39(10). P. 86–89. https://doi.org/10.19590/j.cnki.1008-1038.2019.10.020.

Liang K.L., Wang X.Q., Du Y.T., Li G.M., Wei Y.Q., Liu Y.Z., Li Z.Y., Wei X.M. Effect of legume green manure on yield increases of three major crops in China: A meta-analysis. *Agronomy.* 2022. № 12(8). P. 1753. https://doi.org/10.3390/agronomy12081753.

Liu C., Hasiyati T., Aibibula Y. 库尔勒香梨果园间作饲草作物对土壤养分及小环境的影响 [Effects of intercropping forage grass on soil nutrients and microclimate in Korla pear orchard].

Xinjiang Agricultural Sciences. 2014. № 51(11). P. 2073–2078. https://doi.org/10.6048/j.issn.1001-4330.2014.11.018.

Liu Z.K., Cao W.D., Qin W.L., Zhi J.F., Liu Z.Y. 玉米-紫花苜蓿间作模式与效应研究 [A study on the pattern and effect of Zea mays intercropping with Medicago sativa]. *Acta Prataculturae Sinica.* 2009. № 18(6). P. 158–163.

Lü Z.C., Li T.L., Xie Y.H., Li S. 夏闲期种植翻压绿肥作物对麦田土壤细菌多样性的影响 [Effects of planting green manure crops on soil bacteria diversity in summer fallow period of winter wheat]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences.* 2021. № 49(3). P. 305–310. https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2481.2021.03.10.

Lyu Y.T., Yu A.Z., Lyu H.Q., Wang Y.L., Su X.X., Cai Q. 绿洲灌区玉米农田土壤团聚体组成及其稳定性对绿肥还田方式的响应 [Composition and stability of soil aggregates in maize farmlands under different green manure utilization patterns in an oasis irrigation area]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture.* 2021. № 29(7). P. 1194–1204. https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200913.

Ma D.K., Yin L.N., Ju W.L., Li X.K., Liu X.X., Deng X.P., Wang S.W. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crops Research.* 2021. № 266. P. 108146. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108146.

Meng F.X., Dilixiati, Yilihamu, Luo X.H., Wang X.H. 伊犁河谷小麦绿肥适宜种植模式研究 [Study on the suitable planting pattern of wheat and green manure in the Yili River Valley]. *Tillage and Cultivation.* 2010. № 30(4). P. 5–6. https://doi.org/10.13605/j.cnki.52-1065/s.2010.04.008.

Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 3667—2020 生态农场评价技术规范 [NY/T 3667–2020 Technical Specification for the Assessment of Ecological Farm]. Beijing : China Agriculture Press, 2020.

Muhammad I., Wang J., Sainju U.M., Zhang S.H., Zhao F.Z., Khan A. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis. *Geoderma.* 2021. № 381. P. 114696. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114696.

Pang J.G., Zhu Z., Wu L. 桑园生草对土壤养分、微生物及桑葚品质的影响 [Effects of inter-row planting grasses on soil nutrient, microbial quantity and fruit quality in mulberry field]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition).* 2017. № 37(3). P. 267–273. https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1000-1565.2017.03.008.

Qian J.F., Wu J.S., Huang J.Q. 生草栽培对山核桃林地土壤养分及微生物多样性的影响 [Effects of sod-cultural practices on soil nutrients and microbial diversity in the Carya cathayensis forest]. *Acta Ecologica Sinica.* 2014. № 34(15). P. 4324–4332. https://doi.org/10.5846/stxb201212171814.

Qin J.Y., Zhang Y., Wang X.M., Duo W.C., Lu B. 绿肥间作对果园产量及经济收益的影响 [Effects of intercropping green manure on yield and economic benefits of orchard]. *Guangdong Agricultural Sciences*. 2017. № 44(1). P. 43–48. https://doi.org/10.16768/j.issn.1004-874X.2017.01.007.

Qin J.Y., Zhang Y., Wang X.M., Zhu T.T., Liu K. 绿肥间作模式对苹果园土壤养分含量的影响 [Effect of inter planting green manure on soil nutrient content of apple orchard]. *Northern Horticulture.* 2016. № 11. P. 169–172. https://doi.org/10.11937/bfyy.201611045.

Qin Q., Song K., Sun L.J., Sun Y.F., Wang J., Jiang J.B., Xue Y. 猕猴桃园行间生草对土壤养分的影响及有效性评价 [Effect of inter-row sod system on the contents and availability of soil nutrients in a kiwifruit orchard]. *Journal of Fruit Science.* 2019. № 37(1). P. 68–76. https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20190241.

Sun J.P., Zhang Y.X., Li Y.L., Zhang J.J., Zhang Z. 生草对梨园土壤微生物、酶活性和腐殖质含量的影响 [Effect of sod culture on soil microbes, enzyme activities and humus composition of pear orchard]. *Journal of Fruit Science.* 2016. № 33(S1). P. 129–135. https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.2016.S.18.

Tian F., Gou Z.G., Chen Y., Zhou L., Liu J. 小麦-绿肥-玉米-大豆配套多熟种植模式的增产效应 [Study on yield increased by using the complete multiple cropping model of wheat-green manure-maize-soybean]. *Guizhou Agricultural Sciences.* 2008. № 36(6). P. 29–31.

Wang J.H., Cao K., Fu S.W., Shu A.M., Zhang Y., Wu X. 几种茶园绿肥的产量及对土壤水分、温度的影响 [Yield of green manure in several tea gardens and effects of green manure on soil moisture and temperature*]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences.* 2009. № 50(1). P. 100–102. https://doi.org/10.16178/j.issn.0528-9017.2009.01.017.

Wang Q.S., Bo Y.X., Yu K.L., Liu X.X. 绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望 [Analysis and research prospect of effect of green manure returning on rice cropping ecosystem]. *Soils.* 2021. № 53(2). P. 243–249. https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2021.02.004.

Wang T., Bao X.G., Hu Z.Q. 河西绿洲灌区玉米间作绿肥高效种植模式研究 [Study on hight planting patterns of corn intercropping green manure in Hexi Oasis Irrigation]. *Gansu Agricultural Science and Technology.* 2010. № 41(8). P. 3–6.

Wang Y.J., Li T.C., Zhang D.Y., Jia M.L., Li H.K., Cao W.D. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响 [Effects of intercropping white clover on soil aggregates and soil organic carbon of aggregates in apple-white clover intercropping system]. *Acta Agrestia Sinica.* 2013. № 21(3). P. 485–493. https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2013.03.03.012.

Wen M.X., Shi X.J., Nie Z.P., Liu W.F., Zhou X.B. 椪柑果园种植夏季绿肥的效应 [Effect of summer green manure in Pankan tangerine orchard*]. Journal of Fruit Science.* 2011. № 28(6). P. 1077–1081. https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.2011.06.033.

Weng B.Q., Wang Y.X., Huang Y.B., Wang C.J., Ye J. 生草栽培下果园土壤固碳潜力研究 [Carbon sequestration capacity of soil in sod cultivation orchard]. *Ecology and Environmental Sciences.* 2013. № 22(6). P. 931–934. https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2013.06.008.

Wu X.H., Ran B., Wang W.H., Zhang A.H., Zhu Q., Zhang Q., Yao D.J. 贵州山区猕猴桃园适宜绿肥品种的筛选 [Selection of green fertilizer-suitable varieties in kiwi fruit orchard in Guizhou mountainous area]. *Seed.* 2019. № 38(12). P. 132–137. https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.12.132.

Wu Y.S., Zhang Y.M., Ji X.H., Zhang R., Liu D.L., Zhang Z.Y., Li W.Y., Chen X.S. 自然生草对黄河三角洲梨园土壤养分、酶活性及果实品质的影响 [Effects of natural grass on soil nutrient, enzyme activity and fruit quality of pear orchard in Yellow River Delta]. *Scientia Agricultura Sinica.* 2013. № 46(1). P. 99–108. https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2013.01.012.

Xi Z.M., Li H., Zhang Z.W., Huang Y.M., Wang B. 西北半干旱地区葡萄园生草对土壤水分的影响 [Effect of green coverings on soil water content in vineyards]. *Agricultural Research in the Arid Areas.* 2004. № 22(4). P. 123–126.

Xu B., Gui D.Y., Peng H.B., Huang Y.K., Sha Z.P. Green manuring alters reactive N losses and N pools in arable soils: A meta-regression study. *Science of the Total Environment.* 2024. № 934. P. 173256. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173256.

Xu B., Gui D.Y., Pu Q.Y., Sha Z.P. The fate of nitrogen derived from green manure and its influence on crop N agronomic performance. *European Journal of Agronomy.* 2025. № 168. P. 127646. https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127646.

Xu W.G., Zhang H.F., Chen Z.X. 魔芋套种玉米加绿肥高效栽培模式 [Efficient cultivation mode of konjac interplanting corn with green manure]. *Nongcunbaishitong.* 2009. № 2. P. 35–36. https://doi.org/10.19433/j.cnki.1006-9119.2009.02.042.

Xu X.B., Xu R., Zhang L.X., Hu X.F., Li X.Y., Xue Y.H., Xu Z.Y. 生态农业发展下的生态农场建设: 沿革、进展与展望 [Establishment of ecological farms in the development of ecological agriculture: Historical perspective, current progress, and future outlook]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture.* 2024. № 32(4). P. 701–712. https://doi.org/10.12357/cjea.20230677.

Yang B.J., Huang G.Q. 稻田冬种绿肥生态环境效应的研究进展 [The research progress of winter green manure on ecological environment effects in paddy field]. *Ecological Science.* 2016. № 35(5). P. 214–219. https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2016.05.029.

Yang W.Y., Wang Z., Li D., Zhang D., Zhou H. 不同冬绿肥对水稻田土壤有机质及酸碱度的影响 [Effects of different winter green manures on soil organic matter and pH in paddy fields]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences.* 2017. № 58(2). P. 239–240. https://doi.org/10.16178/j.issn.0528-9017.20170216.

Yousefi M., Dray A., Ghazoul J. Assessing the effectiveness of cover crops on ecosystem services: A review of the benefits, challenges, and trade-offs. *International Journalof Agricultural Sustainability.* 2024. № 22(1). P. 2335106. https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2335106.

Yue Q., Sun J.F., Hillier J., Sheng J., Guo Z., Zhu P.P., Cheng K., Pan G.X., Li Y.P., Wang X. Green manure rotation and application increase rice yield and soil carbon in the Yangtze River valley of China. *Pedosphere.* 2023. № 33(4). P. 589–599. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.009.

Yue T.X., Xi Z.M., Sun Y., Zhang Z.W., Nan H.L., Chen Y.F. 行间生草对葡萄园土壤微生物学特征的影响 [Soil microbial characteristics of interplanting grass in vineyard]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition).* 2009. № 37(9). P. 100–104. https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2009.09.027.

Zhang S.H., Wang J., Rajan G., Xin W.C., Hu Y.M., Zhang N.N. 黄土高原绿肥填闲种植的水分与产量效应: Meta 分析 [Effect of green manure on soil water and crop yield in the Loess Plateau of China: A meta-analysis]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture.* 2021. № 29(11). P. 1879–1892. https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210243.

Zhang X.X., Zhao L., An Y. 种草对桃园土壤物理性状、果树生长及果实品质的影响 [Effect of planting grass in peach orchard on soil physical properties, tree growth and peach quality]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science).* 2011. № 29(2). P. 58–63. https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1671-9964.2011.02.011.

References

Cao, W.D., Bao, X.G., & Xu, C.X., et al. (2017). 中国绿肥科研60年回顾与未来展望 [Reviews and prospects on science and technology of green manure in China]. 植物营养与肥料学报 *[Journal of Plant Nutrition and Fertilizer],* 23(6), 1450–1461. https://doi.org/10.11674/zwyf.17291 [in Chinese].

Cao, W.D. & Gao, S.J. (2023). 到2050年中国绿肥发展策略 [Chinese green manure development strategy by 2050]. 中国农业资源与区划 *[Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning],* 44(12), 1–9. [Electronic resource] URL: http://cjarrp.ijournals.cn/zgnyzyyqh/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=202312001&flag=1 (access date 11.09.2025). [in Chinese].

Cao, W.D., Zhou, G.P., & Gao, S.J. (2024). 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制 [Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health]. 植物营养与肥料学报 *[Journal of Plant Nutrition and Fertilizers],* 30(7), 1274–1283. https://doi.org/10.11674/zwyf.2024269 [in Chinese].

Cheng, B., Zhao, R.F., & Hua, X.Z., et al. (2021). 果园绿肥对土壤生境调控的研究进展 [Research progress of green manure mulching between rows of orchard on soil habitat regulation]. 天津农业科学 *[Tianjin Agricultural Sciences],* 27(12), 59–62. https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6500.2021.12.011 [in Chinese].

Ding, W.C., Xu, X.P., & He, P., et al. (2018). Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis. *Field Crops Research,* 227, 11–18. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.001 [in English].

Dong, H., Shi, G.F., & Mu, X.L., et al. (2020). 四种果园绿肥种子在 PEG-6000 模拟干旱胁迫下的萌发特性与抗旱性评价[Germination characteristics and evaluation on drought resistance of four kinds of orchardgreen manure crops under PEG-6000 stress]. 山东农业科学 *[Shandong Agricultural Sciences],* 52(11), 141–145. https://doi.org/10.14083/j.issn.1001-4942.2020.11.030 [in Chinese].

Fu, X.Q., Liu, J.E., & Huang, W.X. (2015). 南丰蜜橘园自然生草对土壤微生物和养分及果实品质的影响 [Effects of natural grass on soil microbiology, nutrient and fruit quality of Nanfeng tangerine yard]. 园艺学报 *[Acta Horticulturae Sinica],* 42(8), 1551–1558. https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2015-0023 [in Chinese].

Gao, S.B., Xu, Z.Y., & Jin, T., et al. (2019). 乡村振兴视角下中国生态农业发展分析 [Analysis of eco-agriculture construction based on rural revitalization in China]. 中国生态农业学报*(*中英文*) [Chinese Journal of Eco-Agriculture],* 27(2), 163–168. https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181009 [in Chinese].

Garba, I.I., Bell, L.W., & Williams, A. (2022). Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development,* 42(3), 34. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00760-0 [in English].

Gong, X., Liu, Y., & Yang, Y.S., et al. (2023). 茶园绿肥的研究进展 [Research progress of green manure in tea plantations]. 耕作与栽培 *[Tillage and Cultivation],* 43(6), 53–56. https://doi.org/10.13605/j.cnki.52-1065/s.2023.06.042 [in Chinese].

Gurevitch, J., Koricheva, J., & Nakagawa, S., et al. (2018). Meta-analysis and the science of research synthesis. *Nature,* 555(7695), 175–182. https://doi.org/10.1038/nature25753 [in English].

Hu, Q.J., Thomas, B.W., & Powlson, D., et al. (2023). Soil organic carbon fractions in response to soil, environmental and agronomic factors under cover cropping systems: A global metaanalysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 355, 108591. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108591 [in English].

Hu, X.F., Sun, R.H., & Sun, Y.F., et al. (2024). 我国典型生态农业主体的实践特征与发展建议–基于431个国家级生态农场的研究分析 [Analysis and suggestions on agroecological practices in China: A study based on 431 national eco-farms]. 中国生态农业学报*(*中英文*) [Chinese Journal of Eco-Agriculture],* 32(6), 1075–1085. https://doi.org/10.12357/cjea.20230676 [in Chinese].

Huang, H., Zhang, Z.H., & Wu, Q., et al. (2025). Global comprehensive evaluation shows that green manure enhances crop productivity while mitigating gaseous nitrogen losses. *Resources, Conservation and Recycling,* 220, 108351. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108351 [in English].

Huang, W.H., Wang, Q.Y., & Qian, H., et al. (2024). 间作绿肥对茶园生态系统的影响研究进展 [Research progress on the impact of intercropping green manure on tea garden ecosystems]. 中国茶叶 *[China Tea],* 46(8), 30–34 [in Chinese].

Jia, Q., Zheng, H.J., & Shi, Z.J., et al. (2024). Effects of straw and green manure addition on crop yield, soil properties and CH4 emissions: A meta-analysis. *Agronomy,* 14(11), 2724. https://doi.org/10.3390/agronomy14112724 [in English].

Khan, A.A., Azeem, I., & Hui, J., et al. (2025). Non-leguminous green manures improve labile phosphorus availability and crop yield in agroecosystems: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research,* 248, 106430. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106430 [in English].

Kichamu-Wachira, E., Xu, Z.H., & Reardon-smith, K., et al. (2021). Effects of climate-smart agricultural practices on crop yields, soil carbon, and nitrogen pools in Africa: A meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments,* 21(4), 1587–1597. https://doi.org/10.1007/s11368-021-02885-3 [in English].

Kong, D.P., Huang, S.F., & Yan, X.D., et al. (2010). 玉米-大豆合理间作模式研究 [Study on the reasonable soybean-maize intercropping pattern]. 河北农业科学 *[Journal of Hebei Agricultural Sciences],* 14(1), 1–2. https://doi.org/10.16318/j.cnki.hbnykx.2010.01.014 [in Chinese].

Li, F.L., Zheng, Y.R., & Zheng, T., et al. (2013). 果园带状生草对果园面源污染的控制效果 [Influence of zonal grass on non-point source pollution control in orchard]. 水土保持学报 *[Journal of Soil and Water Conservation]*, 27(3), 82–89. https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2013.03.026 [in Chinese].

Li, H.T., Chai, Q., & Wang, Q.M., et al. (2021). 绿洲灌区不同施氮水平下玉米绿肥间作模式的水分利用特征 [Water use characteristics of maize-green manure intercropping under different nitrogen application levels in the oasis irrigation area]. 中国农业科学 *[Scientia Agricultura Sinica],* 54(12), 2608–2618. https://doi.org/ 10.3864/j.issn.0578-1752.2021.12.011 [in Chinese].

Li, W.G., Yang, X.X., & Huang, C.G., et al. (2019). 饲料油菜作绿肥对后茬麦田土壤肥力及细菌群落的影响 [Effects of rapeseed green manure on soil fertility and bacterial community in dryland wheat field]. 中国农业科学 *[Scientia Agricultura Sinica],* 52(15), 2664–2677. https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2019.15.010 [in Chinese].

Li, Y.J., Zhao, W.L., & Zhu, H.J., et al. (2024). Green manure mediated improvement in saline soils in China: A meta-analysis. *Agronomy,* 14(9), 2068. https://doi.org/10.3390/agronomy14092068 [in English].

Li, Y.X., Zhang, G.N., & Miao, Y., et al. (2019). 鼠茅草生草对苹果园土壤理化性质的影响 [Effects of Vulpia myuros C. Gmelin planting on physical and chemical properties of soil in apple orchard]. 中国果菜 *[China Fruit & Vegetable],* 39(10), 86–89. https://doi.org/10.19590/j.cnki.1008-1038.2019.10.020 [in Chinese].

Liang, K.L., Wang, X.Q., & Du, Y.T., et al. (2022). Effect of legume green manure on yield increases of three major crops in China: A meta-analysis. *Agronomy,* 12(8), 1753. https://doi.org/10.3390/agronomy12081753 [in English].

Liu, C., Hasiyati, T., & Aibibula, Y. (2014). 库尔勒香梨果园间作饲草作物对土壤养分及小环境的影响 [Effects of intercropping forage grass on soil nutrients and microclimate in Korla pear orchard]. 新疆农业科学 *[Xinjiang Agricultural Sciences],* 51(11), 2073–2078. https://doi.org/10.6048/j.issn.1001-4330.2014.11.018 [in Chinese].

Liu, Z.K., Cao, W.D., & Qin, W.L., et al. (2009). 玉米-紫花苜蓿间作模式与效应研究 [A study on the pattern and effect of Zea mays intercropping with Medicago sativa]. 草业学报 *[Acta Prataculturae Sinica],* 18(6), 158–163 [in Chinese].

Lü, Z.C., Li, T.L., & Xie, Y.H., et al. (2021). 夏闲期种植翻压绿肥作物对麦田土壤细菌多样性的影响 [Effects of planting green manure crops on soil bacteria diversity in summer fallow period of winter wheat]. 山西农业科学 *[Journal of Shanxi Agricultural Sciences],* 49(3), 305–310. https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2481.2021.03.10 [in Chinese].

Lyu, Y.T., Yu, A.Z., & Lyu, H.Q., et al. (2021). 绿洲灌区玉米农田土壤团聚体组成及其稳定性对绿肥还田方式的响应 [Composition and stability of soil aggregates in maize farmlands under different green manure utilization patterns in an oasis irrigation area]. 中国生态农业学报*(*中英文*) [Chinese Journal of Eco-Agriculture],* 29(7), 1194–1204. https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200913 [in Chinese].

Ma, D.K., Yin, L.N., & Ju, W.L., et al. (2021). Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crops Research,* 266, 108146. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108146 [in English].

Meng, F.X., Dilixiati, & Yilihamu, et al. (2010). 伊犁河谷小麦绿肥适宜种植模式研究 [Study on the suitable planting pattern of wheat and green manure in the Yili River Valley]. 耕作与栽培 *[Tillage and Cultivation],* 30(4), 5–6. https://doi.org/10.13605/j.cnki.52-1065/s.2010.04.008 [in Chinese].

Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China (2020). NY/T 3667—2020 生态农场评价技术规范 [NY/T 3667—2020 Technical Specification for the Assessment of Ecological Farm]. 北京:中国农业出版社 *[Beijing: China Agriculture Press]* [in Chinese].

Muhammad, I., Wang, J., & Sainju, U.M., et al. (2021). Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis. *Geoderma,* 381, 114696. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114696 [in English].

Pang, J.G., Zhu, Z., & Wu, L. (2017). 桑园生草对土壤养分、微生物及桑葚品质的影响 [Effects of inter-row planting grasses on soil nutrient, microbial quantity and fruit quality in mulberry field]. 河北大学学报*(*自然科学版*) [Journal of Hebei University (Natural Science Edition)],* 37(3), 267−273. https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1000-1565.2017.03.008 [in Chinese].

Qian, J.F., Wu, J.S., & Huang, J.Q. (2014). 生草栽培对山核桃林地土壤养分及微生物多样性的影响 [Effects of sod-cultural practices on soil nutrients and microbial diversity in the Carya cathayensis forest]. 生态学报 *[Acta Ecologica Sinica],* 34(15), 4324−4332. https://doi.org/10.5846/stxb201212171814 [in Chinese].

Qin, J.Y., Zhang, Y., & Wang, X.M., et al. (2017). 绿肥间作对果园产量及经济收益的影响 [Effects of intercropping green manure on yield and economic benefits of orchard]. 广东农业科学 *[Guangdong Agricultural Sciences],* 44(1), 43−48. https://doi.org/10.16768/j.issn.1004-874X.2017.01.007 [in Chinese].

Qin, J.Y., Zhang, Y., & Wang, X.M., et al. (2016). 绿肥间作模式对苹果园土壤养分含量的影响 [Effect of inter planting green manure on soil nutrient content of apple orchard]. 北方园艺 *[Northern Horticulture],* (11), 169−172. https://doi.org/10.11937/bfyy.201611045 [in Chinese].

Qin, Q., Song, K., & Sun, L. J., et al. (2019). 猕猴桃园行间生草对土壤养分的影响及有效性评价 [Effect of inter-row sod system on the contents and availability of soil nutrients in a kiwifruit orchard]. 果树学报 *[Journal of Fruit Science],* 37(1), 68−76. https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20190241 [in Chinese].

Sun, J.P., Zhang, Y.X., & Li, Y.L., et al. (2016). 生草对梨园土壤微生物、酶活性和腐殖质含量的影响 [Effect of sod culture on soil microbes, enzyme activities and humus composition of pear orchard]. 果树学报 *[Journal of Fruit Science],* 33(S1), 129−135. https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.2016.S.18 [in Chinese].

Tian, F., Gou, Z.G., & Chen, Y., et al. (2008). 小麦-绿肥-玉米-大豆配套多熟种植模式的增产效应 [Study on yield increased by using the complete multiple cropping model of wheat-green manure-maize-soybean]. 贵州农业科学 *[Guizhou Agricultural Sciences],* 36(6), 29−31 [in Chinese].

Wang, J.H., Cao, K., & Fu, S.W., et al. (2009). 几种茶园绿肥的产量及对土壤水分、温度的影响 [Yield of green manure in several tea gardens and effects of green manure on soil moisture and temperature]. 浙江农业科学 *[Journal of Zhejiang Agricultural Sciences],* 50(1), 100−102. https://doi.org/10.16178/j.issn.0528-9017.2009.01.017 [in Chinese].

Wang, Q.S., Bo, Y.X., & Yu, K.L., et al. (2021). 绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望 [Analysis and research prospect of effect of green manure returning on rice cropping ecosystem]. 土壤 *[Soils],* 53(2), 243−249. https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2021.02.004 [in Chinese].

Wang, T., Bao, X.G., & Hu, Z.Q. (2010). 河西绿洲灌区玉米间作绿肥高效种植模式研究 [Study on hight planting patterns of corn intercropping green manure in Hexi Oasis Irrigation]. 甘肃农业科技 *[Gansu Agricultural Science and Technology],* 41(8), 3−6 [in Chinese].

Wang, Y.J., Li, T.C., & Zhang, D.Y., et al. (2013). 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响 [Effects of intercropping white clover on soil aggregates and soil organic carbon of aggregates in apple-white clover intercropping system]. 草地学报 *[Acta Agrestia Sinica],* 21(3), 485−493. https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2013.03.03.012 [in Chinese].

Wen, M.X., Shi, X.J., & Nie, Z.P., et al. (2011). 椪柑果园种植夏季绿肥的效应 [Effect of summer green manure in Pankan tangerine orchard]. 果树学报 *[Journal of Fruit Science],* 28(6), 1077−1081. https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.2011.06.033 [in Chinese].

Weng, B.Q., Wang, Y.X., & Huang, Y.B., et al. (2013). 生草栽培下果园土壤固碳潜力研究 [Carbon sequestration capacity of soil in sod cultivation orchard]. 生态环境学报 *[Ecology and Environmental Sciences],* 22(6), 931−934. https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2013.06.008 [in Chinese].

Wu, X.H., Ran, B., & Wang, W.H., et al. (2019). 贵州山区猕猴桃园适宜绿肥品种的筛选 [Selection of green fertilizer-suitable varieties in kiwi fruit orchard in Guizhou mountainous area]. 种子 *[Seed],* 38(12), 132−137. https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.12.132 [in Chinese].

Wu, Y.S., Zhang, Y.M., & Ji, X.H., et al. (2013). 自然生草对黄河三角洲梨园土壤养分、酶活性及果实品质的影响 [Effects of natural grass on soil nutrient, enzyme activity and fruit quality of pear

orchard in Yellow River Delta]. 中国农业科学 *[Scientia Agricultura Sinica],* 46(1), 99–108. https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2013.01.012 [in Chinese].

Xi, Z.M., Li, H., & Zhang, Z.W., et al. (2004). 西北半干旱地区葡萄园生草对土壤水分的影响 [Effect of green coverings on soil water content in vineyards]. 干旱地区农业研究 *[Agricultural Research in the Arid Areas],* 22(4), 123–126. [in Chinese].

Xu, B., Gui, D.Y., & Peng, H.B., et al. (2024). Green manuring alters reactive N losses and N pools in arable soils: A meta-regression study. *Science of the Total Environment,* 934, 173256. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173256 [in English].

Xu, B., Gui, D.Y., & Pu, Q.Y., et al. (2025). The fate of nitrogen derived from green manure and its influence on crop N agronomic performance. *European Journal of Agronomy,* 168, 127646. https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127646 [in English].

Xu, W.G., Zhang, H.F., & Chen, Z.X. (2009). 魔芋套种玉米加绿肥高效栽培模式 [Efficient cultivation mode of konjac interplanting corn with green manure]. 农村百事通 *[Nongcunbaishitong],* 2, 35–36. https://doi.org/10.19433/j.cnki.1006-9119.2009.02.042 [in Chinese].

Xu, X.B., Xu, R., & Zhang, L.X., et al. (2024). 生态农业发展下的生态农场建设:沿革、进展与展望 [Establishment of ecological farms in the development of ecological agriculture: Historical perspective, current progress, and future outlook]. 中国生态农业学报*(*中英文*) [Chinese Journal of Eco-Agriculture],* 32(4), 701–712. https://doi.org/10.12357/cjea.20230677 [in Chinese].

Yang, B.J. & Huang, G.Q. (2016). 稻田冬种绿肥生态环境效应的研究进展 [The research progress of winter green manure on ecological environment effects in paddy field]. 生态科学 *[Ecological Science],* 35(5), 214–219. https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2016.05.029 [in Chinese].

Yang, W.Y., Wang, Z., & Li, D., et al. (2017). 不同冬绿肥对水稻田土壤有机质及酸碱度的影响 [Effects of different winter green manures on soil organic matter and pH in paddy fields]. 浙江农业科学 *[Journal of Zhejiang Agricultural Sciences],* 58(2), 239–240. https://doi.org/10.16178/j.issn.0528-9017.20170216 [in Chinese].

Yousefi, M., Dray, A., & Ghazoul, J. (2024). Assessing the effectiveness of cover crops on ecosystem services: A review of the benefits, challenges, and trade-offs. *International Journal of Agricultural Sustainability,* 22(1), 2335106. https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2335106 [in English].

Yue, Q., Sun, J.F., & Hillier, J., et al. (2023). Green manure rotation and application increase rice yield and soil carbon in the Yangtze River valley of China. *Pedosphere,* 33(4), 589–599. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.009 [in English].

Yue, T.X., Xi, Z.M., & Sun, Y., et al. (2009). 行间生草对葡萄园土壤微生物学特征的影响 [Soil microbial characteristics of interplanting grass in vineyard]. 西北农林科技大学学报 *(*自然科学版*) [Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)],* 37(9), 100–104. https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2009.09.027 [in Chinese].

Zhang, S.H., Wang, J., & Rajan, G., et al. (2021). 黄土高原绿肥填闲种植的水分与产量效应: Meta分析 [Effect of green manure on soil water and crop yield in the Loess Plateau of China: A meta-analysis]. 中国生态农业学报*(*中英文*) [Chinese Journal of Eco-Agriculture],* 29(11), 1879–1892. https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210243 [in Chinese].

Zhang, X.X., Zhao, L., & An, Y. (2011). 种草对桃园土壤物理性状、果树生长及果实品质的影响 [Effect of planting grass in peach orchard on soil physical properties, tree growth and peach quality]. 上海交通大学学报*(*农业科学版*) [Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science)],* 29(2), 58–63. https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1671-9964.2011.02.011 [in Chinese].

Отримано: 14.10.2025
Прийнято: 10.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 633.358:631.53.027:631.582(477)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.16

ВПЛИВ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ НА БІОМЕТРИЧНІ ПОКАЗНИКИ Й УРОЖАЙНІСТЬ ЗЕРНА ГОРОХУ ПІСЛЯ РІЗНИХ ПОПЕРЕДНИКІВ

О. Г. Гудзенко[1], О. О. Іжболдін[2]

Потреба в ресурсозбереженні й стабілізації врожаю зерна робить передпосівну обробку насіння гороху інокулянтами та протруйниками важливим елементом адаптивних технологій у Північному Степу України. Метою дослідження було з'ясувати ефективність передпосівної обробки насіння гороху (Pisum sativum L., сорт Мадонна) інокулянтами й фунгіцидними протруйниками, а також їх комбінаціями за різних попередників, установити внесок біометричних елементів продуктивності у варіацію врожайності в умовах північного Степу України. Польові дослідження проводили у 2023–2025 рр. на чорноземі звичайному малогумусовому середньосуглинковому в умовах навчально-дослідного поля ДДАЕУ. Двофакторний експеримент включав фактор А – попередник (пшениця озима, соняшник) і фактор В – передпосівна обробка насіння: без обробки (контроль); фунгіцидні протруйники Вайбранс РФС, Редіго, Сферіко, Авідо (по 1,0 л/т); інокулянти Ризолайн 3,0 л/т + Ризосейв 1,0 л/т; Атува 2,0 л/т + Премакс 0,5 л/т; та їх комбінації з протруйниками. Сівбу проводили в оптимальні строки нормою 1,3 млн схожих насінин/га (міжряддя 15 см) на фоні $P_{30}K_{30}$; догляд за посівами відповідав зональними рекомендаціям. Облік: біометричні параметри рослин (висота, кількість бобів, зерен у бобі, маса зерна з рослини), урожайність перераховано на 14% вологості; статистика – дисперсійний аналіз. У сівозміні при розміщенні гороху після пшениці озимої врожайність була на рівні 2,53 т/га; використання протруйників окремо підвищували врожайність на 0,10–0,15 т/га, тоді як інокуляція без протруйника – на 0,20–0,29 т/га. Найвищі показники сформували комбіновані схеми інокулянт + протруйник: Ризолайн + Ризосейв + Вайбранс РФС – 2,90 т/га; з Редіго – 2,88 т/га; зі Сферіко – 2,89 т/га; з Авідо – 2,87 т/га. Приріст урожайності зумовлений переважно зростанням озерненості (3,8–4,2 зернин з боба) та маси зерна з рослини (2,43–2,79 г) за стабільної маси 1000 зерен (215–221 г) і незначного збільшення висоти рослин (1–3 см). Після соняшника базовий рівень урожайності знижувався до 2,28 т/га, однак фактична реакція рослин на інокуляцію та її комбінації була вищою й кращі варіанти досягали 2,66–2,68 т/га, що давало змогу істотно нівелювати негативну післядію попередника. Узгоджені зміни елементів структури врожаю з фактичною прибавкою підтверджують провідну роль підвищення озерненості бобів і маси зерна з рослини в реалізації ефекту біологічної обробки насіння. За оптимальної норми сівби 1,3 млн схожих

[1] аспірант кафедри рослинництва
(Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро)
e-mail: hudzenko.oh@dsau.dp.ua
ORCID: 0009-0002-2742-6995
[2] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри рослинництва
(Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро)
e-mail: izhboldin.o.o@dsau.dp.ua
ORCID: 0000-0002-8076-7206

насінин/га та дотримання регламентованої технології інокуляція в поєднанні з протруйником забезпечувала стабільний приріст урожайності в середньому на 0,25–0,37 т/га, що робить таку схему доцільною як на полі після пшениці озимої, так і після соняшнику. Практично рекомендовано проводити інокуляцію в день сівби (Ризолайн + Ризосейв або Атува + Премакс) у поєднанні з одним із сучасних протруйників (Вайбранс РФС/Редіго/Сферіко/Авідо), дотримуючись сумісності препаратів та умов збереження життєздатності штамів мікроорганізмів, що забезпечує збалансоване поєднання стартового захисту й посиленої симбіотичної азотфіксації.

Ключові слова: *горох, насіння, інокуляція, протруйники, пшениця озима, соняшник, продуктивність, маса 1000 зерен, врожайність.*

EFFECT OF PRE-SOWING SEED TREATMENT ON BIOMETRIC TRAITS AND YIELD OF PEA AFTER DIFFERENT PRECEDING CROPS

O. H. Hudzenko, O. O. Izhboldin

The need to conserve resources and stabilize yields makes pre-sowing treatment of pea seed with inoculants and fungicidal seed dressings a key element of adaptive technologies in the Northern Steppe. The aim of the study was to determine the effectiveness of pre-sowing seed treatment of field pea (Pisum sativum L., cv. Madonna) with various inoculants and fungicidal seed dressings, as well as their combinations under different preceding crops, and to quantify the contribution of biometric yield components to yield variation in the Northern Steppe of Ukraine. Field experiments were conducted in 2023–2025 on ordinary low-humus, medium-loam chernozem at the experimental farm of Dnipro State Agrarian and Economic University. The two-factor design comprised factor A – preceding crop (winter wheat, sunflower) and factor B – seed treatment: untreated control; fungicidal dressings Vibrance RFC, Redigo, Sferico, Avido (each at 1.0 L t^{-1}); inoculants Rizolain 3.0 L t^{-1} + RhizoSave 1.0 L t^{-1}; Atuva 2.0 L t^{-1} + Premax 0.5 L t^{-1}; and their combinations with fungicides. Sowing was carried out early spring at 1.3 million viable seeds ha^{-1} (row spacing 15 cm) on a $P_{30}K_{30}$ background; crop protection followed label recommendations. Measurements included plant height, pods per plant, seeds per pod, seed mass per plant, and thousand-seed weight. Grain yield was adjusted to 14% moisture. With winter wheat as the preceding crop, the control yielded 2.53 t ha^{-1}; single fungicidal dressings increased yield by 0.10–0.15 t ha^{-1}, whereas inoculation without a dressing added 0.20–0.29 t ha^{-1}. The highest yields were obtained from inoculant + fungicide combinations: Rizolain + RhizoSave + Vibrance RFC – 2.90 t ha^{-1}; with Redigo – 2.88 t ha^{-1}; with Sferico – 2.89 t ha^{-1}; with Avido –2.87 t ha^{-1}. Yield gains were driven mainly by higher seed number per pod (3.8–4.2) and greater seed mass per plant (2.43–2.79 g), with stable or slightly higher (215–221 g) and a modest increase in plant height (1–3 cm). After sunflower, baseline yield declined to 2.28 t ha^{-1} (0.20−0.30 t ha^{-1} compared with wheat), yet the relative response to inoculation and its combinations was greater: the best variants reached 2.66–2.68 t ha^{-1}, effectively offsetting the negative predecessor effect provided residues were finely chopped and evenly distributed. The coherence between shifts in yield components and actual yield confirms the leading role of improved pod seed set and seed mass per plant in realizing the benefits of biological seed treatment. At an optimal seeding rate of 1.3 million viable seeds ha^{-1} and under adherence to the standard production protocol, inoculation combined with a fungicidal seed treatment provided a consistent average yield increase of 0.25–0.37 t ha^{-1}, making this approach appropriate both after winter wheat and after sunflower. Practically, inoculation on the day of sowing (Rizolain + RhizoSave or Atuva + Premax) combined with one of the modern fungicidal dressings (Vibrance RFC/ Redigo/ Sferico/ Avido), while observing product compatibility and inoculant viability requirements, provides a balanced combination of early disease protection and enhanced symbiotic N fixation.

Key words: *pea, seed, inoculation, fungicidal, winter wheat, sunflower, productivity, thousand-kernel weight, yield.*

Вступ

Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення ефективності вирощування гороху (*Pisum sativum* L.) в умовах Північного Степу України, де поєднання гідротермічної нестабільності після дії попередників і фітосанітарних ризиків обмежує реалізацію потенціалу цією культури (Гадзало та ін., 2022; Shevchuk, 2023). Горох є стратегічним джерелом рослинного білка та важливим елементом біологізації землеробства завдяки фіксації атмосферного азоту, однак чутливо реагує на стартові стреси, ураження насіннєвими та ґрунтовими інфекціями й дефіцит доступних елементів живлення в ранні фази органоге-

незу (Лапа та ін., 1996; Патика та ін., 2003). Вирішальною передумовою рівномірних і дружних сходів, формування оптимальної густоти стояння та стабільної врожайності є передпосівна обробка насіння – інокуляція ефективними штамами ризобій, застосування мікродобрив у хелатних формах і сучасних протруйників комплексної дії (Мусатов і Іщенко, 2008; Гирка та ін., 2018; Лемішко, 2018).

Фактор попередника посилює або нівелює ефект передпосівних обробок. Після озимої пшениці зазвичай зберігаються кращі умови зволоження та мінерального живлення, тоді як після соняшнику можливі дефіцит вологи, тимчасова іммобілізація азоту й підвищене інфекційне навантаження, що зменшує ефективність симбіотичної азотфіксації і стартового росту (Цибулько, Попов, 1993; Петриченко та ін., 2003; Kaminskyi et al., 2022). У відкритих наукових публікаціях про Північний Степ продемонстровано, що біологічні препарати (ризогенні та фосформобілізуючі бактерії), мікродобрива й регулятори росту здатні підвищувати показники фотосинтетичного потенціалу, елементи структури врожаю та збільшувати збір зерна на 0,26–0,60 т/га залежно від поєднання прийомів (Мусатов і Іщенко, 2008; Лемішко, 2018). Разом із тим ефект суттєво варіює за попередниками та погодними умовами, а питання, які саме комбінації обробок забезпечують найкраще поєднання біометричних показників і врожайності після різних попередників за сталої норми висіву, залишається відкритим і потребує уточнення на сучасних препаратах (Гирка та ін., 2018; Лихочвор і Андрушко, 2020; Raj et al., 2021).

За даними екологічного й технологічного випробування сортів та елементів інтенсивних технологій, оптимізація передпосівної обробки насіння гороху забезпечує не лише більшу продуктивність, а й кращі економічні й енергетичні показники виробництва (Гирка та ін., 2018; Лихочвор і Андрушко, 2020; Кириченко та ін., 2025). Водночас бракує робіт, де в єдиному експериментальному контексті порівняно ефективність протруйників, інокулянтів і мікродобрив і їхніх комбінацій окремо після озимої пшениці та після соняшнику за оптимальної норми сівби й рекомендованої технології догляду за посівами.

Мета дослідження – оцінити вплив передпосівної обробки насіння (протруйники, інокулянти) та їхніх комбінацій на біометричні й урожайність гороху після різних попередників (озима пшениця та соняшник) в умовах Північного Степу України.

Наукова новизна полягає в порівнянні ефективності комбінацій передпосівних обробок за двох контрастних попередників із кількісним узгодженням біометричних і врожайних показників. Практичне значення – формування доказових рекомендацій щодо вибору протруйників, інокулянтів залежно від попередника для підвищення стабільності врожайності зерна гороху в ресурсно-обмежених умовах Степу.

Матеріал і методи

Польові дослідження з горохом посівним сорту Мадонна виконували у 2023–2025 рр. на науково-дослідному полі Навчально-наукового центру Дніпровського державного аграрно-економічного університету. Ґрунт дослідної ділянки – чорнозем звичайний малогумусний середньосуглинковий із потужністю гумусового горизонту 60–75 см; агротехнічні заходи відповідали зональним рекомендаціям для північного Степу України. Дослід закладали як двофакторний з урахуванням взаємодії факторів А×В: фактор А – попередник (пшениця озима, соняшник); фактор В – передпосівна обробка насіння: без обробки (контроль); Вайбранс РФС 1,0 л/т; Рediго 1,0 л/т; Сферіко 1,0 л/т; Авідо 1,0 л/т; Ризолайн 3,0 л/т + Ризосейв 1,0 л/т; Атува 2,0 л/т + Премакс 0,5 л/т; а також комбінації інокулянтів із фунгіцидними протруйниками – Ризолайн + Ризосейв + Вайбранс РФС (3,0 + 1,0 + 1,0 л/т), Ризолайн + Ризосейв + Рediго (3,0 + 1,0 + 1,0 л/т), Ризолайн + Ризосейв + Сферіко (3,0 + 1,0 + 1,0 л/т), Ризолайн + Ризосейв + Авідо (3,0 + 1,0 + 1,0 л/т), Атува + Премакс + Вайбранс РФС (2,0 + 0,5 + 1,0 л/т). Розміщення варіантів було систематичним з рендомізацією в межах повторень; повторність чотириразова, облікова площа ділянки – 28,0 м²; обмолот проводили суцільно з облікової площі.

Основний обробіток ґрунту включав оранку на глибину 23–25 см; передпосівну підготовку виконували весняною культивацією з боронуванням. Сівбу здійснювали рано навесні за прогрівання ґрунту до 3–5 °С нормою висіву 1,3 млн схожих насінин на гектар із міжряддями 15 см і загортанням насіння на 5–6 см. Система живлення була уніфікованою для всіх варіантів ($P_{30}K_{30}$ під передпосівну культивацію). Захист рослин проводили за чинними регламентами для гороху; після соняшнику додат-

ково забезпечували рівномірне подрібнення та розподіл пожнивних решток.

Біометричні показники визначали за методикою польового досліду на 20 типових рослинах із кожної ділянки: висоту рослин (см), кількість бобів із рослини (шт.), кількість зерен у бобі (шт.), масу зерна з рослини (г), масу 1000 зерен (г). Урожайність визначали шляхом суцільного обмолоту облікової площі з перерахунком до стандартної вологості 14% і виражали в т/га. Статистичну обробку результатів проводили за допомогою дисперсійного аналізу (Ушкаренко та ін., 2008; Мазур та ін., 2020).

Метою дослідження було з'ясувати реакцію врожайності гороху сорту Мадонна на поєднання інокулянтів і фунгіцидних протруйників за різних попередників у степових умовах і сформувати практичні рекомендації для виробництва з урахуванням контрастних погодних умов, зокрема посушливого 2025 року.

Результати та їх обговорення

За даними польових дослідів за період 2023–2025 рр., після попередника пшениця озима всі варіанти передпосівної обробки насіння забезпечили достовірне підвищення врожайності порівняно з контролем (2,53 т/га) (таблиця 1). Найвищий рівень урожайності забезпечило у варіанті з поєднанням інокулянтів із фунгіцидним протруйником Ризолайн + Ризосейв + Вайбранс РФС – 2,90 т/га, що на 0,37 т/га (14,6%) більше від контролю. Статистично не відрізнялися від нього комбінації Ризолайн + Ризосейв + Сферіко (2,89 т/га) та Ризолайн + Ризосейв + Рediго (2,88 т/га), відмінність між цими трьома схемами не перевищувала показника найменшої істотної різниці.

Інокуляція без фунгіциду також була ефективною: Ризолайн + Ризосейв забезпечила 2,82 т/га, а Атува + Премакс – 2,73 т/га. Застосування лише протруйників давало менші, але достовірні прибавки в межах

Таблиця 1

Елементи продуктивності рослин гороху залежно від передпосівної обробки насіння та їх комбінацій після попередника пшениця озима (середнє за 2023–2025 рр.)

Варіанти	**Висота рослин, см**	**Кількість бобів з рослини, шт,**	**Кількість зерен у бобі, шт.**	**Маса зерна з рослини, г**	**Маса 1000 зерен, г**	**Урожайність, т/га**
Без обробки	65,1	2,8	3,8	2,43	215,2	2,53
Вайбранс РФС (1 л/т)	66,9	3,1	4,0	2,58	217,1	2,68
Рediго (1 л/т)	66,5	3,0	3,9	2,56	217,0	2,66
Сферіко (1 л/т)	66,3	3,0	3,9	2,55	216,2	2,65
Авідо (1 л/т)	66,3	3,0	3,8	2,53	216,2	2,63
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т)	67,8	3,1	4,0	2,71	219,3	2,82
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т)	66,5	3,0	4,0	2,62	218,6	2,73
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т) + Вайбранс РФС (1 л/т)	68,1	3,1	4,1	2,79	220,5	2,90
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т) + Рediго (1 л/т)	67,9	3,1	4,1	2,77	219,9	2,88
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т) + Сферіко (1 л/т)	68,0	3,1	4,2	2,78	220,1	2,89
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т) + Авідо (1 л/т)	67,8	3,1	4,1	2,76	219,3	2,87
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т) + Вайбранс РФС (1 л/т)	67,6	3,1	4,1	2,74	219,1	2,85
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т) + Рediго (1 л/т)	67,6	3,1	4,1	2,73	219,2	2,84
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т) + Сферіко (1 л/т)	67,4	3,1	4,0	2,72	219,2	2,83
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т) + Авідо (1 л/т)	67,2	3,1	4,0	2,70	219,0	2,81
$НІР_{05}$	1,2	0,22	0,1	0,09	1,3	0,10

2,68–2,63 т/га для Вайбранс РФС, Редіго, Сферіко й Авідо відповідно 0,10–0,15 т/га, або 4,0–5,9%.

Підвищення врожайності після попередника пшениці озимої супроводжувалося зростанням майже всіх компонентів структури врожаю. Висота рослин зросла на 1,2–3,0 см, кількість бобів – 0,2–0,3 шт./рослину, кількість зерен у бобі – 0,1–0,4 шт., маса зерна з рослини – 0,15–0,36 г, маса 1000 зерен – 1,0–5,3 г.

Найбільший внесок у приріст урожайності забезпечили маса зерна з рослини й озерненість бобів: у найпродуктивніших комбінаціях (Ризолайн + Ризосейв + фунгіцид) маса зерна зросла на 0,33–0,36 г, а кількість зерен у бобі – на 0,3–0,4 шт., що узгоджується з відомими закономірностями підвищення продуктивності гороху за активізації симбіотичної азотфіксації та зменшення інфекційного навантаження на сходи.

Після попередника соняшник спостерігали загальне зниження продуктивності й біометричних показників (табл. 2). Урожайність на контролі становила 2,28 т/га, що на 0,25 т/га (9,9%) менше, ніж після пшениці озимої. Разом із тим характер ростової реакції зберігався: найвищі значення отримано у варіантах із комбінацією інокулянтів і протруйника – Ризолайн + Ризосейв + Вайбранс РФС/Редіго до 2,68 т/га, а також Ризолайн + Ризосейв + Сферіко (2,67 т/га) й Авідо (2,66 т/га). Інокуляція без фунгіциду була менш ефективною, забезпечила Ризолайн + Ризосейв – 2,58 т/га, Атува + Премакс – 2,48 т/га. Використання лише протруйників забезпечило додаткове одержання зерна

Таблиця 2

Елементи продуктивності рослин гороху залежно від передпосівної обробки насіння та їх комбінацій після попередника соняшника (середнє за 2023–2025 рр.)

Варіанти	**Висота рослин, см**	**Кількість бобів з рослини, шт,**	**Кількість зерен у бобі, шт,**	**Маса зерна з рослини, г**	**Маса 1000 зерен, г**	**Урожайність, т/га**
Без обробки	61,9	2,87	3,6	2,19	212,1	2,28
Вайбранс РФС (1 л/т)	63,0	2,96	3,7	2,35	214,0	2,44
Редіго (1 л/т)	63,4	2,94	3,7	2,33	214,2	2,42
Сферіко (1 л/т)	63,2	2,91	3,7	2,31	213,9	2,40
Авідо (1 л/т)	62,8	2,90	3,7	2,30	213,8	2,39
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т)	64,3	2,94	3,9	2,48	216,2	2,58
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т)	63,1	2,92	3,8	2,38	215,3	2,48
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т) + Вайбранс РФС (1 л/т)	65,5	3,03	3,9	2,58	218,1	2,68
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т) + Редіго (1 л/т)	65,1	3,03	3,9	2,58	218,0	2,68
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв (1 л/т) + Сферіко (1 л/т)	65,0	3,03	3,9	2,57	217,2	2,67
Ризолайн (3 л/т) + Ризосейв 1 л/т + Авідо (1 л/т)	64,9	3,02	3,9	2,56	217,1	2,66
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т) + Вайбранс РФС (1 л/т)	64,1	2,99	3,9	2,53	217,0	2,63
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т) + Редіго (1 л/т)	64,0	2,97	3,9	2,51	216,9	2,61
Атува 2 л/т + Премакс 0,5 л/т + Сферіко 1 л/т	64,2	2,97	3,9	2,50	216,4	2,60
Атува (2 л/т) + Премакс (0,5 л/т) + Авідо (1 л/т)	63,8	2,96	3,9	2,49	216,3	2,59
$НІР_{05}$	1,1	0,21	0,1	0,10	2,1	0,09

на рівні 0,11–0,16 т/га (4,8–7,0 %), що достовірно за $НІР_{05}$ = 0,09 т/га.

За біометричними показниками рослин гороху після попередника соняшника достовірно підвищувалися висота рослин на 1–3 см, кількість зерен у бобі – 0,1–0,3 шт., маса 1000 зерен на 2–6 г і маса зерна з рослини – 0,12–0,39 г. Динаміка кількості бобів на рослині була менш контрастною зростання переважно в межах 0,05–0,16 шт. і здебільшого не перевищувала найменшої істотної різниці.

Порівняння попередників підтверджує відомий депресивний ефект соняшнику на горох, а саме зменшення врожайності, маси 1000 зерен і маси зерна з рослини супроводжувалося помірним зниженням висоти. Імовірні причини – нижчий запас доступної вологи, вища частка грубих пожнивних решток із широким співвідношенням C:N, а також можливий алелопатичний вплив. Попри це, комбіновані схеми інокуляція + фунгіцид частково нівелювали негативний фон, забезпечивши прибавки 13–18% і зменшивши розрив з попередником пшениця озима до мінімуму, різниця при цьому сягала 0,22 т/га.

Висновки

Найвищу результативність у північному Степу за норми висіву 1,3 млн схожих насінин на га забезпечує поєднання інокуляції насіння ризобіальними препаратами з фунгіцидними протруювання. Комбінації типу Ризолайн + Ризосейв + (Вайбранс РФС/Редіго/Сферіко/Авідо) забезпечили 2,88–2,90 т/га після попередника пшениці озимої та 2,66–2,68 т/га після соняшнику.

Основу приросту врожайності формують озерненість бобів (3,8–4,2 зернини з боба) та маса зерна з рослини (2,43–2,79 г) за помірного приросту маси 1000 зерен (3–5 г). Зміни цих елементів продуктивності були статистично достовірними й узгоджені з величиною прибавки врожаю.

Інокуляція без фунгіцидів стабільно підвищує врожайність на 8–13% і є мінімально необхідним прийомом за ресурсних обмежень, тільки фунгіцидні протруйники забезпечували менший, але достовірний ефект 4–7%, через збереження схожості й захист ранніх фаз росту рослин.

Соняшник як попередник знижує базову врожайність зерна гороху на 0,20–0,30 т/га відносно пшениці озимої, однак відносна реакція на інокуляцію та її поєднання з протруйником є вищою, що дає змогу суттєво нівелювати негативну післядію за умови якісного розподілу пожнивних решток і оптимальної сівби.

Список використаної літератури

Гадзало Я.М., Ібатуллін І.І., Лузан Ю.Я. Інституціональне забезпечення функціонування продовольчої системи України в сучасних кризових умовах. *Вісник аграрної науки.* 2022. № 8. С. 5–15. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202208-01

Гирка А.Д., Ткаліч І.Д., Сидоренко Ю.Я., Бочевар О.В., Ільєнко О.В. Актуальні аспекти технології вирощування гороху в умовах Північного Степу України. *Вісник аграрної науки.* 2018. № 2(779). С. 31–34. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201802-05

Кириченко В.В., Петренкова В.П., Кобизєва Л.Н. Результати наукових досліджень з селекції зернобобових культур в Інституті рослинництва ім. В.Я. Юр'єва УААН. *Селекція і насінництво.* 2005. Вип. 90. С. 3–13.

Лапа І.В., Камінський В.Ф., Смоляр М.І. Продуктивність гороху залежно від дози і співвідношення мінеральних добрив. *Збірник наукових праць Інституту землеробства УААН.* 1996. Вип. 1. С. 221–227.

Лемішко С.М. Ефективність використання біопрепаратів та стимуляторів росту у посівах гороху в умовах Північного Степу України. *Зернові культури.* 2018. Т. 2. № 1. С. 82–87.

Лихочвор В.В., Андрушко М.О. Продуктивність гороху залежно від сорту та норм висіву. *Вісник аграрної науки Причорномор'я.* 2020. Вип. 2. С. 54–60. https://doi.org/10.31521/2313-092X/2020-2(106).

Мазур В.А., Липовий В.Г., Мордванюк М.О. Методика наукових досліджень в агрономії : навчальний посібник. Вінниця : ВЦ ТОВ «ТВОРИ», 2020. 204 с.

Мусатов А.Г., Іщенко В.А. Вплив елементів технології на ефективність вирощування гороху в умовах Північного Степу правобережжя України. *Наукові праці Інституту сільського господарства Степу НААН.* 2008. С. 55–58.

Патика В.П., Каць С.Я., Волкогон В.В. Біологічний азот. Київ : Світ, 2003. 424 с.

Петриченко В.Ф., Камінський В.Ф., Патика В.П. Бобові культури і сталий розвиток агроекосистем. *Корми і кормовиробництво.* 2003. Вип. 51. С. 3–6.

Ушкаренко В.О., Нікішенко В.Л., Голобородько С.П., Коковіхін С.В. Дисперсійний і кореляційний аналіз у землеробстві та рослинництві: навчальний посібник. Херсон : Айлант, 2008. 272 с.

Цибулько В.С., Попов С.І. Насінна продуктивність гороху та сої залежно від дії регуляторів росту. *Селекція і насінництво.* 1993. Вип. 75. С. 57–61.

Kaminskyi V., Bulgakov V., Tkachenko M., Kolomiiets M., Kaminska V., Ptashnik M., Kiernicki, Z.. Research into Comparative Performance of Different Tillage and Fertilization Systems Applied to Grey Forest Soil of Forest Steppe in Grain Crop Rotation. *Journal of Ecological Engineering.* 2022. Vol. 23. № 12. P. 163–178. https://doi.org/10.12911/22998993/155057.

Raj M.V., Rai P.K., Nagar S., Goud B.S. Pre-Sowing Seed Traetments of Panchagavya and Plant Growth Regulators on Growth, Yield And Yield Attributing Traits of Field Pea (*Pisum sativum* L.) Variety-IPF (4-9). *International Journal of Plant & Soil Science.* 2021. № 33(19). P. 139–144. https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i1930610

Shevchuk V.V. Effect of pre-sowing seed treatment and foliar fertilization on growth processes of winter pea varieties. *Tavrian Scientific Bulletin.* 2023. Vol. 129. P. 177–188. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2023.129.23.

References

Gadzalo, Y.M., Ibatullin, I.I., & Luzan, Y.Y. (2022). Instytutsionalne zabezpechennia funktsionuvannia prodovolchoi systemy Ukrainy v suchasnykh kryzovykh umovakh. [Institutional support for the functioning of Ukraine's food system under modern crisis conditions]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agricultural Science],* 8, 5–15. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202208-01 [in Ukrainian].

Hyrka, A.D., Tkalich, I.D., Sydorenko, Yu. Ya., Bochevar, O.V., & Ilienko, O.V. (2018). Aktualni aspekty tekhnolohii vyroshchuvannia horokhu v umovakh Pivnichnoho Stepu Ukrainy [Actual aspects of pea growing technology in the Northern Steppe of Ukraine]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Bulletin of Agricultural Science],* 2, 31–34. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201802-05 [in Ukrainian].

Kyrychenko, V.V., Petrenkova, V.P., & Kobyzieva, L.N. (2005). Rezultaty naukovykh doslidzhen z selektsii zernobobovykh kultur v Instytuti roslynnytstva im. V. Ya. Yurieva UAAN [Results of legume breeding research at the V. Ya. Yuriev Institute of Plant Production]. *Selektsiia i nasinnytstvo [Breeding and Seed Production]*, 90, 3–13 [in Ukrainian].

Lapa, I.V., Kaminskyi, V.F., & Smoliar, M.I. (1996). Produktyvnist horokhu zalezhno vid dozy i spivvidnoshennia mineralnykh dobryv [Pea productivity depending on dose and ratio of mineral fertilizers]. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu zemlerobstva UAAN [Collection of scientific works of the Institute of Agriculture of the UAAN],* 1, 221–227 [in Ukrainian].

Lemishko, S.M. (2018). Efektyvnist vykorystannia biopreparativ ta stymuliatoriv rostu u posivakh horokhu v umovakh Pivnichnoho Stepu Ukrainy [Efficiency of biological preparations and growth stimulants in pea crops in the Northern Steppe of Ukraine]. *Zernovi kultury [Cereal crops],* 2(1), 82–87. https://doi.org/10.31867/2523-4544/0011 [in Ukrainian].

Lykhochvor, V.V., & Andrushko, M.O. (2020). Produktyvnist horokhu zalezhno vid sortu ta norm vysivu [Pea productivity depending on variety and seeding rate]. *Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomoria [Bulletin of Agricultural Science of the Black Sea Region],* 2, 54–60. https://doi.org/10.31521/2313-092X/2020-2(106) [in Ukrainian].

Mazur, V.A., Lypovyi, V.H., & Mordvanyuk, M.O. (2020). Metodyka naukovykh doslidzhen v ahronomii: navchalnyi posibnyk [Methodology of Scientific Research in Agronomy: A Study Guide]. Vinnytsia: VC LLC "TVORY,". 204 p. [in Ukrainian].

Musatov, A.H., & Ishchenko, V.A. (2008). Vplyv elementiv tekhnolohii na efektyvnist vyroshchuvannia horokhu v umovakh Pivnichnoho Stepu pravoberezhzhia Ukrainy [Effect of technological elements on pea growing efficiency in the Northern Steppe of Right-Bank Ukraine]. *Naukovi pratsi Instytutu silskoho hospodarstva Stepu NAAN [Scientific works of the Institute of Agriculture of the Steppe NAAS],* 55–58 [in Ukrainian].

Patyka, V.P., Kats, S.Ya., & Volkohon, V.V. (2003). Biolohichnyi azot [Biological nitrogen]. Kyiv: Svit [in Ukrainian].

Petrychenko, V.F., Kaminskyi, V.F., & Patyka, V.P. (2003). Bobovi kultury i stalyi rozvytok ahroekosystem [Legume crops and sustainable development of agroecosystems]. *Kormy i kormovyrobnytstvo [Feeds and Feed Production]*, 51, 3–6 [in Ukrainian].

Tsybulko, V.S., & Popov, S.I. (1993). Nasinna produktyvnist horokhu ta soi zalezhno vid dii rehuliatoriv rostu [Seed productivity of pea and soybean depending on plant growth regulators]. *Selektsiia i nasinnytstvo [Breeding and Seed Production]*, 75, 57–61 [in Ukrainian].

Ushkarenko, V.O., Nikishenko, V.L., Holoborodko, S.P., & Kokovikhin, S.V. (2008). Dyspersiinyi i koreliatsiinyi analiz u zemlerobstvi ta roslynnytstvi: navch. Posib [Dispersion and Correlation Analysis in Agriculture and Crop Production: A Study Guide]. Kherson: Ailant, 272 p. [in Ukrainian].

Kaminskyi V., Bulgakov V., Tkachenko M., Kolomiiets M., Kaminska V., Ptashnik M., & Kiernicki, Z. (2022). Research into Comparative Performance of Different Tillage and Fertilization Systems Applied to Grey Forest Soil of Forest Steppe in Grain Crop Rotation. *Journal of Ecological Engineering,* 23(12), 163–178. https://doi.org/10.12911/22998993/155057 [in English].

Raj, M.V., Rai, P.K., Nagar, S., & Goud, B.S. (2021). Pre-Sowing Seed Traetments of Panchagavya and Plant Growth Regulators on Growth, Yield And Yield Attributing Traits of Field Pea (*Pisum sativum* L.) Variety-IPF (4–9). *International Journal of Plant & Soil Science,* 33(19), 139–144. https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i1930610 [in English].

Shevchuk, V.V. (2023). Effect of pre-sowing seed treatment and foliar fertilization on growth processes of winter pea varieties. *Tavrian Scientific Bulletin,* 129, 177–188. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2023.129.23 [in English].

Отримано: 21.10.2025
Прийнято: 24.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 631.527.8:633.111.1
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.17

ОСОБЛИВОСТІ УСПАДКУВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ПЕРІОДУ ВЕГЕТАЦІЇ СОЇ ОВОЧЕВОЇ ГІБРИДАМИ F_3-F_4 ЗА РІЗНИХ УМОВ ВИРОЩУВАННЯ

В. В. Гура[1], В. О. Боровик[2], О. С. Дробіт[3]

У статті представлено результати вивчення характеру успадкування тривалості періоду вегетації в гібридних комбінаціях сої овочевої (Glycine max L. Merr.) у поколіннях F_3-F_4. Метою дослідження було виділення серед досліджуваних гібридних комбінацій форм сої овочевого напряму використання з різною тривалістю періоду вегетації – від сходів до повної стиглості – і встановити особливості успадкування цієї ознаки гібридами F_3-F_4. Методи досліджень: польовий – для встановлення фенологічних фаз росту й розвитку рослин; вимірювально-ваговий – для проведення обліку врожаю; лабораторний – для визначення структури врожаю; математично-статистичний – для дисперсійного аналізу й статистичної обробки даних з метою оцінки достовірності отриманих результатів.

Установлено наявність різних типів домінування, зокрема гетерозису (наддомінування), часткового позитивного домінування й від'ємного гетерозису (депресії). Наддомінування за вегетаційним періодом спостерігалося в комбінаціях Karikachi × Фора, Sac × IU031301, Л 362-2-13 × Fiskeby V та Fiskeby V × IU031301. Порівняння меж варіації ознаки в поколіннях F_3 та F_4 вказує на звуження діапазону мінливості в F_4, порівняно з F_3, а саме: для гібридів третього покоління вона знаходиться в діапазоні 15,2–37,1, для четвертого – 12,3–24,1, що свідчить про дію стабілізувального добору та вплив агроекологічних умов. Більшість гібридних популяцій F_3-F_4 були скоростиглими

[1] аспірант відділу селекції сільськогосподарських культур
(Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України, смт Хліборобське)
e-mail: vladgura000@gmail.com
ORCID: 0009-0005-4936-861X
[2] доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник,
головний науковий співробітник відділу селекції сільськогосподарських культур
(Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України, смт Хліборобське)
e-mail: veraborovik@meta.ua
ORCID: 0000-0003-0705-2105
[3] кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник,
провідний науковий співробітник відділу первинного та елітного насінництва
(Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України, смт Хліборобське);
доцент кафедри польових і овочевих культур
(Одеський державний аграрний університет, м. Одеса)
e-mail: Kolpakovalesya80@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3633-5828

(90–105 діб), за винятком окремих комбінацій: Sac × IU031301 (89 діб – ультраскоростигла) і Karikachi × Фора (113–116 діб – середньостигла). Показано, що гібридний матеріал в умовах зрошення характеризувався дещо вужчим діапазоном варіації тривалості вегетації (90–112 діб) порівняно з природним зволоженням (87–109 діб). Коефіцієнт генотипової мінливості (Vg%) у зрошуваних умовах становив 21,8–24,1%, що підтверджує значний селекційний потенціал досліджуваних ліній. Результати підтверджують ефективність добору в ранніх поколіннях і доцільність використання комбінацій з проявами гетерозису для подальшої селекційної роботи зі створення скоростиглих, адаптованих до умов зрошення сортів овочевої сої.

Результати досліджень засвідчили, що в більшості гібридних популяцій F_4 коефіцієнт варіації за тривалістю вегетаційного періоду був нижчим порівняно з F_3, що свідчить про зменшення ефективності добору за цією ознакою в пізніших поколіннях. Зниження варіабельності є наслідком дії стабілізувального добору в напрямі більш адаптованих фенотипів, а також можливої дії штучного негативного (несвідомого) добору під час збирання врожаю у фазі масового дозрівання. Більшість досліджуваних гібридних популяцій F_3-F_4 характеризувалися скоростиглістю, з тривалістю періоду вегетації в межах 90–105 діб. Винятком була комбінація Sac × IU031301, яка в умовах природного зволоження проявила ультраскоростиглість (89 діб). Натомість комбінація Karikachi × Фора продемонструвала середньостиглість – 113 діб у неполивних умовах і 116 діб за зрошення.

Ключові слова: *соя овочева, гетерозис, тривалість вегетаційного періоду, успадкування, покоління F_3-F_4, генотипова мінливість, стабілізувальний добір, зрошення.*

FEATURES OF THE DURATION INHERITANCE OF THE VEGETATION PERIOD OF HYBRIDS F_3-F_4 OF SOYBEAN (VEGETABLE) UNDER DIFFERENT GROWING CONDITIONS

V. V. Gura, V. O. Borovyk, O. S. Drobit

The article presents the results of a study on the inheritance pattern of the vegetation period duration in hybrid combinations of vegetable soybean (Glycine max L. Merr.) in the F_3-F_4 generations. The aim of the research was to identify forms with various lengths of the period from emergence to full maturity among the studied hybrid combinations of vegetable soybean and to determine the inheritance characteristics of this trait in the F_3-F_4 generations. Methods: the field method was used to record phenological growth stages; the weighing and measuring method – for yield accounting; the laboratory method – for determining yield structure; and statistical and mathematical methods – for conducting analysis of variance and statistical processing of the data to assess the reliability of the obtained results.

Various types of dominance were observed, including heterosis (overdominance), partial positive dominance, and negative heterosis (depression). Overdominance in the duration of the vegetation period was recorded in the combinations Karikachi × Fora, Sac × IU031301, L 362-2-13 × Fiskeby V, and Fiskeby V × IU031301. Comparison of variability ranges in F_3 and F_4 showed a narrowing of the variation in F_4 (from 15.2–37.1 to 12.3–24.1 days), indicating the influence of stabilizing selection and agroecological factors. Most hybrid populations in the F_3-F_4 generations were early-maturing (90-105 days), with exceptions such as Sac × IU031301 (ultra-early, 89 days) and Karikachi × Fora (medium-maturing, 113–116 days). The hybrid material under irrigation had a slightly narrower range of vegetation period duration (90-112 days) compared to rainfed conditions (87–109 days). The genotypic variability coefficient (Vg %) under irrigation was 21.8–24.1%, indicating a high breeding potential of the studied lines. The findings confirm the effectiveness of selection in early generations and the feasibility of using heterotic combinations in the development of early-maturing, irrigation-adapted vegetable soybean varieties.

The study confirmed that in most F_4 hybrid populations, the coefficient of variation for vegetation period duration was lower compared to F_3, indicating reduced selection efficiency for this trait in later generations. The reduction in variability is attributed to the action of stabilizing selection toward better-adapted phenotypes, as well as possible unintended artificial negative selection during harvesting in the phase of mass maturity. Most of the hybrid populations examined in the F_3-F_4 generations were early-maturing, with a vegetation period of 90–105 days. The Sac × IU031301 combination stood out for its ultra-early maturity (89 days) under rainfed conditions, while the Karikachi × Fora combination showed medium maturity – 113 days in non-irrigated and 116 days under irrigation.

Key words: *vegetable soybean, heterosis, duration of vegetation period, inheritance, F_3-F_4 generation, genotypic variability, stabilizing selection, irrigation.*

Вступ

Соя овочева, або едамаме [*Glycine max* (L.) Merr.], є цінною агрокультурою, що поєднує короткий вегетаційний період, високу поживну цінність, здатність до біологічної фіксації атмосферного азоту й відносно низькі витрати на вирощування (Ідентифікація …, 2009; Zeipiņa et al., 2022). Завдяки цим характеристикам вона є не лише прибутковою, а й ґрунтозбагачувальною культурою, придатною для включення в різні системи землеробства, зокрема в зонах із жарким кліматом. На відміну від сої зернової (що вирощують для отримання олії та джерела білка в кормах для тварин), боби едамаме збирають зеленими та незрілими, споживають як овоч (Насіннєва …, 2004; Li et al., 2022; Nasir et al., 2023).

Останніми десятиліттями у світі спостерігається все більший інтерес до цієї бобової рослини, що зумовлено підвищенням обізнаності споживачів про її харчову цінність і загальною тенденцією до формування здорового способу життя (Guo et al., 2022; Nair et al., 2023).

При вивченні тривалості міжфазних і вегетаційного періодів сортів сої овочевої залежно від гідротермічних умов, дослідниками М.Б. Грабовським та ін. (2024) установлено, що тривалість вегетації культури має середній зв'язок із кількістю опадів (r = 0,73), температурою повітря (r = 0,62) та сильний зворотний зв'язок із гідротермічним коефіцієнтом (ГТК) (r = –0,90) (Грабовський та ін., 2004). Схожої думки дотримуються В. Насір та ін. (2023), які акцентують увагу на тому, що добір едамаме для адаптації необхідно проводити за допомогою аналізу головних компонентів за різних кліматичних факторів на стадії розсади (Nasir et al., 2023).

Результати досліджень Б.Т. Сілер та М.П. Сінгх (2022), а також закордонних науковців А. Малкомсон та ін. (2024) показують, що виробники цієї бобової рослини можуть підвищити врожайність насіння та прибутковість так, щоб використовувати максимально доступний вегетаційний період росту й розвитку (Siler & Singh, 2022; Malcomson et al., 2024). Це спричинило суттєве розширення ринкового попиту, зокрема, і в країнах, де раніше соя овочева розглядалася переважно як кормова або олійна культура.

Дослідниками Л.Н. Кобизєвою та ін. виявлені значні позитивні кореляції між кількістю насінин і бобів на рослину, між цими двома ознаками й урожайністю насіння з рослини, а також між цвітінням, дозріванням, висотою рослини та висотою першого бобу (Кобизєва та ін., 2004).

О.В. Мазур та ін. (2024) вважають, що тривалість періоду вегетації в сортів рослин сої овочевої значно залежить від сортових особливостей, інокуляції насіння й удобрення (Mazur et al., 2024). Також іншими дослідниками встановлено, що врожайність цієї бобової культури може бути знижена через коротший вегетативний період росту й раніше цвітіння за пізньої сівби (Seo et al., 2024).

Широкі дослідження та селекція едамаме все ще обмежені в багатьох країнах. Необхідна цілеспрямована дослідницька діяльність з урахуванням агроекологічної адаптації, прибутку фермерів і переробників, уподобань споживачів, якості й харчування. Згідно з результатами досліджень С. Ріхель-Бельської та ін. (2025), тривалість вегетаційного періоду є однією з основних ознак, за якою сорти сої істотно відрізняються між собою (Rychel-Bielska et al., 2025). Ця ознака перебуває під чітким генетичним контролем і, за їхніми даними, приблизно на 70% зумовлюється спадковими особливостями сорту.

У контексті глобальних кліматичних змін і розширення зон можливого вирощування сої овочевої особливо актуальним є пошук та оцінка сортів, здатних також реалізувати свій продуктивний потенціал в умовах жаркого посушливого літа. Саме на ці завдання спрямовані наші дослідження.

Матеріал і методи

Дослідження проводили на полях селекційної сівозміни відділу селекції Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства НААН упродовж 2023–2024 років. Об'єктом вивчення були колекційні зразки сої овочевої різних груп стиглості й гібридний матеріал.

Агротехнічні умови дослідів відповідали загальноприйнятим для Південного Степу України й реалізовувалися на темно-каштанових середньосуглинкових слабосолонцюватих ґрунтах, сформованих у сухостеповій природно-кліматичній зоні. За результатами агрохімічного аналізу, установлено такі показники валового вмісту основних макроелементів: загальний азот – 0,11–0,16%, фосфор – 0,07–0,09%, калій – 2,10–2,33%. За рівнем забезпеченості рухомими формами поживних речовин ґрунт характеризується низьким умістом азоту, середнім – фосфору

й середнім або підвищеним – калію. Орний горизонт ґрунтів містить 2–3% гумусу з тенденцією до зниження його вмісту з глибиною. Катіонно-обмінна ємність становить 30,5 ммоль (екв)/100 г ґрунту, при цьому переважає кальцій – 21,3 ммоль (екв). Частка інших обмінних катіонів: магній – 6,3 ммоль (екв), калій – 1,6 ммоль (екв), натрій – 1,3 ммоль (екв). Такий склад зумовлює слабко нейтральну реакцію ґрунтового середовища в межах pH 6,8–7,2.

За агрофізичними показниками ґрунти характеризуються: найменшою вологоємністю (НВ) – 21,3%, вологістю в'янення (ВВ) – 9,5% щільністю складання – 1,41 т/м³, що відповідає оптимальним умовам для вирощування сільськогосподарських культур. Глибина залягання підґрунтових вод становить 18–20 м, що не чинить впливу на водно-повітряний режим зони активного вологообміну. Сукупність фізико-хімічних і водно-фізичних властивостей ґрунтового покриву дослідних ділянок формує агроекологічно сприятливі умови для вирощування едамаме, що створює передумови для повної реалізації його продукційного потенціалу в умовах Південного Степу України.

Попередником культури виступала пшениця озима. Під передпосівну культивацію вносили аміачну селітру в дозі 0,1 т/га. Сівбу проводили в першій декаді травня за умови прогрівання ґрунту на глибині 5 см до температури 18–20 °С. Колекційні зразки висівали на однорядкових ділянках довжиною 3 м, гібридні – на ділянках по 5 м без повторень. Упродовж вегетаційного періоду виконано 7 поливів загальною нормою зрошення 3150 м³/га.

Погодні умови в роки проведення досліджень були типовими для Південного Степу України, що забезпечило об'єктивність оцінки колекційного матеріалу й дало змогу виділити зразки з найкращими показниками господарсько-цінних ознак (рис. 1, 2).

Згідно з даними рисунка 1, середньодобова температура повітря у 2024 році перевищувала показники температури у 2023 році на 3,0 °С у червні, на 4,3 °С у липні, на 0,2 °С у серпні й на 1,0 °С у вересні.

Кількість опадів у середньому за період вегетації культури переважала у 2024 році аналогічні показники 2023 року (рис. 2). Максимальну кількість опадів щорічно спостерігали в липні та серпні.

Загалом температурні показники та кількість опадів за період проведення досліджень сприяли створенню оптимальних умов для росту й розвитку рослин культури.

Схрещування різних генотипів здійснювали з використанням класичних методів генетики та селекції сої овочевої, зокрема шляхом кастрації та ізоляції бутонів напередодні цвітіння й подальшого синтетичного запилення квіток у день їх розкриття. Оцінювання зразків здійснювали на 10 постійно закріплених зразках відповідно до методики Державної комісії з питань сортовипробування сільськогосподарських культур (Волкодав, 2001), а також методичних підходів Інституту зрошуваного землеробства НААН (Методика …, 2014) й Інституту кормів НААН України (Бабич, 1994).

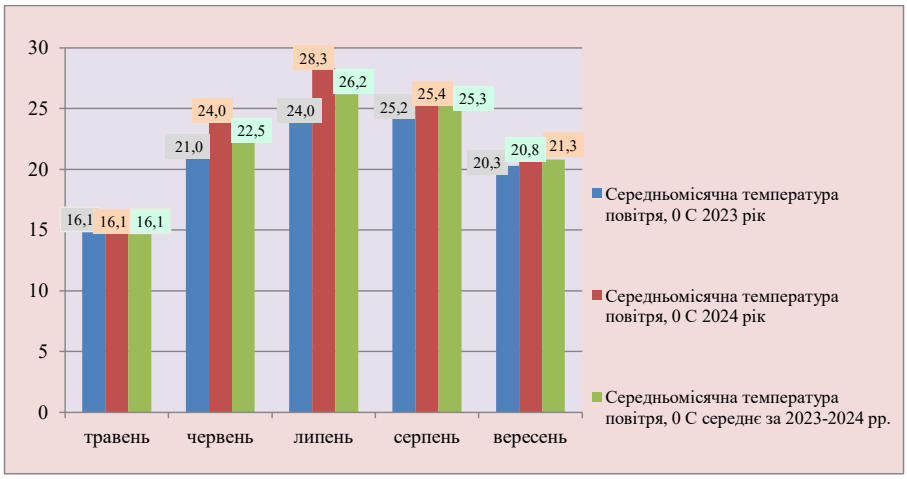


Рис. 1. Характеристика погодних умов за температурою повітря (^{0}C), середнє за 2023–2024 роки

Джерело: складено авторами.

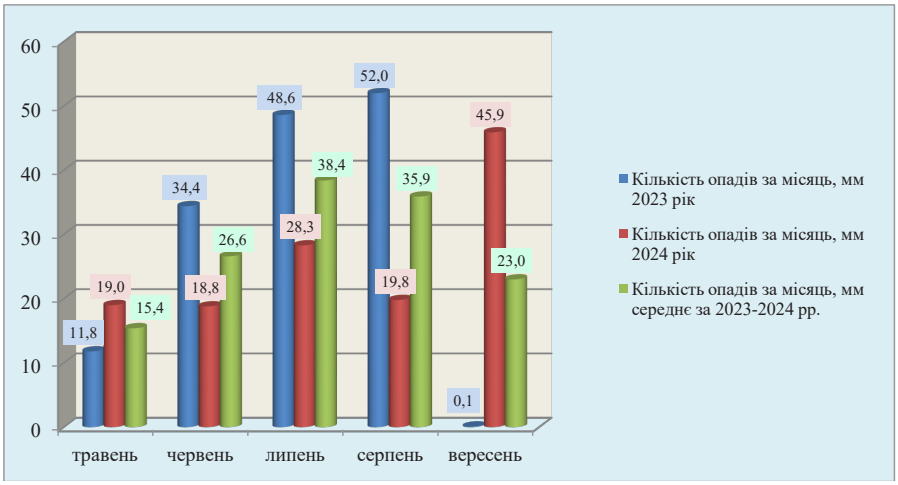


Рис. 2. Характеристика погодних умов за кількістю опадів (мм), середнє за 2023–2024 роки

Джерело: складено авторами.

Обліки та спостереження за ростом і розвитком рослин проводили згідно з методичними рекомендаціями Національного центру генетичних ресурсів рослин України – «Широкий уніфікований класифікатор роду *Glycine max (L.) Merr.*» (Кобизєва та ін., 2004), а також на основі літературних джерел: «Ідентифікація ознак зернобобових культур» (Ідентифікація …, 2009) та «Насіннєва інфекція» (Насіннєва …, 2004).

Статистичну обробку отриманих даних здійснювали відповідно до методики польових і лабораторних досліджень на зрошуваних землях (Методика …, 2014).

Результати

Матеріалом досліджень слугували батьківські форми сортів сої овочевої, а саме: UD0202500 Sac, UD0200177 Fiskeby V, UD02200640 Karikachi, Фора, UKR001:02859 Λ 362-2-13, UD0201152 IU031301, UKR001:02864 Λ 380-2-13 і гібридні комбінації.

Проводили порівняльний морфологічний аналіз гібридних рослин, фенологічні спостереження, а також гібридологічний і варіаційно-статистичний аналізи. Для вивчення характеру успадкування й оцінювання рівня гетерозису визначали ступінь домінування (*hp*), який обчислювали за формулою B. Griffing: hp = Fn-MP/HP-MP, де

hp – оцінка ступеня домінування;

Fn – середня арифметична ознаки в рослин гібрида n-го покоління;

MP – середня арифметична ознаки в обох батьківських форм;

HP – значення ознаки в батька з максимальним його проявом.

Групування отриманих даних проводилося згідно з наявною класифікацією.

Таблиця 1

Класифікація Г. М. Бейл, Р. Е. Актінс (G. M. Beil, R. E. Aktkins) (1965)

Клас домінування	**Числове значення hp**
Гетерозис (наддомінування)	hp>+1
Часткове позитивне домінування	+0,5 < hp ≤ +1
Проміжне успадкування	-0,5 ≤ hp≤ 0,5
Часткове від'ємне домінування	-1 ≤ hp < -0,5
Від'ємний гетерозис (депресія)	hp< -1

З метою розробки наукових засад селекції щодо створення нових сортів сої овочевої з високим рівнем адаптаційної здатності проведено дослідження з вивчення ефективності добору за ознаками тривалості періоду вегетації в новостворених ліній. Для реалізації поставлених завдань насіння гібридів висівали в різних агроекологічних умовах: за зрошення й за умов природного зволоження ґрунту – разом із відповідними батьківськими формами з метою встановлення характеру успадкування досліджуваних ознак.

За тривалістю періоду вегетації від сходів до повної стиглості, згідно з 9-бальною шкалою широкого уніфікованого класифікатора роду *Glycine max (L.) Merr.* (Кобизєва та ін., 2004), розрізняють рослини культури: ультраскоростиглі (1 бал) – < 90 днів, ультраскоростиглі (2 бали) – 90–100, ско-

ростиглі (3 бали) – 101–110, скоростиглі (4 бали) – 111–120, середньостиглі (5 балів) – 121–130, середньостиглі (6 балів) – 131–140, пізньостиглі (7 балів) – 141–150, пізньостиглі (8 балів) – 151–160 і дуже пізньостиглі (9 балів) – > 160.

Метою дослідження було виділення серед досліджуваних гібридних комбінацій форм сої овочевого напряму використання з різною тривалістю періоду вегетації – від сходів до повної стиглості й установлення особливостей успадкування цієї ознаки гібридами F_3-F_4.

Особливу увагу приділяли скоростиглим генотипам, які мають переваги як попередники для озимих культур, а також придатні для більш інтенсивного використання площі, часу та вологи за рахунок вирощування двох або більше культур протягом одного вегетаційного періоду на одній і тій самій площі.

У селекційних зразках, представлених у таблиці 2, спостерігалися такі типи успадкування, у тому числі гетерозис (наддомінування), часткове позитивне домінування, від'ємний гетерозис. Наддомінуванням за тривалістю періоду вегетації рослин едамаме характеризувалися такі гібридні комбінації: Karikachi / Фора (hp = 1,21), Л 362-2-13/Fiskeby V (hp = 2,10), Sac/IU031301 (hp = 1,02) та Fiskeby V/IU031301 (hp = 2,30). Кращим за одного з батьків, які проявили часткове позитивне домінування, виявилися Фора /Karikachi (hp = 1,45), Fiskeby

Таблиця 2

Успадкування тривалості періоду вегетації (діб) гібридами F_3-F_4 сої овочевої в умовах зрошення (2023–2024 роки)

№ з/п	Гібридні комбінації	F_3 X±Sx	hp	V	F_4 X±Sx	V
1	Sac	94±0,8		10,9	90±0,3	7,0
2	Sac/ Fiskeby V	94±0,4	0,24	13,2	90±0,2	12,0
3	Fiskeby V	94±0,4		10,8	91±0,6	5,7
4	Karikachi	115±0,9		11,4	104±1,2	8,4
5	Karikachi / Фора	116±0,4	1,21	14,2	112±0,6	12,2
6	Фора	93±0,3		10,2	90±0,4	8,7
7	Л 362-2-13	97±1,2		7,2	95±0,8	6,2
8	Л 362-2-13/ Fiskeby V	99±0,2	2,10	22,4	96±0,4	19,4
9	Fiskeby V	92±0,8		14,4	90±1,2	11,3
10	Фора	94±1,2		8,6	91±0,5	7,0
11	Фора /Karikachi	105±0,8	0,48	16,5	100±0,4	13,4
12	Karikachi	115±0,5		12,0	112±0,2	8,1
13	Sac	92±0,2		13,2	94±0,4	7,4
14	Sac/ IU031301	90±0,4	-1,22	21,8	92±0,2	16,2
15	IU031301	94±0,2		8,1	93±0,5	7,4
16	Фора	96±0,4		7,4	92±1,0	5,9
17	Фора /Л 380-2-13	95±0,6	-1,45	20,7	92±0,2	14,5
18	Л 380-2-13	97±0,2		4,3	93±0,6	4,8
19	Фора	97±0,3		6,4	95±0,4	4,9
20	Фора/ IU031301	95±1,7	-1,18	23,7	92±0,8	20,2
21	IU031301	96±0,5		4,4	94±0,2	4,2
22	Fiskeby V	99±0,2		15,0	95±0,4	9,2
23	Fiskeby V/ Karikachi	100±0,2	1,25	16,4	92±0,3	13,4
24	Karikachi	110±0,5		13,7	99±0,8	11,1
25	Fiskeby V	95±0,2		8,1	91±0,5	9,1
26	Fiskeby V/ IU031301	100±0,4	2,30	22,7	95±1,2	17,0
27	IU031301	97±1,2		7,2	93±0,8	5,2
28	Sac	92±0,6		4,4	90±0,4	4,8
29	Sac/ Karikachi	102±0,4	1,60	26,1	100±0,8	25,2
30	Karikachi	114±1,2		6,4	112±1,0	5,9

V/Karikachi (hp = 1,25), Sac/Karikachi (hp = 1,60). Від'ємний гетерозис або депресію спостерігали в гібридів культури Фора/Л 380-2-13 (hp = -1,45) та Фора/IU031301 (hp = -1,18), Sac/IU031301 (hp = -1,22).

У результаті досліджень із гібридними комбінаціями, порівняння показників поколінь F_3 та F_4 засвідчило, що в поколінні F_4 межі варіації за цією ознакою поступово звужуються, порівняно з F_3, а саме: для гібридів третього покоління вона знаходиться в діапазоні 15,2–37,1, для четвертого – 12,3–24,1. Така динаміка свідчить про дію стабілізувального добору та вплив агроекологічних чинників на процес формування тривалості періоду вегетації в наступних поколіннях. Стабілізаційний ефект виражається обмеженням варіабельності (звуження діапазону вегетаційного періоду) в F_4, що свідчить про ефективність відбору в F_3. У гібридному розсаднику F_4 відбувається поєднання розширеної мінливості з поступовим вирівнюванням покоління – ідеальний етап для відбору збалансованих ліній.

До подібних висновків у дослідженнях дійшли Нігофф та ін., а також Міранда та ін. (Miranda et al., 2020; Niehoff et al., 2024).

Систематичний огляд, який узагальнює емпіричні й модельні результати щодо того, як змінюється генетична варіація в ранніх поколіннях (F_2–F_4) та як агроекологічні чинники (G×E) впливають на стабілізацію ознак, корисний для обґрунтування впливу довкілля на динаміку варіації представили науковці Вієйра та ін., Міранда (Miranda et al., 2020; Vieira et al., 2025).

Сілва та ін. також в огляді практичних підходів селекції в F_2-F_4: підтверджує, що відбір у F_3 забезпечує поєднання мінливості та її подальшої стабілізації, порівнює методи (pedigree, bulk, SSD) (Silva et al., 2018). Підтверджує, що F_4 – «операційний» етап для виділення збалансованих ліній.

Діапазон тривалості періоду вегетації гібридного матеріалу на зрошенні становить 90–112 діб, що ідеально підходить для регіональних агрокліматичних умов (див. табл. 2).

Діапазон тривалості періоду вегетації гібридного матеріалу в умовах природного зволоження ґрунту був нижчим, ніж на зрошенні, і знаходився в межах 87–109 діб (табл. 3). Гетерозисом за тривалістю періоду вегетації рослин сої овочевої характе-

Таблиця 3

Успадкування тривалості періоду вегетації (діб) гібридами F_3-F_4 сої овочевої в умовах природного зволоження ґрунту (2023–2024 роки)

№ з/п	Гібридні комбінації	F_3 X±Sx	hp	V	F_4 X±Sx	V
1	Sac	92±0,6		11,9	88±0,3	7,9
2	Sac/ Fiskeby V	96±0,3	1,30	15,2	87±0,2	12,3
3	Fiskeby V	92±0,4		12,8	89±0,6	6,7
4	Karikachi	112±0,7		14,4	108±1,2	9,0
5	Karikachi / Фора	113±0,4	1,11	19,2	109±0,6	12,5
6	Фора	91±0,2		10,2	90±0,4	8,2
7	Л 362-2-13	94±1,21		7,2	92±0,8	9,2
8	Л 362-2-13/ Fiskeby V	97±0,23	2,10	34,4	94±0,4	19,9
9	Fiskeby V	90±0,6		16,4	87±1,2	9,3
10	Фора	92±1,1		8,0	91±0,5	7,5
11	Фора /Karikachi	102±0,8	1,48	20,5	100±0,4	19,4
12	Karikachi	113±0,5		15,0	110±0,2	4,1
13	Sac	90±0,4		19,2	88±0,4	7,4
14	Sac/ IU031301	89±0,4	-1,12	31,8	87±0,2	16,5
15	IU031301	91±0,2		9,1	89±0,5	7,6
16	Фора	92±0,5		10,4	90±1,0	4,9
17	Фора /Л 380-2-13	90±0,6	-1,25	22,7	91±0,2	19,5
18	Л 380-2-13	95±0,4		4,2	93±0,6	7,8
19	Фора	93±0,2		7,4	90±0,4	4,7
20	Фора/ IU031301	90±1,5	-1,18	34,7	88±0,8	23,2

Продовження таблиці 3

21	IU031301	93±0,5		6,4	91±0,2	4,9
22	Fiskeby V	97±0,2		17,0	94±0,4	7,2
23	Fiskeby V/ Karikachi	100±0,2	1,10	18,4	92±0,3	12,4
24	Karikachi	105±0,7		15,7	99±0,8	9,1
25	Fiskeby V	92±0,2		9,0	91±0,5	8.1
26	Fiskeby V/ IU031301	105±0,4	2,41	25,7	95±1,2	15,0
27	IU031301	94±1,3		8,2	93±0,8	4,2
28	Sac	92±0,6		2,4	90 ±0,2	3,8
29	Sac/ Karikachi	102±0,4	1,90	37,1	102±1,1	24,1
30	Karikachi	112±1,2		5,4	109±0,4	3,9

ризувалися гібридні комбінації, а саме: Sac/Fiskeby V (hp = 1,30), Karikachi/Фора (hp = 1,11), Л 362-2-13/Fiskeby V (hp = 2,10) та Fiskeby V/IU031301 (hp = 2,341).

Кращим за одного з батьків, які проявили часткове позитивне домінування, виявилися Фора/Karikachi (hp = 1,48), Fiskeby V/Karikachi (hp = 1,210), Sac/Karikachi (hp = 1,90). Від'ємний гетерозис або депресію спостерігали в гібридів Sac/ IU031301 (hp = -1,12), Фора /Л 380-2-13 (hp = -1,25) і Фора/IU031301 (hp = -1,18),

Порівняння меж варіації за досліджуваною ознакою поколінь F_3 та F_4 при вирощуванні культури в умовах природного зволоження ґрунту показало, що в поколінні F_4 показники також поступово звужуються, порівняно з F_3, а саме: для гібридів третього покоління вони знаходилися в діапазоні 15,2–37,1, для четвертого – 12,3–24,1 (Cornish, 1990).

Дані таблиць 2 і 3 свідчать, що генотипова мінливість тривалості періоду вегетації (V_g%) в умовах зрошення дещо нижча порівняно з неполивними умовами, але також досить значна: V_g% дорівнює 21,8–24,1%.

Майже всі досліджувані гібридні популяції F_3-F_4 були скоростиглими, з тривалістю періоду вегетації 90–105 діб. Винятком залишалася лише комбінація Sac/IU031301, що виділилася за ультра скоростиглістю (89 діб) за вирощування в умовах природного зволоження ґрунту й Karikachi/Фора, яка демонструвала середньостиглість як у неполивних умовах (113 діб), так і на зрошенні (116 діб).

Висновки

Результатами досліджень установлено, що в більшості гібридних популяцій F_4 сої овочевої коефіцієнт варіації за тривалістю вегетаційного періоду був нижчим, ніж у F_3, що вказує на зниження ефективності добору за цією ознакою в пізніших поколіннях. Зменшення варіабельності вважається наслідком стабілізувального добору в напрямі найбільш адаптованих особин, а також можливої дії штучного негативного (несвідомого) добору під час збирання у фазі масового дозрівання.

Майже всі представлені в дослідженні гібридні популяції F_3-F_4 характеризувалися скоростиглістю, з тривалістю вегетаційного періоду в межах 90–105 діб. Винятком була комбінація Sac × IU031301, яка в умовах природного зволоження проявила ультраскоростиглість – 89 діб. Натомість комбінація Karikachi×Фора продемонструвала середньостиглість як у неполивних умовах (113 діб), так і за зрошення (116 діб).

Список використаної літератури

Бабич А.О. Методика проведення дослідів по кормовиробництву. Вінниця : Інститут кормів УААН, 1994. 87 с.

Волкодав В.В. Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур. Випуск третій (олійні, технічні, прядильні та кормові культури). Київ : Алефа, 2001. 76 с.

Грабовський М.Б., Мостипан О.В., Панченко Т.В., Лозінський М.В., Павліченко К.В. Тривалість міжфазних та вегетаційного періодів сортів сої залежно від гідротермічних умов та застосування ґрунтових і післясходових гербіцидів. *Агробіологія.* 2024. № 1. С. 109–119. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2024-187-1-109-119.

Ідентифікація ознак зернобобових культур / В.В. Кириченко, Л.Н. Кобизєва, В.П. Петренкова та ін. Харків : ВАТ «Видавництво «Харків», 2009. 174 с.

Кобизєва Л.Н., Рябчун В.К., Безугла О.М., Дрепіна Т.О. та ін. Широкий уніфікований класифікатор роду *Glycine max*. (L.) Merr. Харків : Магда LTD, 2004. 38 с.

Методика польових і лабораторних досліджень на зрошуваних землях / Р.А. Вожегова та ін. Херсон : Вид-во Грінь Д. С., 2014. 286 с.

Насіннєва інфекція польових культур / В.П. Петренкова й інші. Харків : Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва УААН, 2004. 56 с.

Cornish M. Selection during a selfing programme. I. The effects of a single round of selection. *Heredity.*1990. Vol. 65. P. 201–211. https://doi.org/10.1038/hdy.1990.88.

Guo L., Huang L., Cheng X., Gao Y., Zhang X., Yuan X., Xue C., Chen X. Volatile Flavor Profile and Sensory Properties of Vegetable Soybean. *Molecules*. 2022. Vol. 7. № 3. P. 931–939. https://doi.org/10.3390/molecules27030939.

Li X., E. Welbaum G., L. Rideout S., Singer W. & Zhang B. Vegetable Soybean and Its Seedling Emergence in the United States. *IntechOpen Journals.* In book: Legumes [Working Title]. 2022. Vol. 1. P. 1–25. https://doi.org/10.5772/intechopen.102622.

Malcomson A., Mourtzinis S., Gaska J., Roth A., Silva T.S., Conley S. Planting date and maturity groups effects on soybean yield in Wisconsin. *Crop Forage & Turfgrass management.* 2024. Vol. 10. Issue 2. P. 7–12. https://doi.org/10.1002/cft2.70015.

Miranda C., Scaboo A., Cober E., Denwar N., Bilyeu K. The effects and interaction of soybean maturity gene alleles controlling flowering time, maturity, and adaptation in tropical environments. *BMC Plant Biol.* 2020. Feb 7. № 20(1). P. 65. https://doi.org/10.1186/s12870-020-2276-y.

Mazur O.V., Zayka K.R., Yakovets V.I., Dovgopoliy V.S. Length of growing season and height of soybean plants depending on pre-sowing treatment of seeds and fertilizer. *Agriculture and forestry.* 2024. Issue 4. P. 35–41. https://doi.org/10.37128/2707-5826-2024-4.

Nair R.M., Boddepalli V.N., Yan M-R, Kumar V., Gill B., Pan R.S., Wang C., Hartman G.L., Silva e Souza R, Somta P. Global Status of Vegetable Soybean. Plants. 2023. Vol. 12. № 3. P. 609–612. https://doi.org/10.3390/plants12030609.

Nasir B., Razzaq H., Sadaqat H.A. Wahid M.A. Selection of soybeans for adaptation through principal component analysis under different climatic factors at seedling stage. *Pakistan Journal of Botany.* 2023. Vol. 55. Issue 2. P. 68–76. https://doi.org/10.30848/PJB2023-2(19).

Niehoff T.A.M., Ten Napel J., Calus M.P.L. Prediction of additive genetic variances of descendants for complex families based on Mendelian sampling variances. *G3 (Bethesda).* 2024. Nov. 6. № 14(11). P. jkae205. https://doi.org/10.1093/g3journal/jkae205.

Rychel-Bielska S., Książkiewicz M., Kurasiak-Popowska D., Tomkowiak A., Bielski W., Weigt D., Niemann J., Surma A., Kozak B., Nawracała J. Molecular selection of soybean towards adaptation to Central European agroclimatic conditions. *J Appl Genetics.* 2025. Vol. 66. Issue 1. P. 29–45. https://doi.org/10.1007/s13353-024-00889-6.

Seo J., Park J., Choi M., Jung K., Chun H., Lee S., Gong D., Chae S.E., Jeon S.H., Yoon D.-K. Growth and Yield Response of Soybean (*Glycine max* L.) in Relation to Sowing Date in the Southern Region of South Korea. Agronomy. 2024. Vol. 14. Issue 2. P. 89–94. https://doi.org/10.3390/agronomy14112624.

Siler B.T., Singh M.P. Optimal soybean maturity group selection is influenced by planting date in northern production systems. *Crop Science*. 2022. Vol. 62. Issue 6. P. 114–118. https://doi.org/10.1002/csc2.20829.

Silva F.M., Pereira E.M., Pedroso Val B.H., Perecin D., Mauro A.O., Unêda-Trevisoli S.H. Strategies for selecting soybean genotypes using mixed models and multivariate approach. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 2018. Vol. 40. P. e39324. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.39324.

Vieira R.A., Nogueira A.P.O., Fritsche-Neto R. Optimizing the selection of quantitative traits in plant breeding using simulation. *Front Plant Sci.* 2025. Feb. 10. № 16. P. 1495662. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1495662.

Zeipiņa, S., Vågen, I. M., & Lepse, L. Possibility of Vegetable Soybean Cultivation in North Europe. Horticulturae. 2022. Vol. 8. Issue 7. P. 42–49. https://doi.org/10.3390/horticulturae8070593.

References

Babych, A.O. (1994). Metodyka provedennia doslidiv po kormovyrobnytstvu [Methodology for conducting experiments on feed production]. Vinnytsia : Instytut kormiv UAAN [in Ukrainian].

Volkodav, V.V. (2001). Metodyka derzhavnoho sortovyprobuvannia silskohospodarskykh kultur. Vypusk tretii (oliini, tekhnichni, priadylni ta kormovi kultury) [Methodology of state variety testing

of agricultural crops. Third edition (oil, technical, spinning and fodder crops)]. Kyiv : Alefa [in Ukrainian].

Grabovskyi, M., Mostypan, O., Panchenko, T., Lozinskyi, M., & Pavlichenko K. (2024). Tryvalist mizhfaznykh ta vehetatsiinoho periodiv sortiv soi zalezhno vid hidrotermichnykh umov ta zastosuvannia gruntovykh i pisliaskhodovykh herbitsydiv [Duration of interphase and growing periods of soybean varieties depending on hydrothermal conditions and application of soil and post-emergence herbicides]. *Ahrobiolohiia [Agrobiology],* 1, 109–119. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2024-187-1-109-119 [in English].

Kyrychenko, V.V. (ed.) (2009). Identyfikatsiia oznak zernobobovykh kultur [Identification of traits of leguminous crops]. Kharkiv [in Ukrainian]

Kobyzieva, L.N. (ed.) (2004). Shyrokyi unifikovanyi klasyfikator [Broad Unified Classifier]. Kharkiv [in Ukrainian].

Vozhehova, R.A. (ed.) (2014). Metodyka polovykh i laboratornykh doslidzhen na zroshuvanykh zemliakh [The method of Polish and laboratory doslidzhen on zoshuvannyh lands]. Kherson: Vyd. Hrin D.S. [in Ukrainian].

Petrenkova, V.P. (ed.) (2004). Nasinnieva infektsiia [Seed infection]. Kharkiv, 56 [in Ukrainian].

Cornish, M. (1990). Selection during a selfing programme. I. The effects of a single round of selection. *Heredity,* 65, 201–211. https://doi.org/10.1038/hdy.1990.88 [in English].

Guo, L., Huang, L., Cheng, X., Gao, Y., Zhang, X., Yuan, X., Xue, C., & Chen, X. (2022). Volatile Flavor Profile and Sensory Properties of Vegetable Soybean. *Molecules*, 27(3), 939. https://doi.org/10.3390/molecules27030939 [in English].

Li, X., Welbaum, G.E., Rideout, S.L., Singer, W. & Zhang, B. (2022). Vegetable Soybean and Its Seedling Emergence in the United States. *IntechOpen Journals,* 1, 1–25. https://doi.org/10.5772/intechopen.102622 [in English].

Malcomson, A., Mourtzinis, S., Gaska, J., Roth, A., Silva, T.S., & Conley, S. (2024). Planting date and maturity groups effects on soybean yield in Wisconsin, 10, e70015. https://doi.org/10.1002/cft2.70015 [in English].

Miranda, C., Scaboo, A., Cober, E., Denwar, N., & Bilyeu, K. (2020). The effects and interaction of soybean maturity gene alleles controlling flowering time, maturity, and adaptation in tropical environments. *BMC Plant Biol.*, 20(1), 65. https://doi.org/10.1186/s12870-020-2276-y [in English].

Mazur, O.V., Zayka, K.R., Yakovets, V.I., & Dovgopoliy, V.S. (2024). Length of growing season and height of soybean plants depending on pre-sowing treatment of seeds and fertilizer. *Agriculture and forestry*, 4(35). https://doi.org/10.37128/2707-5826-2024-4 [in English].

Nair, R.M., Boddepalli, V.N., Yan, M-R, Kumar, V., Gill, B., Pan, R.S., Wang, C., Hartman, G.L., Silva e Souza, R, & Somta, P. (2023). Global Status of Vegetable Soybean. Plants, 12(3), 609. https://doi.org/10.3390/plants12030609 [in English].

Nasir, B., Razzaq, H., Sadaqat, H.A. & Wahid, M.A. (2023). Selection of soybeans for adaptation through principal component analysis under different climatic factors at seedling stage. *Pakistan Journal of Botany*, 55(2). https://doi.org/10.30848/PJB2023-2(19) [in English].

Niehoff, T.A.M., Ten Napel, J., & Calus, M.P.L. (2024). Prediction of additive genetic variances of descendants for complex families based on Mendelian sampling variances. *G3 (Bethesda),* 14(11), jkae205. https://doi.org/10.1093/g3journal/jkae205 [in English].

Rychel-Bielska, S., Książkiewicz, M., Kurasiak-Popowska, D., Tomkowiak, A., Bielski, W., Weigt, D., Niemann, J., Surma, A., Kozak, B., & Nawracała, J. (2025). Molecular selection of soybean towards adaptation to Central European agroclimatic conditions. *J Appl Genetics,* 66, 29–45. https://doi.org/10.1007/s13353-024-00889-6 [in English].

Seo, J., Park, J., Choi, M., Jung, K., Chun, H., Lee, S., Gong, D., Chae, S.E., Jeon, S.H., & Yoon, D.K. (2024). Growth and Yield Response of Soybean (*Glycine max* L.) in Relation to Sowing Date in the Southern Region of South Korea. Agronomy, 14(2). https://doi.org/10.3390/agronomy14112624 [in English].

Siler, B.T., & Singh, M.P. (2022). Optimal soybean maturity group selection is influenced by planting date in northern production systems. *Crop Science,* 62(6). https://doi.org/10.1002/csc2.20829 [in English].

Silva, F.M., Pereira, E.M., Pedroso, Val B.H., Perecin, D., Mauro, A.O., Unêda-Trevisoli, S.H. (2018). Strategies for selecting soybean genotypes using mixed models and multivariate approach. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40, e39324. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.39324 [in English].

Vieira, R.A., Nogueira, A.P.O., & Fritsche-Neto, R. (2025). Optimizing the selection of quantitative traits in plant breeding using simulation. *Front Plant Sci.* 16, 1495662. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1495662 [in English].

Zeipiņa, S., Vågen, I.M., & Lepse, L. (2022). Possibility of Vegetable Soybean Cultivation in North Europe. Horticulturae, 8(7), 593. https://doi.org/10.3390/horticulturae8070593 [in English].

Отримано: 10.10.2025
Прийнято: 18.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 633.34: 631.51.01
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.18

ВПЛИВ ГЛИБИНИ Й СПОСОБУ ОСНОВНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ НА НАСІННЄВУ ПРОДУКТИВНІСТЬ СОЇ В ПІВНІЧНО-СХІДНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

О. М. Зубко[1], С. І. Бердін[2], М. О. Романенко[3]

З огляду на те що соя є стратегічною бобовою культурою України, потенціал її врожайності значною мірою визначається станом кореневого шару, рівнем вологозабезпечення й ефективністю біологічної фіксації азоту, а отже, системою й глибиною основного обробітку ґрунту. В умовах помірно континентального клімату України (з високою варіацією кількості опадів і температур) вибір оптимальної глибини й способу основного обробітку є одним із ключових факторів стабільної врожайності. З огляду на це, у 2023–2024 роках проведено дослідження з метою визначення раціонального прийому основного обробітку ґрунту під сою, який забезпечує формування високої врожайності й насіннєвої продуктивності. Дослідження проводили в зоні північно-східного Лісостепу за схемою, що включала глибоке рихлення на 27 см; дискування у два сліди на 14 см; плоскорізний обробіток на 22 см; оранку на 22 см (контроль). Основний обробіток виконували в першій декаді серпня, норма висіву становила 0,4 млн. шт./га. Сівбу сорту Сіверка проводили в першій декаді травня, збирання – у другій декаді вересня. Вивчення різних способів основного обробітку ґрунту (з обертанням і без обертання пласта, включно з оранкою, плоскорізним, мілким і глибоким рихленням) показало, що глибина обробітку є визначальним фактором у забезпеченні оптимальної щільності, вологості й аерації орного шару. Найвищі показники польової схожості, кількості бобів на рослину та маси 1000 насінин спостерігалися за зяблевого глибокого рихлення на глибину 27 см, що забезпечувало кращий водно-повітряний режим і розвиток кореневої системи. Урожайність сої за глибокого рихлення перевищувала інші способи основного обробітку в середньому на 3,6%, а вихід насіннєвої фракції становив 74,8%, що свідчить про формування якісного насіннєвого матеріалу. Економічні розрахунки підтвердили доцільність цього прийому: собівартість 1 т насіння була на 1,6–2,7% нижчою, ніж за оранки, за збереження високої якості насіння.

[1] аспірант кафедри агротехнологій та ґрунтознавства
(Сумський національний аграрний університет, м. Суми)
e-mail: andb201727@ukr.net
ORCID: 0009-0003-2728-2116
[2] кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри селекції і насінництва
(Сумський національний аграрний університет, м. Суми)
e-mail: serber00@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2337-4107
[3] магістр спеціальності 201 «Агрономія»
(Сумський національний аграрний університет, м. Суми)
e-mail: romanenko_MO@ukr.net
ORCID: 0009-0007-1064-1767

Отже, зяблеве глибоке рихлення на глибину 27 см є найбільш ефективним агротехнічним прийомом у посушливих умовах північно-східного Лісостепу, оскільки забезпечує оптимальні фізичні властивості ґрунту, підвищує насіннєву продуктивність і є економічно обґрунтованим рішенням.

Ключові слова: *оранка, мілкий обробіток, плоскорізний обробіток, глибоке рихлення, структура врожаю, насіннєва продуктивність.*

INFLUENCE OF THE DEPTH AND METHOD OF PRIMARY TILLAGE ON THE SEED PRODUCTIVITY OF SOYBEAN IN THE NORTH-EASTERN FOREST-STEPPE OF UKRAINE

O. M. Zubko, S. I. Berdin, M. O. Romanenko

Considering that soybean is a strategic legume crop in Ukraine, its yield potential is largely determined by the condition of the root layer, the level of moisture supply, and the efficiency of biological nitrogen fixation – all of which depend on the system and depth of primary tillage. Under the moderately continental climate of Ukraine (characterized by high variability in precipitation and temperature), selecting the optimal tillage depth and method is one of the key factors ensuring yield stability. In this context, a study was conducted during 2023–2024 to determine the most rational method of primary tillage for soybean that would ensure high yield and seed productivity. The research was carried out in the North-Eastern Forest-Steppe zone according to a scheme that included: deep loosening to a depth of 27 cm; double disking to a depth of 14 cm; flat-cut tillage to a depth of 22 cm; and plowing to a depth of 22 cm (control). The main tillage was performed in the first ten days of August, with a seeding rate of 0.4 million seeds per hectare. Sowing of the variety Siverka was carried out in the first ten days of May, and harvesting took place in the second ten days of September. The study of different tillage methods (with and without soil inversion, including plowing, flat-cut, shallow, and deep loosening) showed that tillage depth is the determining factor in achieving optimal soil density, moisture, and aeration of the arable layer. The highest values of field germination, number of pods per plant, and 1000-seed weight were observed under deep autumn loosening to a depth of 27 cm, which provided better water – air balance and root system development. Soybean yield under deep loosening exceeded other tillage methods by an average of 3.6%, and the proportion of the seed fraction reached 74.8%, indicating the formation of high-quality seed material. Economic calculations confirmed the efficiency of this method: the production cost of 1 ton of seed was 1.6–2.7% lower than under plowing, while maintaining high seed quality. Thus, deep autumn loosening to a depth of 27 cm is the most effective agrotechnical method under the dry conditions of the North-Eastern Forest-Steppe, as it ensures optimal soil physical properties, increases seed productivity, and represents an economically justified solution.

Key words: *plowing, shallow tillage, flat-cut tillage, deep loosening, yield structure, seed productivity.*

Вступ

Соя (Glycine max (L.) Merr.) – стратегічна бобова культура України, що поєднує високу харчову, кормову й економічну цінність. Вихід насіння з одного гектара посіву сої значною мірою залежить від рівня вологозабезпечення, структури ґрунту й ефективності біологічної фіксації азоту, що, у свою чергу, визначається параметрами основного обробітку ґрунту. Глибина оранки формує фізичні властивості ґрунту – його щільність, структурність, водно-повітряний режим, розподіл поживних речовин, а також впливає на розвиток кореневої системи та утворення бульбочок. В умовах північно-східного Лісостепу України, де спостерігається значна мінливість опадів і температур, вибір раціональної глибини та способу основного обробітку є одним із провідних чинників стабільного формування врожайності сої (Вожегова та ін., 2021; Гангур та ін., 2021; Куничак та ін., 2023).

Структура орного шару (щільність, наявність «плужної підошви», пористість, агрегатний склад) формується системою основного та передпосівного обробітку. Будь-яке втручання – обробіток ґрунту на будь-яку глибину чи проходи техніки – змінює опір ґрунту кореню, аерацію, розподіл вологи й елементів живлення. Нераціональний обробіток або підвищена кількість проходів техніки, як правило, призводять до надмірної щільності й створення «плужної підошви». Соя має підвищену чутливість до бар'єрного горизонту, що пояснюється обмеженням аерації: з одного боку, це знижує ефективність симбіозу з азотфіксувальними бактеріями, а з іншого – перешкоджає проникненню коренів до запасів вологи в підорному шарі. Руйнування

«підошви» з формуванням відносно розпушеного шару на глибину 30–40 см сприяє як зростанню кореневої маси, так і функціонуванню симбіотичного апарату. Це, у кінцевому підсумку, позитивно позначається на врожайності зерна. Крім того, при мілкому основному обробітку ґрунту зростає його щільність унаслідок трафіку техніки. У такому разі особливу увагу необхідно приділяти діагностиці пенетрометром і точково усувати ущільнення глибоким розпушуванням (Середа та ін., 2020; Заболотний, 2020, Зубко і Комісар, 2020).

На вибір способу та глибини основного обробітку під сою значною мірою впливає зона її вирощування. Так, в умовах південного Степу врожайність залежно від способу обробітку становила: оранка (28–30 см) – 3,80 т/га, чизелювання (28–30 см) – 3,94 т/га, дискування (12–14 см) – 3,88 т/га, no-till – 3,30 т/га. Водночас у північній частині цієї зони оранка (20–22 см) є більш ефективним способом. В умовах Лісостепу поглиблення до 27–30 см без використання полиць, порівняно з глибиною обробітку плоскорізом на 20–22 см, забезпечує приріст урожайності до 0,26–0,32 т/га. Ефект зумовлений руйнуванням ущільненого горизонту й поліпшенням волого- та газообміну. У виробничих умовах це узгоджується з класичними рекомендаціями: зяблева оранка під сою 28–30 см (після просапних – 25–27 см) є базовим прийомом (Єщенко і Пясецький, 2012).

Низка виробничих і дослідних даних у лісостеповій зоні свідчать, що врожайність при оранці становить 1,97–2,54 т/га, а при чизелюванні – 1,80–2,62 т/га. Ці показники можуть бути зіставними. Вирішальний вплив на врожайність мають система удобрення й боротьба з бур'янами. При правильно підібраній системі живлення чизелювання не поступається оранці, зберігаючи переваги щодо збереження вологи та меншого ущільнення ґрунту. У практиці господарств часто застосовують глибоке розпушування або глибоку оранку до 30 см під сою після соняшнику з мінімальними весняними проходами для закриття вологи (Огурцов та ін., 2016).

Зміни ґрунтових показників під впливом основного обробітку відбиваються насамперед на ростових показниках сої (висота, ступінь розгалуження), а також на елементах структури врожаю (кількість вузлів і гілок, бобів на рослину, насіння у бобі, маса 1000 насінин) і, у кінцевому підсумку, на врожайність (Mulazzani et al., 2022).

Оптимізація фізичних параметрів ґрунту підвищує рівномірність сходів і сприяє росту рослин, їх розгалуженню залежно від густоти, освітленості й сорту. Водночас зменшення макропористості обмежує ріст коренів, погіршує постачання кисню та формування бульбочок, зміщує коренезаселений шар угору. У результаті рослини формуються низькорослими, з меншою кількістю вузлів і бічних пагонів; зменшується кількість бобів на рослину та маса 1000 насінин (Андрусик, 2025).

Варто розуміти, що збільшення вегетативної маси зовсім не гарантує високий урожай: ключовими детермінантами продуктивності є кількість вузлів і бобів на рослині. За достатнього зволоження компактні, невисокі рослини нерідко формують більше плодів завдяки більш розвиненому розгалуженню й інтенсивному вузлоутворенню (Carciochi et al., 2019).

З урахуванням агрометеорологічних умов 2023–2024 років проведено дослідження з метою визначення раціонального прийому основного обробітку ґрунту під сою, який забезпечує формування високої врожайності й насіннєвої продуктивності.

Завданнями дослідження були уточнення оптимальних способу та глибини основного обробітку ґрунту, а також оцінка їх впливу на структурні показники врожаю, загальну врожайність і вихід насіння з одиниці площі.

Матеріал і методи

Дослідження проводили у 2023–2024 роках у зоні північно-східного Лісостепу за такою схемою експерименту з вивчення ефективності прийомів основного обробітку ґрунту: 1. Глибоке розпушування на 27 см (STROM LINE – 1,2); 2. Дискування на глибину 14 см (у два сліди, БДТ-7); 3. Плоскорізний обробіток на глибину 22 см (КПГ-2-150); 4. Оранка на глибину 22 см (контроль, ПЛН-4-35).

Польові дослідження проводили відповідно до методики випробування державних сортів сільськогосподарських культур (Волкодав, 2001). Ґрунт ділянки, на якій закладено польовий дослід, – чорнозем типовий малогумусний. Уміст гумусу – 4,6%; доступного фосфору – 22 мг/100 г ґрунту; обмінного калію – 9 мг/100 г ґрунту; pH – 5,9. Попередником сої в сівозміні була пшениця озима.

Розміщення варіантів у досліді – систематичне, повторність – чотириразова. Площа облікової ділянки – 2 га. Агротехніка вирощування сої в досліді була загальноприйнята

для регіону. Основний обробіток проводили в першій декаді серпня. Норма висіву – 0,4 млн. шт./га. Сівбу сорту Сіверка в роки досліджень здійснювали в першій декаді травня, збирання – у другій декаді вересня.

Кліматичні умови років досліджень були несприятливими з погляду насіннєвої продуктивності посівів. Так, 2023 рік загалом характеризувався відносно прийнятним стартом, але тепло-сухим фіналом (кінець серпня – початок вересня), що підвищувало ризики зниження маси 1000 насінин і частки виконаних зерен у посівах. Сезон 2024 року відзначався стійким дефіцитом вологи з весни та піком посухи в липні-серпні, у поєднанні з частими днями з температурою +30…+37 °С. Для сої це означало високий ризик редукції зав'язей, підвищення частки «порожніх» або дрібних насінин і зниження маси 1000 насінин.

Ефективність способів обробітку оцінювали відповідно до методики визначення біоенергетичної ефективності агротехнічних заходів (Коваленко, 2022). Результати експерименту обробляли методом дисперсійного аналізу.

Результати та їх обговорення

Одним із показників якості основного обробітку є його вплив на формування забур'яненості полів. Основним методом боротьби з бур'янами нині є хімічний спосіб. Однак навіть найсучасніші гербіциди не гарантують повного знищення бур'янів.

Результати підрахунку кількості бур'янів у посівах (табл. 1) показали, що у фазі сходів сої, тобто до застосування гербіцидів, найнижча забур'яненість (57,0 шт./м²) спостерігалася в посівах після оранки, а найвища – у варіантах із глибоким розпушуванням на 27 см без обороту пласта (115,4 шт./м²) та плоскорізним обробітком на глибину 22 см (111,2 шт./м²). Таким чином, рівень забур'яненості при безполицевому обробітку був майже у два рази вищим порівняно з контролем. Засміченість посівів сої після дискування на глибину 14 см (97,0 шт./м²) була більшою, ніж після оранки, але нижчою, ніж після глибокого розпушування та плоскорізного обробітку.

Завдяки обробці посівів гербіцидами вдалося істотно знизити забур'яненість і звести чисельність бур'янів до незначного рівня. Проте навіть за таких умов забур'яненість у посівах після оранки залишалася дещо нижчою, ніж за інших прийомів основного обробітку ґрунту.

Проведені дослідження показали, що вищі запаси продуктивної вологи в ґрунті відзначалися за обробітку на глибину 22 см і більше. Тому природно, що на цих варіантах волога ефективніше використовувалася рослинами, що позитивно позначилося на показниках структури врожаю.

У наших дослідах значення всіх параметрів, які характеризують структуру врожаю, істотно не відрізнялися, що свідчить про високу пластичність і добру адаптивність досліджуваного сорту сої до умов вирощування (табл. 2).

Під час вибору агротехнічних прийомів необхідно враховувати, що теоретичною основою мінімізації обробітку ґрунту є положення, згідно з яким рівноважна щільність чорноземів перебуває в межах біологічного оптимуму для обраної культури (Zakharchenko, 2024). Дослідження показали, що на початку вегетації рослини сої забезпечували найповніші сходи саме за використання дворазового дискування як основного обробітку й за оранки.

Отримані дані свідчать, що структурні показники врожаю перевищували показники при мілкому розпушуванні ґрунту (на 7–9%) за умови поглиблення обробітку до 22 см і більше. Показники структури врожаю, отримані за плоскорізного обробітку,

Таблиця 1

Вплив основного обробітку на засміченість посівів сої (2023–2024 роки)

Основний обробіток	**Кількість бур'янів в посівах сої, шт./м²**			
	у фазі сходів		**перед збиранням**	
	усього	**у тому числі, багаторічних**	**усього**	**у тому числі, багаторічних**
1. Глибоке рихлення	115,4	5,9	15,4	1,7
2. Дискування	97,0	6,3	16,0	2,0
3. Плоскорізний обробіток	111,2	5,1	13,6	1,7
4. Оранка (контроль)	57,0	4,7	11,9	1,5

Джерело: сформовано автором.

Таблиця 2

Вплив основного обробітку на схожість і структурні показники урожайності зерна сої (2023–2024 роки)

Основний обробіток	**Схожість, %**	**Висота рослини, см**	**Кількість насінин шт./рослину**	**Маса 1000 насінин, г**
1. Глибоке рихлення	74,1	84	31,5	192,1
2. Дискування	79,4	78	30,7	172,4
3. Плоскорізний обробіток	73,8	82	31,7	188,5
4. Оранка (контроль)	82,9	83	31,2	189,2
$НІР_{05}$	3,3	2,4	0,5	1,6

Джерело: сформовано автором.

несуттєво відрізнялися від показників, отриманих після оранки на ту ж глибину. Подібна тенденція за більшістю елементів структури врожаю спостерігалася й за глибокого розпушування, винятком стала маса 1000 насінин. За обробітку ґрунту на глибину 27 см цей показник достовірно перевищував інші як у середньому за роки досліджень, так і за окремими роками.

Несприятливі температурні умови в період вегетації дали змогу виявити недоліки дрібного обробітку. За високих температур і недостатніх запасів вологи цей спосіб обробітку ґрунту не забезпечував умов, наближених до біологічного оптимуму під час формування зерна. У результаті на посівах із мілким обробітком розвивалися відносно невисокі рослини, маса 1000 насінин у яких була меншою, ніж за інших варіантів досліду.

Проведені дослідження підтвердили значний вплив глибини обробітку на врожайність сої. За фактичних погодних умов під час польових досліджень найефективнішим виявився варіант із глибоким розпушуванням. Мілкий обробіток ґрунту достовірно знижував урожайність зерна порівняно з іншими способами основного обробітку (табл. 3).

Насіннєва врожайність посівів сої в більшій мірі залежала від глибини обробітку, ніж від способів основного обробітку ґрунту. Найвищий вихід насіння отримано за глибокого розпушування – 1,74 т/га. У цьому варіанті вихід насіннєвої фракції в середньому за роки досліджень становив 74,8%, що на 1,1–1,4% більше, ніж за обробітку ґрунту на глибину 22 см. Це пояснюється більшою вирівняністю насіння під час збирання врожаю.

Мілкий обробіток ґрунту суттєво знижував вихід насіння з гектара через значне варіювання розмірів насінин під час збирання. У результаті насіннєва продуктивність посівів у цьому варіанті була на 24,4% нижчою порівняно з контрольним.

Для уточнення економічної ефективності різних способів основного обробітку ґрунту проведено розрахунки витрат на їх застосування. За даними різних літературних джерел, глибоке розпушування забезпечує економію витрат у межах 10–25% у розрахунку на одиницю площі порівняно з оранкою; плоскорізний обробіток – 20–40%, а дискування – 35–55% (Компанієць та ін., 2016; Дудка і Павлов, 2022).

Під час розрахунку ефективності способів основного обробітку витрати на їх

Таблиця 3

Вплив основного обробітку ґрунту на показники урожайності сої (2023–2024 роки)

Основний обробіток	**Урожайність зерна, т/га**	**Вихід насіннєвої фракції, %**	**Вихід насіння з 1 га посівів**
1. Глибоке рихлення	2,32	74,8	1,74
2. Дискування	1,89	67,2	1,27
3. Плоскорізний обробіток	2,24	73,4	1,64
4. Оранка (контроль)	2,28	73,7	1,68
$НІР_{05}$	0,21		

Джерело: сформовано автором.

виконання переведено з показника «грн/га» у собівартість 1 т насіння. Як показали результати (рис. 1), насіннєва врожайність щодо контрольного варіанта помітно відрізнялася між собою. Так, мілкий обробіток забезпечив лише 75,6% від виходу насіння контрольного варіанту. Інші способи відрізнялися від контролю незначно – на 2,4–3,6%.

З урахуванням відмінностей у виході насіння встановлено, що економічна ефективність усіх способів була близькою між собою й лише на 1,6–2,7% нижчою за контрольну за показником собівартості.

Вивчивши різні способи основного обробітку ґрунту – з обертанням і без обертання шару ґрунту; із застосуванням різної глибини (мілкий, середній і глибокий), установили, що в посушливих умовах із підвищеними температурами під час формування зерна, які спостерігалися у 2023–2024 роках у зоні північно-східного Лісостепу, найбільш доцільним є проведення зяблевого глибокого розпушування на глибину 27 см. Цей прийом забезпечує формування високоякісного насіннєвого матеріалу з урожайністю, що на 3,6% перевищує показники інших способів обробітку.

Застосування зяблевого глибокого розпушування агрегатом STROM LINE-1,2 є агрономічно й економічно обґрунтованим рішенням.

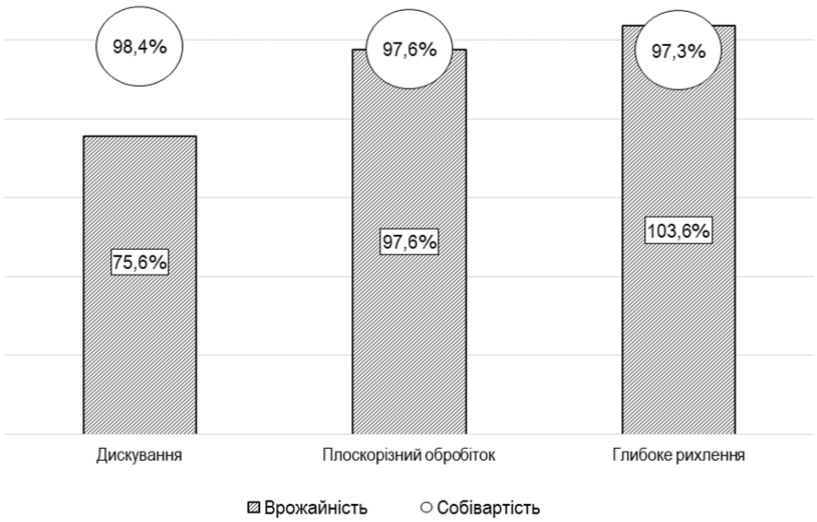


Рис. 1. Показники насіннєвої продуктивності та собівартості насіння сої за різноглибинного основного обробітку, % до оранки (20–22 см)

Джерело: сформовано автором.

Висновки

Вивчення різних способів основного обробітку ґрунту (з обертанням і без обертання шару ґрунту; оранки, плоскорізної, мілкого обробки та глибокого рихлення) показало, що глибина обробітку є визначальним фактором для забезпечення оптимальної щільності, вологості й аерації орного шару. Найвищі показники польової схожості, кількості бобів на рослину й маси 1000 насінин відзначалися за проведення зяблевого глибокого рихлення на глибину 27 см, що забезпечувало кращий водно-повітряний режим і розвиток кореневої системи.

Урожайність сої за глибокого рихлення перевищувала інші способи основного обробітку в середньому на 3,6%, а вихід насіннєвої фракції становив 74,8%, що свідчить про формування якісного насіннєвого матеріалу. Економічні розрахунки підтвердили доцільність застосування цього способу: собівартість 1 т насіння була на 1,6–2,7% нижчою, ніж за оранки, при збереженні високої якості насіння.

Отже, зяблеве глибоке рихлення на 27 см є найбільш ефективним агротехнічним прийомом у посушливих умовах північно-східного Лісостепу, оскільки воно забезпечує оптимальні фізичні властивості ґрунту, підвищує насіннєву продуктивність і є економічно обґрунтованим рішенням.

Список використаної літератури

Андрусик П.Р. Оптимізація елементів технології вирощування сої в західному лісостепу: дис. ... д-ра філософії : 201 «Агрономія». Київ, 2025. 192 с.

Вожегова Р.А., Орленко Л.П., Шевченко Н.Д. Урожайність сої за різних систем основного обробітку ґрунту та удобрення в умовах зрошення Півдня України. *Таврійський науковий вісник аграрної науки.* 2021. Вип. 119. С. 10–16. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.7.2.

Волкодав В.В. Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур (зернові, круп'яні та зернобобові культури). Київ, 2001. 69 с.

Гангур В.В., Пипко О.С., Прокопів О.О. Вплив передпосівного обробітку ґрунту і інокуляції на продуктивність сої. *Вісник Полтавської державної аграрної академії.* 2021. № 4. С. 86–93. https://doi.org/10.31210/visnyk2021.04.10.

Дудка О.А., Павлов О.С. Урожайність, економічна та енергетична ефективність вирощування пшениці ярої за різних систем землеробства в Правобережному Лісостепу України. *Таврійський науковий вісник.* 2022. № 126. С. 39–44. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.126.6.

Єщенко В.О., Пясецький П.І. Будова орного шару та біологічна активність чорнозему опідзоленого залежно від інтенсивності його основного обробітку. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва.* 2012. Вип. 81(1). С. 15–20.

Заболотний Г.М. Агробіологічні основи вирощування сої та шляхи максимальної реалізації її продуктивності. Вінниця, 2020. 276 с.

Зубко В.М., Комісар Є.О. Аналіз сучасних методів і приладів для вимірювання твердості ґрунту. *Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів.* 2020. Вип. 22. С. 52–63.

Коваленко О.А. Оцінка біоенергетичної ефективності агротехнічних заходів. МНАУ, 2022. 62 с.

Компанієць В.О., Кулик А.О., Кохан А.В. Економічна ефективність застосування способів основного обробітку ґрунту в технології вирощування соняшнику. *Вісник Полтавської державної аграрної академії.* 2016. № 1–2. С. 58–61. https://doi.org/10.31210/visnyk2016.1-2.12.

Куничак Г.І., Дутчак О.В., Матвієць Н.М. Продуктивність сої за різних способів обробітку ґрунту та системи удобрення з елементами біологізації. *Корми і кормовиробництво.* 2023. № 96. С. 94–101. https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202396-09.

Огурцов Є.М., Міхєєв В.Г., Бєлінський Ю.В., Клименко І.В. Адаптивна технологія вирощування сої у Східному Лісостепу України. Харків : ХНАУ, 2016. 268 с.

Середа Л.П., Швець Л.В., Швець О.І. Розробка культиватора для нових технологій обробітку ґрунту. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2020. Вип. 3(110). С. 117–125. https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-3-12.

Carciochi W.D., Schwalbert R., Andrade F.H., Corassa G.M., Carter P., Gaspar A.P., Ciampitti I.A. Soybean seed yield response to plant density by yield environment in North America. *Agronomy Journal.* 2019. Vol. 111(4). P. 1923–1932. https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0635.

Mulazzani R.P., Gubiani P.I., Zanon A.J., Drescher M.S., Schenato R.B., Girardello V.C. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT. *Agricultural Systems.* 2022. Vol. 203. 103523. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103523.

Zakharchenko E. The influence of the methods of tillage on bulk density, moisture and biological activity of black soil in organic farming. *Publishing House "Baltija Publishing".* 2024. P. 344–372. https:///doi.org/10.30525/978-9934-26-473-3-1.

References

Andrusyk, P.R. (2025). Optymizatsiia elementiv tekhnolohii vyroshchuvannia soi v zakhidnomu lisostepu [Optimization of elements of soybean cultivation technology in the Western Forest-Steppe] (PhD dissertation, specialty 201 "Agronomy"). Kyiv, 192 p. [in Ukrainian].

Vozhehova, R.A., Orlenko, L.P., & Shevchenko, N.D. (2021). Urozhainist soi za riznykh system osnovnoho obrobitku gruntu ta udobrennia v umovakh zroshennia Pivdnia Ukrainy [Soybean yield under different systems of primary tillage and fertilization in irrigated conditions of Southern Ukraine]. Tavriiskyi naukovyi visnyk ahrarnoi nauky [Taurian Scientific Bulletin of Agrarian Science], 119, 10–16. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.7.2 [in Ukrainian].

Volkodav, V.V. (2001). Metodyka derzhavnoho sortovyprobuvalennia silskohospodarskykh kultur (zernovi, krupiani ta zernobobovi kultury) [Methodology of state variety testing of agricultural crops (cereals, groats, and legumes)]. Kyiv, 69 p. [in Ukrainian].

Hangur, V.V., Pypko, O.S., & Prokopiv, O.O. (2021). Vplyv peredposivnoho obrobitku gruntu i inokuliatsii na produktyvnist soi [Influence of pre-sowing soil tillage and inoculation on soybean

productivity]. Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii [Bulletin of Poltava State Agrarian Academy], 4, 86–93. https://doi.org/10.31210/visnyk2021.04.10 [in Ukrainian].

Dudka, O.A., & Pavlov, O.S. (2022). Urozhainist, ekonomichna ta enerhetychna efektyvnist vyroshchuvannia pshenytsi yaroi za riznykh system zemlerobstva v Pravoberezhnomu Lisostepu Ukrainy [Yield, economic and energy efficiency of spring wheat cultivation under different farming systems in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. Tavriiskyi naukovyi visnyk [Taurian Scientific Bulletin], 126, 39–44. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.126.6 [in Ukrainian].

Yeshchenko, V.O., & Piasetskyi, P.I. (2012). Budova ornoho sharu ta biolohichna aktyvnist chornozemu opidzolenoho zalezhno vid intensyvnosti yoho osnovnoho obrobitku [Structure of the plough layer and biological activity of podzolized chernozem depending on tillage intensity]. Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho natsionalnoho universytetu sadivnytstva [Collection of Scientific Papers of Uman National University of Horticulture], 81(1), 15–20 [in Ukrainian].

Zabolotnyi, H.M., et al. (2020). Ahrobiolohichni osnovy vyroshchuvannia soi ta shliakhy maksymalnoi realizatsii yii produktyvnosti [Agrobiological principles of soybean cultivation and ways to maximize its productivity]. Vinnytsia, 276 p. [in Ukrainian].

Zubko, V.M., & Komisar, Ye.O. (2020). Analiz suchasnykh metodiv i pryladiv dlia vymiriuvannia tverdosti gruntu [Analysis of modern methods and devices for measuring soil hardness]. Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho lisovoho ta transportnoho kompleksiv [Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes], 22, 52–63 [in Ukrainian].

Kovalenko, O.A. (2022). Otsinka bioenerhetychnoi efektyvnosti ahrotekhnichnykh zakhodiv [Assessment of bioenergetic efficiency of agrotechnical measures]. Mykolaiv National Agrarian University, 62 p. [in Ukrainian].

Kompaniiets, V.O., Kulyk, A.O., & Kokhan, A.V. (2016). Ekonomichna efektyvnist zastosuvannia sposobiv osnovnoho obrobitku gruntu v tekhnolohii vyroshchuvannia soniashnyku [Economic efficiency of primary tillage methods in sunflower cultivation technology]. Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii [Bulletin of Poltava State Agrarian Academy], 1–2, 58–61. https://doi.org/10.31210/visnyk2016.1-2.12 [in Ukrainian].

Kunychak, H.I., Dutchak, O.V., & Matviets, N.M. (2023). Produktyvnist soi za riznykh sposobiv obrobitku gruntu ta systemy udobrennia z elementamy biolohizatsii [Soybean productivity under different tillage and fertilization systems with elements of biologization]. Kormy i kormovyrobnytstvo [Feeds and Feed Production], 96, 94–101. https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202396-09 [in Ukrainian].

Ohurtsov, Ye.M., Mikhieiev, V.H., Bielinskyi, Yu.V., & Klymenko, I.V. (2016). Adaptyvna tekhnolohiia vyroshchuvannia soi u Skhidnomu Lisostepu Ukrainy [Adaptive technology of soybean cultivation in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine]. In M. A. Bobro (Ed.), Kharkiv: KhNAU, 268 p. [in Ukrainian].

Sereda, L.P., Shvets, L.V., & Shvets, O.I. (2020). Rozrobka kultyvatora dlia novykh tekhnolohii obrobitku gruntu [Development of a cultivator for new soil tillage technologies]. Tekhnika, enerhetyka, transport APK [Engineering, Energy, Transport of the Agro-Industrial Complex], 3(110), 117–125. https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-3-12 [in Ukrainian].

Carciochi, W.D., Schwalbert, R., Andrade, F.H., Corassa, G.M., Carter, P., Gaspar, A.P., & Ciampitti, I.A. (2019). Soybean seed yield response to plant density by yield environment in North America. Agronomy Journal, 111(4), 1923–1932. https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0635 [in English].

Mulazzani, R.P., Gubiani, P.I., Zanon, A.J., Drescher, M.S., Schenato, R.B., & Girardello, V.C. (2022). Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT. Agricultural Systems, 203, 103523. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103523 [in English].

Zakharchenko, E. (2024). The influence of the methods of tillage on bulk density, moisture and biological activity of black soil in organic farming. In Baltija Publishing (Ed.), 344–372. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-473-3-1 [in English].

Отримано: 28.10.2025
Прийнято: 17.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

CC BY

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 633.15: 631.81.095: 631.547.03
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.19

ВПЛИВ РЕГУЛЯТОРІВ РОСТУ Й МІНЕРАЛЬНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ УРОЖАЮ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО

В. П. Іващук[1], К. С. Небаба[2]

У статті представлено результати дослідження впливу мінерального живлення та регуляторів росту на формування структурних елементів урожаю кукурудзи на зерно. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності сучасних технологій вирощування кукурудзи в умовах інтенсифікації землеробства й нестабільних кліматичних факторів. Кукурудза є провідною зерновою культурою у світі, що вирізняється найбільшими посівними площами та високим рівнем урожайності, посідаючи важливе місце в системі сільськогосподарського виробництва. В умовах обмежених орних земель підвищення врожайності з одиниці площі набуває особливого значення для зростання загального обсягу виробництва.
Метою досліджень було встановити вплив різних систем мінерального живлення та регуляторів росту на формування структурних елементів урожаю кукурудзи різних гібридів і визначити їх оптимальне поєднання для підвищення зернової продуктивності в умовах Лісостепу Західного. У дослідженні вивчали реакцію гібридів Піонер 8834 та Олтеніо на застосування мінеральних добрив (Поліфоска 8:24:24 і КАС у дозах 150 і 300 кг/га) у поєднанні зі стимуляторами росту Sterk BIO й Amino. Установлено, що внесення КАС підвищувало довжину качана, кількість рядів і зерен у ряді, а також масу 1000 зерен порівняно з контролем. Максимальні показники зафіксовано за варіанта КАС 300 кг/га + Amino: у гібрида Олтеніо довжина качана становила 20,3 см, кількість рядів зерен – 22, маса 1000 зерен – 353,8 г, що перевищувало контроль на 15–20%. Отримані результати свідчать, що поєднане застосування мінеральних добрив і регуляторів росту забезпечує гармонійний розвиток рослин, формування повноцінних качанів і підвищення якісних і кількісних показників урожаю зерна. Такий підхід сприяє оптимізації живлення, ефективнішому використанню елементів мінерального живлення й підвищенню продуктивності кукурудзи в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

Ключові слова: *кукурудза на зерно, гібриди, мінеральне живлення, регулятори росту, структурні елементи урожаю.*

[1] здобувач наукового ступеня доктора філософії
кафедри рослинництва, селекції та насінництва
(Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський)
e-mail: ivp_agroservis@ukr.net
ORCID: 0009-0001-5890-6230
[2] кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри рослинництва,
селекції та насінництва
(Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський)
e-mail: agronebaba@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4529-3623

THE INFLUENCE OF PLANT GROWTH REGULATORS AND MINERAL NUTRITION ON THE FORMATION OF MAIZE GRAIN YIELD STRUCTURAL COMPONENTS

V. P. Ivashchuk, K. S. Nebaba

The article presents the results of a study on the influence of mineral nutrition and plant growth regulators on the formation of structural elements of maize grain yield. The relevance of the research is determined by the need to improve the efficiency of modern maize cultivation technologies under conditions of agricultural intensification and unstable climatic factors.

Maize is the leading cereal crop worldwide, characterized by the largest cultivated area and high productivity, and it occupies a crucial position in the agricultural production system. Under limited arable land resources, increasing yield per unit area becomes particularly important for enhancing total production.

The aim of the study was to determine the effect of different mineral nutrition systems and growth regulators on the formation of structural elements of maize grain yield for various hybrids and to identify their optimal combination to enhance grain productivity under the conditions of the Western Forest-Steppe of Ukraine.

The experiment examined the response of maize hybrids Pioneer 8834 and OLTENIO to the application of mineral fertilizers (Polifoska 8:24:24 and UAN at rates of 150 and 300 kg/ha) in combination with growth stimulants Sterk BIO and AMINO. It was found that UAN application increased ear length, the number of kernel rows and kernels per row, as well as the 1000-kernel weight compared to the control. The highest values were observed under the variant UAN 300 kg/ha + AMINO: for the OLTENIO hybrid, ear length reached 20.3 cm, the number of kernel rows – 22, and 1000-kernel weight – 353.8 g, which exceeded the control by 15–20%.

The obtained results indicate that the combined use of mineral fertilizers and growth regulators ensures balanced plant development, formation of well-filled ears, and improvement of both qualitative and quantitative grain yield indicators. This approach promotes nutrient optimization, more efficient use of mineral elements, and higher maize productivity under various soil and climatic conditions.

Key words: *maize for grain, hybrids, mineral nutrition, growth regulators, yield structure.*

Вступ

Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва вимагає постійного пошуку й упровадження ефективних агротехнологічних прийомів, здатних максимально реалізувати генетичний потенціал високопродуктивних гібридів. У цьому контексті кукурудза на зерно (*Zea mays L.*) посідає ключове місце у світовому й вітчизняному землеробстві, будучи однією з найважливіших продовольчих, кормових та енергетичних культур (Хавхун, 2024).

В умовах глобальних кліматичних змін, все більшої конкуренції на аграрному ринку та нагальної потреби в гарантуванні продовольчої й енергетичної безпеки питання якості зерна кукурудзи набуває критичного значення. Трансформація агровиробництва від екстенсивного підходу до інтенсивної моделі, яка фокусується на стабільній урожайності та високій якості, вимагає вдосконалення агротехнологій вирощування кукурудзи. Це зумовлює необхідність включення показників якості до загальної оцінки ефективності виробництва. Особливої актуальності набуває дослідження взаємозв'язку між якістю зерна й ключовими технологічними елементами, зокрема добором гібридів та оптимальною густотою стояння рослин (Dawar et al., 2024).

Кукурудза, будучи зерновою культурою з найбільшою посівною площею та найвищою врожайністю у світі, займає ключове положення в сільськогосподарському виробництві.

Вирішальний вплив на кінцеву врожайність кукурудзи має формування структурних елементів (кількість качанів на рослині, кількість зерен у качані та маса 1000 зерен) у критичні фази органогенезу. Ці елементи безпосередньо залежать від оптимального забезпечення рослин поживними речовинами й регуляції фізіологічних процесів (Shahini et al., 2023).

Традиційне мінеральне живлення є базовою умовою для отримання високих урожаїв, адже саме азот, фосфор і калій забезпечують ключові процеси біосинтезу й енергетичного обміну в рослинних клітинах (Vaniuk et al., 2022). Однак навіть за достатнього рівня мінерального живлення часто спостерігається неповна реаліза-

ція потенціалу через стресові фактори або порушення внутрішніх регуляторних механізмів (Kalenska et al., 2025). Саме тому в сучасних агротехнологіях зростає роль регуляторів росту рослин (РРР). Ці біологічно активні сполуки, застосовані в малих дозах, здатні коригувати баланс фітогормонів, підвищувати стійкість до стресів (посуха, холод), оптимізувати розподіл асимілянтів і, що найважливіше, цілеспрямовано впливати на процеси диференціації та формування репродуктивних органів (Tkalich et al., 2023).

Зважаючи на зазначене, важливим є детальне дослідження впливу поєднання мінерального живлення й регуляторів росту на формування структурних елементів урожаю кукурудзи. Це дає змогу визначити оптимальні умови для максимальної реалізації генетичного потенціалу гібридів і підвищення ефективності використання ресурсів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення екологічно безпечних та економічно обґрунтованих технологій вирощування кукурудзи в умовах змін клімату й інтенсифікації землеробства.

Матеріал і методи

Наукові дослідження проводили на полях ТОВ «НВА «Перлина Поділля», розташованому в Білогірському районі Хмельницької області, що знаходиться в зоні Лісостепу. Площа елементарної ділянки – 40 м^2, облікової – 35 м^2. Ґрунти дослідного поля – чорноземи опідзолені, вони мають високий природний уміст гумусу й поживних елементів, що забезпечує високу потенційну родючість. Попередником у польових дослідах була озима пшениця. Норма висіву насіння кукурудзи – 70 тис. шт/га.

Дослідження проводили у двофакторному досліді, у чотирикратній повторності. Показники морфологічної структури качанів кукурудзи гібридів Піонер 8834 та Олтеніо включали фонове удобрення Поліфоскою (8:24:24), унесення КАС (карбамідно-аміачної суміші) у дозах 150 і 300 кг/га, стимулятори росту застосовували Sterk BIO (2 л/га) й Amino (1,5 л/га), порівняно з контролем (без стимуляторів).

Упродовж трьох років наукових досліджень за даними Хмельницького гідрометцентру, 2023 рік виявився знаково аномальним у контексті багаторічних спостережень, найтеплішим за весь період спостережень. Середня добова температура була значно вищою за кліматичну норму. Аномально тепла зима 2022–2023 років характеризувалася високими температурами, що більше нагадували ранню весну, ніж зиму. Це призвело до раннього початку вегетації. Літні місяці були спекотними, з частими періодами, коли денні температури сягали +30°С та спостерігався значний дефіцит опадів. 2024 рік продовжив тенденцію до нестабільності, характерну для глобальних змін клімату. Зима 2023–2024 років знову була відносно теплою, з нестійким сніговим покривом і частими відлигами. У літній період спостерігалися як періоди інтенсивної спеки, так і періоди із сильними, іноді локальними опадами, що створювало нерівномірні умови зволоження ґрунту. У серпні 2024 року, за аграрними оглядами, спостерігалися високі температури ґрунту – до +60°С і більше. Середня температура повітря взимку 2025 року значно перевищувала норму, також спостерігався нестійкий сніговий покрив і часті відлиги. Різке похолодання у травні уповільнило вегетацію ярих культур, у тому числі й кукурудзи. Спекотний і посушливий липень відзначився меншою кількістю опадів за норму, з частими короткочасними зливами, які не вирішували проблеми ґрунтової посухи.

Перед нами стояло завдання проаналізувати динаміку росту й розвитку рослин кукурудзи під впливом дії регуляторів росту; визначити зміни основних структурних елементів урожаю (довжина качана, кількість рядів зерен, кількість зерен у ряді, маса 1000 зерен) за різних систем удобрення.

Масу 1000 зерен кукурудзи визначали лабораторним методом прямого підрахунку та зважування за ДСТУ 4138-2002.

Довжину качана визначали методом прямого лінійного вимірювання на репрезентативній вибірці. Цей показник є ключовим елементом структури врожаю. З облікової ділянки відбирали 20 цілих качанів (необхідна вибіркова сукупність) із характерною для варіанта густотою стояння. Вимірювання проводили сантиметровою лінійкою або рулеткою з точністю до 1 мм. Довжину фіксували як відстань від основи качана до останнього сформованого (озерненого) зерна на верхівці. Неозернена частина (носик) і ніжка качана у вимір не включалися. За отриманими даними розраховували середнє арифметичне значення довжини качана для кожного варіанта досліду, що слугувало для порівняльної оцінки впливу досліджуваних факторів (регуляторів росту й живлення).

Результати

Результати досліджень упродовж 2023–2025 років чітко вказують на те, що формування структурних елементів продуктивності качана є функцією взаємодії між внутрішнім генетичним потенціалом гібрида та зовнішніми факторами технології вирощування. Зокрема, аналіз засвідчив, що кількість зерен у ряді – критичний показник урожайності – має найбільш виражену й істотну залежність від генотипу (гібрида). На варіанті контроль – без додаткового азотного живлення та стимуляторів – довжина качана становила 18,3 см. Найдовший качан кукурудзи в гібриду Піонер 8834 – 20,6 см – отримано на ділянках із застосуванням максимальної дози азоту: КАС 300 кг/га у поєднанні зі стимулятором росту Amino. Збільшення довжини на 2,3 см (або на 12,6%) свідчить про те, що оптимальне азотне живлення в поєднанні з регулятором росту, який містить амінокислоти, ефективно підтримує процеси росту й подовження репродуктивного органу, особливо в критичні фази розвитку (табл. 1).

Показники довжини качана кукурудзи двох гібридів були зіставними, але Олтеніо розпочинав з дещо більшої базової довжини. Цей гібрид продемонстрував зростання від 17,4 см (контроль) до 20,3 см у найкращому варіанті КАС 300 кг/га + Amino. Порівнюючи два гібриди, можемо відмітити таку тенденцію: Піонер 8834 досяг дещо більшої абсолютної довжини, різниця між максимальним і мінімальним значенням була значнішою для Олтеніо 2,9 см порівняно з гібридом Піонер 8834 – 2,3 см. Не менш важливим показником у структурі врожаю кукурудзи на зерно є кількість рядів зерен. Гібрид Олтеніо виявив виняткову здатність до формування більшої окружності качана під впливом інтенсивних технологій. Так, на контрольних варіантах показники були схожими для обох гібридів, на ділянках із застосуванням КАС 300 кг/га + Amino гібрид Олтеніо досяг 22,0 шт рядів, що є вищим результатом, ніж у Піонер 8834 – 21,3 шт. Ця різниця свідчить про більший потенціал Олтеніо до формування репродуктивних органів на ранніх етапах розвитку.

Обидва гібриди продемонстрували суттєве зростання кількості зерен у ряді під впливом інтенсифікації: Олтеніо показав зростання 35,3 шт до 40,7 шт, Піонер 8834 – від 32,7 шт до 41,3 шт. За цими

Таблиця 1

Структурні елементи врожаю кукурудзи на зерно залежно від агротехнічних заходів (середнє за 2023–2025 роки)

Гібрид	Мінеральне живлення	Стимулятори росту	Довжина качана, см	Кількість рядів зерен, шт	Кількість зерен у ряді, шт	Маса 1000 зерен, г
Піонер 8834	Фон – Поліфоска 8:24:24	контроль	18,3	17,3	32,7	272,4
		Sterk BIO	19,0	19,3	36,7	283,2
		Amino	19,2	19,3	36,7	292,1
	Фон + КАС 150 кг/га	контроль	19,4	17,3	34,7	277,9
		Sterk BIO	20,5	19,3	38,0	288,2
		Amino	20,6	19,3	39,3	296,0
	Фон + КАС 300 кг/га	контроль	19,5	19,3	36,0	283,3
		Sterk BIO	20,6	21,3	40,7	293,2
		Amino	20,6	21,3	41,3	265,9
Олтеніо	Фон – Поліфоска 8:24:24	контроль	17,4	17,3	35,3	282,9
		Sterk BIO	18,9	19,3	37,3	293,7
		Amino	19,0	20,7	38,0	302,5
	Фон + КАС 150 кг/га	контроль	18,5	18,7	36,0	312,5
		Sterk BIO	19,3	20,7	40,0	327,7
		Amino	19,6	21,3	40,0	338,3
	Фон + КАС 300 кг/га	контроль	18,8	19,3	37,3	334,7
		Sterk BIO	19,9	21,3	40,7	345,8
		Amino	20,3	22,0	40,7	353,8

показниками обидва гібриди були практично рівними, хоча Піонер 8834 завдяки трохи більшій довжині качана сформував незначно більшу кількість зерен у ряді в найкращому варіанті.

Порівняльний аналіз показав, що обидва гібриди, Піонер 8834 й Олтеніо, позитивно відреагували на інтенсифікацію живлення КАС і застосування біостимуляторів Amino та Sterk BIO, демонструючи зростання всіх структурних елементів урожаю. Проте гібрид Олтеніо виявив більш інтенсивну реакцію на покращення умов вирощування, особливо у варіанті КАС 300 кг/га + Amino, досягнувши найвищих показників за масою 1000 зерен – коливання від 282,9 г до 353,8 г. На цьому ж варіанті живлення в гібриду Піонер 8834 максимальними були показники, що коливалися від 272,4 г до 296,0 г. Різниця в 57,8 г між максимальними показниками Олтеніо та Піонер 8834 є найбільш суттєвою серед усіх структурних елементів. Це вказує на те, що Олтеніо ефективніше використовує поживні речовини на етапі наливу зерна, особливо під дією біостимулятора Amino, що, зрештою, забезпечує значне підвищення загальної ваги врожаю.

Обговорення

Раціональне застосування мінеральних добрив створює оптимальні умови для росту й розвитку рослин кукурудзи, забезпечуючи їх необхідними макро- та мікроелементами. Проте навіть за достатнього живлення потенціал продуктивності не завжди реалізується повною мірою через стресові умови вирощування, коливання температури, вологи чи густоти посіву (Іванюк та ін., 2022). У цьому контексті важливе місце посідає використання регуляторів росту рослин, які активізують фізіолого-біохімічні процеси, підвищують стійкість до несприятливих факторів і сприяють кращому засвоєнню елементів живлення (Gilli et al., 2023).

Комплексне застосування добрив і регуляторів росту дає змогу гармонізувати живлення та фізіологічну активність кукурудзи, що позитивно впливає на формування кожного структурного елемента врожаю. Вивчення цих взаємозв'язків є важливим для розроблення ефективних технологій вирощування, спрямованих на підвищення врожайності та якості зерна за умов інтенсивного землеробства.

Отримані результати свідчать, що поєднане застосування мінерального живлення й регуляторів росту істотно впливає на формування структурних елементів урожаю кукурудзи. Найвищі показники довжини качана, кількості рядів зерен, зерен у ряді та маси 1000 зерен відзначено за умов унесення КАС у дозі 300 кг/га на фоні основного удобрення Поліфоскою (8:24:24) у поєднанні зі стимуляторами Sterk BIO й Amino. Це свідчить про синергічну дію мінерального живлення та регуляторів росту на фізіологічні процеси рослин і формування продуктивності.

Подібні тенденції підтверджуються в працях В.В. Гливи, А.Я. Гадзала, Г.С. Герешка, О.М. Случака, М.О. Пащака, де зазначено, що якість зерна кукурудзи істотно залежить від рівня мінерального живлення, особливо азотного компонента (Глива та ін., 2022). Науковці М.В. Степаненко, М.Б. Грабовський також підкреслюють важливість оптимізації азотного живлення для підвищення ефективності використання азоту й формування зернової продуктивності (Степаненко, Грабовський, 2023). На думку Дж. Чжан (J. Zhang.), Г. Чжао (G. Zhao), Ю. Данг (Y. Dang), Т. Фан (T. Fan), Л. Ван (L. Wang), С. Лі (S. Li), Г. Чжоу (G. Zhou), С.Ф. УД Джо (S. Fudjoe), Дж. Палхе (J. Palta), контрольоване вивільнення азоту забезпечує стабільне живлення впродовж вегетації, що сприяє підвищенню врожайності й покращенню ресурсної ефективності (Zhang et al., 2023).

Дослідження М.І. Дудки, О.П. Якуніна, С.І. Пустовій довели, що позакореневе підживлення після попередника соняшнику сприяє активнішому росту качанів і підвищенню зернової продуктивності (Дудка та ін., 2020). Аналогічно О.С. Іванишин указує, що норми добрив і застосування мікродобрив визначально впливають на структуру врожаю кукурудзи в умовах Лісостепу Західного (Іванишин, 2021).

Щодо дії регуляторів росту, дослідження С.М. Каленської, Л.М. Єрмакова, Ю.В. Свистунова, Т. Антал засвідчують, що використання біостимуляторів і регуляторів росту сприяє підвищенню ефективності фотосинтетичного апарату, активізації обмінних процесів і покращенню структурних показників качанів (Каленська та ін. 2025а; Каленська та ін. 2025б). Зарубіжні вчені Л.Ф. Ван (L.F. Wang), Дж. Ма (J. Ma), Н. Ван (H. Wang), Й.Й. Цао (Y.Y. Cao), Дж.Дж. Лі (J.J. Li), Т.Дж. Цзя (T. J. Jia), Дж.В. Ян (J.W. Yang), Х.Й. Лі (H. Y. Li) та Т. Сюй (T. Xu), Д. Ван (D. Wang), Ю. Сі (Y. Si), Ю. Конг (Y. Kong), Х. Шао (X. Shao), Ю. Ген (Y. Geng), Ю. Лв (Y. Lv), Й. Ван (Y. Wang) зазначають, що регулятори росту здатні оптимізувати архітектуру посіву, затримувати старіння листків

і забезпечувати кращий розподіл асимілянтів у качан, що безпосередньо впливає на врожайність (Wang et al., 2022; Xu et al., 2024).

Позитивний ефект поєднання регуляторів росту з мінеральним живленням також підкреслюють В.Я. Хоміна, В.В. Лапчинський, К.С. Небаба, З.В. Пустова, Д.П. Плахтій, які показали, що стимулятори біологічного походження можуть частково замінити хімічні добрива без утрати продуктивності. Також стверджують про ефективність мікробних інокулянтів у покращенні родючості ґрунту й урожайності сільськогосподарських культур (Khomina et al., 2024).

Результати дослідження узгоджуються з висновками вітчизняних і зарубіжних учених, підтверджуючи, що поєднане застосування мінеральних добрив і регуляторів росту є одним із найефективніших шляхів інтенсифікації вирощування кукурудзи. Такий підхід дає змогу підвищити не лише врожайність, а і якість зерна, забезпечуючи раціональне використання добрив і зменшення антропогенного навантаження на агроекосистеми.

Висновки

Дослідження показали чітку позитивну реакцію гібридів кукурудзи на поєднання мінерального живлення з регуляторами росту, що підтверджує ефективність інтегрованого підходу до підвищення урожайності культури. Застосування КАС сприяло збільшенню довжини качана, кількості рядів і зерен, а також маси 1000 зерен. Найвищі показники отримано за варіантуа КАС 300 кг/га + Amino: у гібрида Олтеніо довжина качана досягала 20,3 см, 22 ряди зерен і маса 1000 зерен – 353,8 г. На цьому ж варіанті удобрення в гібриду Піонер 8834 ці показники були такі: 20,6 см; 21,3 рядів; 265,9 г відповідно.

Таким чином, дослідження впливу комплексного застосування мінерального живлення та регуляторів росту на структурні елементи врожаю кукурудзи має не лише теоретичне, а й практичне значення, оскільки забезпечує наукове підґрунтя для оптимізації систем удобрення й підживлення з урахуванням сучасних екологічних та економічних вимог.

Список використаної літератури

Глива В.В., Гадзало А.Я., Герешко Г.С., Случак О.М., Пащак М.О. Якість зерна гібридів кукурудзи різних груп стиглості залежно від норм внесення мінеральних добрив. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2022. Т. 71. № 1. С. 66–79. https://doi.org.10.32636/01308521.2022-(71)-1-4.

Дудка М.І., Якунін О.П., Пустовій С.І. Вплив позакореневого підживлення на формування зернової продуктивності кукурудзи за вирощування її після соняшнику. *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 115. С. 42–48. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.6.

Іванишин О.С. Показники структури урожаю зерна кукурудзи залежно від гібриду, норми добрив та мікродобрива в умовах Лісостепу Західного. *Молодий вчений*. 2021. № 3(91). С. 15–19. https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-3-91-4.

Іванюк Б., Гнатів П., Оліфір Ю. Вплив азотних добрив на формування врожайності зерна кукурудзи та ефективність використання азоту. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія «Агрономія»*. 2022. № 26. С. 170–176. https://doi.org/10.31734/agronomy2022.26.170.

Каленська С.М., Єрмакова Л.М., Свистунов Ю.В., Антал Т. Вплив передпосівної обробки насіння та посівів комплексними регуляторами росту рослин на урожайність гібридів кукурудзи. *Аграрні інновації*. 2025а. Вип. 29. С. 10. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.29.10.

Каленська С., Свистунов Ю., Антал Т. Врожайність гібридів кукурудзи залежно від норм добрив та регуляторів росту рослин на типових чорноземах Лівобережного Лісостепу України. *Науковий прогрес та інновації*. 2025б. Том. 28. № 1. С. 25–31. https://doi.org/10.31210/spi2025.28.01.05.

Степаненко М.В., Грабовський М.Б. Вплив системи удобрення на лінійні розміри рослин кукурудзи. *Аграрні інновації*. 2023. Вип. 21. С. 16. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.21.16.

Хавхун А.А. Вплив мінерального живлення на ростові процеси рослин кукурудзи в умовах Лісостепу Правобережного. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 190–196. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.21.

Dawar K., Dawar A., Tariq M. et al. Enhancing nitrogen use efficiency and yield of maize *(Zea mays L.)* through ammonia volatilization mitigation and nitrogen management approaches. *BMC Plant Biology*. 2024. Vol. 24. P. 74. https://doi.org.10.1186/s12870-024-04749-7.

Gilli B.R., Grassmann C.S., Mariano E., Rosolem C.A. Nitrogen fertilization boosts maize grain yield, forage quality, and estimated meat production in maize–forage intercropping. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. № 12. P. 2200. https://doi.org.10.3390/agriculture13122200.

Khomina V., Lapchynskyi V., Nebaba K., Pustova Z., Plahtiy D. Microbial inoculants as a means of improving soil and crop yields. *Scientific Horizons*. 2024. Vol. 27. № 10. P. 79–90. https://doi.org.10.48077/scihor10.2024.79.

Shahini E., Myalkovsky R., Nebaba K., Ivanyshyn O., Liubytska D. Economic and biological characteristics and productivity analysis of sunflower hybrids. *Scientific Horizons*. 2023. Vol. 26. № 8. P. 83–95. https://doi.org/10.48077/scihor8.2023.83.

Tkalich Y.I., Tsyliuryk O.I., Kokhan A.V., Yevtushenko H.O., Gonzalez P.H. Efficacy of growth regulators for maize fields. *Agrology*. 2023. Vol. 6. № 4. P. 97–103. https://doi.org/10.32819/021116.

Wang L.F., Ma J., Wang H., Cao Y.Y., Li J.J., Jia T.J., Yang J.W., Li H.Y. Effects of different growth regulators on agronomic characters and grain yield of maize varieties. *Maize Genomics and Genetics*. 2022. Vol. 13. № 3. P. 1–9. https://doi.org/10.5376/mgg.2022.13.0003.

Xu T., Wang D., Si Y., Kong Y., Shao X., Geng Y., Lv Y., Wang Y. Plant growth regulators enhance maize *(Zea mays L.)* yield under high density by optimizing canopy structure and delaying leaf senescence. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. № 6. P. 1262. https://doi.org/10.3390/agronomy14061262.

Zhang J., Zhao G., Dang Y., Fan T., Wang L., Li S., Zhou G., Fudjoe S.K., Wang L., Palta J.A. Enhancing maize yield and resource efficiency through controlled-release nitrogen fertilization on the semiarid Loess Plateau. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. № 9. P. 2320. https://doi.org/10.3390/agronomy13092320.

References

Hlyva, V.V., Hadzalo, A.Ya., Hereshko, H.S., Sluchak, O.M., & Pashchak, M.O. (2022). Yakist zerna hibrydiv kukurudzy riznykh hrup styhlosti zalezhno vid norm vnesennia mineral'nykh dobryv [Grain quality of maize hybrids of different maturity groups depending on the rates of mineral fertilizer application]. *Peredhirne ta hirs□ke zemlerobstvo i tvarynnytstvo [Foothill and Mountain Agriculture and Animal Husbandry]*, *71*(1), 66–79. https://doi.org/10.32636/01308521.2022-(71)-1-4 [in Ukrainian].

Dudka, M.I., Yakunin, O.P., & Pustovii, S.I. (2020). Vplyv pozakorenevoho pidzhyvlennia na formuvannia zernovoi produktyvnosti kukurudzy za vyroshchuvannia yii pislia soniashnyku [Influence of foliar feeding on the formation of maize grain productivity when grown after sunflower]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk [Tavriya Scientific Bulletin]*, (115), 42–48. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.6 [in Ukrainian].

Ivanyshyn, O.S. (2021). Pokaznyky strukturyurozhaiu zerna kukurudzy zalezhno vid hibrydu, normy dobryv ta mikrodybryva v umovakh Lisostepu Zakhidnoho [Indicators of maize grain yield structure depending on hybrid, fertilizer rate, and micronutrient in the Western Forest-Steppe conditions]. *Molodyi Vchenyi [Young Scientist]*, *3*(91), 15–19. https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-3-91-4 [in Ukrainian].

Ivaniuk, V., Hnativ, P., & Olifir, Yu. (2022). Vplyv azotnykh dobryv na formuvannia vrozhainosti zerna kukurudzy ta efektyvnist vykorystannia azotu [Influence of nitrogen fertilizers on the formation of corn grain yield and nitrogen-use efficiency]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ekolohichnoho universytetu. Seriia: Ahronomiia [Bulletin of Lviv National Environmental University. Series: Agronomy]*, (26), 170–176. https://doi.org/10.31734/agronomy2022.26.170 [in Ukrainian].

Kalenska, S.M., Yermakova, L.M., Svystunov, Yu.V., & Antal, T. (2025a). Vplyv peredposivnoi obrobky nasinnia ta posiviv kompleksnymy rehuliatoramy rostu roslyn na urozhainist1 hibrydiv kukurudzy [Influence of pre-sowing seed and crop treatment with complex plant growth regulators on the yield of maize hybrids]. *Ahrarni innovatsii [Agrarian Innovations]*, 29, 10. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.29.10 [in Ukrainian].

Kalenska, S., Svystunov, Yu., & Antal, T. (2025b). Vrozhainist hibrydiv kukurudzy zalezhno vid norm dobryv ta rehuliatoriv rostu roslyn na typovykh chornozemakh Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Yield of maize hybrids depending on fertilizer rates and plant growth regulators on typical chernozems of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. *Naukovyi Progres ta Innovatsii [Scientific Progress and Innovations]*, 28(1), 25–31. https://doi.org/10.31210/spi2025.28.01.05 [in Ukrainian].

Stepanenko, M.V., & Hrabovskyi, M.B. (2023). Vplyv systemy udobrennia na liniini rozmiry roslyn kukurudzy [Influence of the fertilization system on the linear dimensions of maize plants]. *Ahrarni innovatsii [Agrarian Innovations]*, 21, 16. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.21.16 [in Ukrainian].

Khavkhun, A.A. (2024). Vplyv mineralnoho zhyvlennia na rostovi protsesy roslyn kukurudzy v umovakh Lisostepu Pravoberezhnoho [Influence of mineral nutrition on the growth processes of maize plants in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 7, 190–196. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.21 [in Ukrainian].

Gilli, B.R., Grassmann, C.S., Mariano, E., & Rosolem, C.A. (2023). Nitrogen fertilization boosts maize grain yield, forage quality, and estimated meat production in maize–forage intercropping. *Agriculture*, *13*(12), 2200. https://doi.org/10.3390/agriculture13122200 [in English].

Dawar, K., Dawar, A., Tariq, M., et al. (2024). Enhancing nitrogen use efficiency and yield of maize (Zea mays L.) through ammonia volatilization mitigation and nitrogen management approaches. *BMC Plant Biology*, 24, 74. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04749-7 [in English].

Khomina, V., Lapchynskyi, V., Nebaba, K., Pustova, Z., & Plahtiy, D. (2024). Microbial inoculants as a means of improving soil and crop yields. *Scientific Horizons*, 27(10), 79–90. https://doi.org/10.48077/scihor10.2024.79 [in English].

Shahini, E., Myalkovsky, R., Nebaba, K., Ivanyshyn, O., & Liubytska, D. (2023). Economic and biological characteristics and productivity analysis of sunflower hybrids. *Scientific Horizons*, *26*(8), 83–95. https://doi.org/10.48077/scihor8.2023.83 [in English].

Tkalich, Y.I., Tsyliuryk, O.I., Kokhan, A.V., Yevtushenko, H.O., & Gonzalez, P.H.E. (2023). Efficacy of growth regulators for maize fields. *Agrology*, *6*(4), 97–103. https://doi.org/10.32819/021116 [in English].

Wang, L.F., Ma, J., Wang, H., Cao, Y.Y., Li, J.J., Jia, T.J., Yang, J.W., & Li, H.Y. (2022). Effects of different growth regulators on agronomic characters and grain yield of maize varieties. *Maize Genomics and Genetics*, *13*(3), 1–9. https://doi.org/10.5376/mgg.2022.13.0003 [in English].

Xu, T., Wang, D., Si, Y., Kong, Y., Shao, X., Geng, Y., Lv, Y., & Wang, Y. (2024). Plant growth regulators enhance maize *(Zea mays L.)* yield under high density by optimizing canopy structure and delaying leaf senescence. *Agronomy*, *14*(6), 1262. https://doi.org/10.3390/agronomy14061262 [in English].

Zhang, J., Zhao, G., Dang, Y., Fan, T., Wang, L., Li, S., Zhou, G., Fudjoe, S. K., Wang, L., & Palta, J.A. (2023). Enhancing maize yield and resource efficiency through controlled-release nitrogen fertilization on the semiarid Loess Plateau. *Agronomy*, *13*(9), 2320. https://doi.org/10.3390/agronomy13092320 [in English].

Отримано: 28.10.2025
Прийнято: 18.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 635.5:[631.526.3:631.527:575](477.4)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.20

СОРТИ САЛАТУ ПОСІВНОГО ЛИСТКОВОГО LACTUCA SATIVA L. VAR. SECALINA ЗАКОРДОННОЇ СЕЛЕКЦІЇ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ЇХ ГЕНЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ В ПРАВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

В. В. Кецкало[1]

Для стабільної високої врожайності салату посівного листкового в правобережному Лісостепу України необхідно слідкувати за оновленням його сортименту й обирати високопродуктивні сорти, адаптовані до ґрунтово-кліматичних умов вирощування. Із цією метою здійснено порівняння проходження фенологічних фаз, основних біометричних показників і продуктивності й урожайності нових сортів Lactuca sativa L. var. secalina закордонної селекції, а саме Афіліон, Сементел, Експонент, Екзем, Сніжинка, Лісбоа, Ліадін, Самантін, Акане. Установлено їх придатність до вирощування в умовах правобережного Лісостепу України. Так, половина досліджуваних сортів забезпечила надбавку врожаю щодо контрольного сорту Сніжинка. Найвищою врожайністю відзначилися сорти Афіліон і Сементел із показником перевищення контролю на 22% та 17% відповідно. Незначне перевершення показників контролю спостерігали в сортів Експонент (на 7%) та Екзем (на 3%). Нижчі за контроль на 6–26% показники врожайності зафіксовано в сортів Лісбоа, Ліадін, Самантін та Акане. Отже, по мірі зниження показників врожайності всі сорти можна розмістити в такій послідовності: Афіліон, Сементел, Експонент, Екзем, Сніжинка, Лісбоа, Ліадін, Самантін, Акане. Продуктивність рослин по варіантах досліду впродовж 2023–2025 рр. була 276–530 г. Більш продуктивними проявили себе Сементел та Афіліон, а меншу масу рослини мали Самантін та Акане. Сорт Сніжинка, що функціонував контролем, по досліду мав проміжну позицію за продуктивністю й урожайністю. Отже, досліджувані сорти салату листкового закордонної селекції виявилися повністю адаптивноздатні до умов зони вирощування та зберегли морфологічні ознаки й біологічні особливості рослин. Підвищити економічну ефективність вирощування салату листкового у відкритому ґрунті доцільно впровадженням сортів Афіліон і Сементел сортотипу Батавія.

Ключові слова: *салат посівний, салат листковий, Lactuca sativa L. var. secalina, сорт, сортимент, урожайність.*

[1] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри овочівництва
(Уманський національний університет, м. Умань)
e-mail: viktoriya_keckalo@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9137-6470

CULTIVATIONS OF SOWING LEAF LETTUCE (LACTUCA SATIVA L. VAR. SECALINA) OF FOREIGN SELECTION AND REALIZATION OF THEIR GENETIC POTENTIAL IN THE RIGHT-BANK FOREST-STEP OF UKRAINE

V. V. Ketskalo

For a stable high yield of seeded lettuce in the right-bank forest-steppe of Ukraine, it is necessary to monitor the updating of its assortment and choose high-yielding varieties adapted to the soil and climatic conditions of cultivation. For this purpose, a comparison of the passage of phenological phases, the main biometric indicators, and the productivity and yield of new varieties of Lactuca sativa L. var. secalina of foreign selection was carried out, namely – Afilion, Sementel, Exponent, Ekzem, Snezhinka, Lisboa, Liadin, Samantin, Akane. Their suitability for growing in the conditions of the right-bank forest-steppe of Ukraine has been established. Thus, half of the studied varieties provided a yield increase in relation to the control variety Snizhynka. The highest yield was recorded for the varieties Afilion and Sementel, with an excess of control by 22% and 17%, respectively. A slight excess of control was observed for the varieties Exponent (by 7%) and Ekzem (by 3%). Yields lower than control by 6–26% were recorded for the varieties Lisboa, Liadin, Samantin and Akane. So, as yield indicators decrease, all varieties can be placed in the following sequence: Afilion, Sementel, Exponent, Ekzem, Snezhinka, Lisboa, Liadin, Samantin, Akane. The productivity of the plants according to the experimental variants during 2023–2025 was 276–530 g. Sementel and Afilion showed themselves to be more productive, while Samantin and Akane had a lower plant weight. The Snowflake variety, which functioned as a control, according to the experiment, had an intermediate position in terms of productivity and yield. Therefore, the researched varieties of leaf lettuce of foreign selection turned out to be fully adaptable to the conditions of the growing zone and preserved the morphological features and biological features of the plants. It is advisable to increase the economic efficiency of growing leaf lettuce in open ground by introducing the varieties Afilion and Sementel of the Batavia variety type.

Key words: *seed lettuce, leaf lettuce, Lactuca sativa L. var. secalina, variety, assortment, yield.*

Вступ

Овочівництво завжди відігравало велику роль у формуванні як аграрної науки, так і збалансованого раціону харчування людини. Проте в сучасний період першочерговими є питання не лише кількісних характеристик продуктів харчування, а і їх якості й безпечності. Але одним із основних завдань АПК України нині є зростання виробництва якісних овочів шляхом створення й упровадження у виробництво продуктивних конкурентоздатних сортів і гібридів овочевих культур. Для ефективного вирощування в різних агрокліматичних зонах України постійно ведеться селекційна робота щодо створення таких сортів і гібридів, в основу яких закладено генетичну пристосованість до природно-кліматичних зон вирощування. Але відчутний сегмент сортового ринку України належить продукції закордонної селекції. За вирощування зелених овочів актуально влучно обрати сорт, адже сортові особливості впливають на терміни отримання ранньої продукції й тривалість плодоношення загалом. Це є ключовим фактором для планування оптимальних строків посіву в умовах безперебійного вирощування, а також при комбінуванні технологій у відкритому ґрунті й спорудах захищеного ґрунту (Кецкало та ін., 2024а). Асортимент овочевих культур і їх сортимент в Україні є доволі розмаїтим. Тому треба регулярно здійснювати його моніторинг і слідкувати за оновленням (Кецкало, 2025). Салат посівний уже давно є лідером серед овочевих культур. Згідно з класифікацією Міжнародного союзу з охорони нових сортів рослин, що створена відповідно до УПОВ TG/13/10 (2006), у нашій країні салат посівний (*Lactuca sativa L.*) представлений 6 різновидами: сорти з маслянистими голівками; з хрумким типом листків; салат-ромен; салат «грас», або латинський салат; зрізний листковий салат (рослини пришвидшеного зрізу) і стебловий салат (Позняк та ін., 2021).

У Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2025 рік, є 170 позицій салату посівного. Салат головчастої різновидності (*Lactuca sativa L. var. Capitata)* має 43 найменування. Салату листкової різновидності (*Lactuca sativa L. var. Secalina)* нараховується 127 сортів. Щорічно сортимент оновлюється завдяки кропіткій праці вітчизняних і зарубіжних учених. Серед різноманіття зелених культур салат листкової різновидності має найбільше сортів і гібридів, відповідно 116 та 11. Усі вони створені селекціонерами

з дев'яти країн світу, а саме: Нідерланди представили 83 позиції; українських сортів – 19; Чехія та Франція поповнили сортимент на сім сортів кожна країна; шість сортів мають німецьке походження; Туреччина представлена двома сортами; по одному сорту представили Польща, Ізраїль та Італія. Салат головчастий має 38 сортів і 5 гібридів, які надали Нідерланди (30 найменувань); по п'ять найменувань української та чеської селекції; по одному сорту з Іспанії, Кореї та Ізраїлю (Державний …, 2025; Кецкало, 2025). Упродовж крайніх трьох років (2022–2024 рр.) до переліку додалося 12 сортів салату листкового нідерландської селекції, а саме: Акане, Афіліон, Екзем, Експонент, Семенетел, Скамандер (2022 рік), Боттас, Ліадін, Лісбоа, Самантін, Чепмен (2023 рік) і Паскіан (2024 рік) (Кецкало та ін., 2024б).

За вибору сорту салату листкового важливо зробити правильний акцент на строки надходження врожаю, мету вирощування (призначення) та логістику щодо реалізації продукції, зважаючи на досить різноманітні морфологічні сортові ознаки рослин і стійкість до стрілкування. Для салату листкового ключовими показниками продуктивності є кількість листків на рослині та їх розмір. Цінність цієї культури в тому, що можна мати безперервне надходження продукції впродовж року, поєднуючи вирощування у закритому та відкритому ґрунті сортів з різним періодом вегетації (Харева та ін., 2021; Кецкало та ін., 2024). Також беззаперечною є потреба зважати на строк сівби й попит споживачів на продукцію (Leschuk et al., 2019). Останніми роками розвивається тенденція щодо вирощування сортів *Lactuca sativa L.* з генетично закладеною стійкістю до шкодочинних організмів, стійких до нестачі освітлення та спековитривалих, але разом із тим екологічно пластичних і незмінних за рівнем врожайності й особливостями продукції (Харева і Горова, 2019).

Матеріал і методи

Ми проаналізували наявний за останні три роки (2023–2025 роки) сортимент *Lactuca sativa L. var. secalina* в Державному реєстрі сортів рослин, придатних до поширення в Україні. Також по окремих сортах іноземного походження виконано зіставлення фенологічних фаз рослин, їх біометричних даних та облік урожайності в умовах Черкащини, яка є частиною правобережного Лісостепу України. Метою такої роботи було визначення сортів салату посівного листкового для вирощування на території України й виокремлення деяких із них з метою зорієнтувати виробника у виборі сорту для вирощування.

Наукову роботу здійснювали впродовж 2023–2025 років на дослідному полі Уманського національного університету за методиками вітчизняних науковців (Бондаренко і Яковенко, 2001; Грицаєнко та ін., 2003; Єщенко та ін., 2005). Рельєф дослідного поля – рівне плато з пологими (1–2°) схилами південно-східної та північно-західної експозиції. Ґрунт дослідного поля – чорнозем опідзолений малогумусний важкосуглинковий на лесі. За профілем характеризується відносною однорідністю гранулометричного й валового хімічного складу, вилугуваністю й ілювіальним характером розподілу карбонатів зі значним умістом елементів живлення в гумусовому горизонті (Ґрунтознавство …, 2005). Дослідні ділянки були по 15 м^2, розміщувалися в чотирикратному повторенні способом рендомізованих блоків і мали облікову площу 10 м^2. Посів насіння здійснювали вручну нормою 2,5 кг/га з подальшим нормуванням густоти до оптимальних параметрів згідно зі схемою розміщення рослин 35×15 см. Попередниками за роки дослідження були овочеві рослини родини Гарбузові.

Дослідницьку роботу проводили із сортами салату листкового іноземної селекції, які належать до сортотипів зеленого забарвлення Лолло Біонда (Ліадін, Лісбоа), Батавія (Афіліон, Сементел), Саланова (Екзем, Експонент) і Лолло Росса з інтенсивно-червоними листками (Акане, Самантін). За контроль був обраний сорт салату Сніжинка типу Лолло Біонда вітчизняної селекції.

Упродовж вегетації відзначали дати основних фенологічних фаз (поява поодиноких і масових сходів, утворення першого справжнього листка та наявність розетки з 4–5 листків). Також, відповідно до плану досліджень, у визначені строки на десяти типових рослинах салату в кожному повторенні кожного варіанта досліду фіксували біометричні параметри рослин – діаметр, облисненість (методом підрахунку) та площу асиміляційної поверхні (розрахунковим методом з використанням перевідного коефіцієнта). Також вимірювали діаметр товарних рослин і зважували їх.

Сортування продукції здійснювали згідно з ДСТУ 8107:2015 «Салат свіжий. Технічні

умови». Вирощені рослини салату на 94–97% були першого сорту, тобто мали характерні для сорту форму, забарвлення, розсіченість листкової пластинки, були повноцінно сформовані й не мали пошкоджень і дефектів. Статистичну обробку даних виконували методом дисперсійного аналізу.

Результати та їх обговорення

Дослідженнями закордонних науковців доведено, що салат латук має високу екологічну пластичність, але, незважаючи на це, його фенотипова експресія, морфологія, фізіологія та анатомія суттєво залежать від умов навколишнього середовища (Rusu et al., 2021). Тому під час спостереження впродовж 2023–2025 років за сортами салату листкового було передбачено, що в умовах проведення наукової діяльності рослини матимуть відмінність у проходженні окремих фенофаз, на що вплинуть сортові ознаки та погодні умови, зважаючи на те що впродовж років досліджень сівбу насіння здійснювали в однаковий термін. Під час другого етапу онтогенезу, який триває 5–10 діб, рослини салату листкового ростуть повільно. Цей період характеризується розгортанням сім'ядолей, утворенням зачатків справжніх листків і міжвузлів. Посилене збільшення вегетативної маси салату листкового відбувається на третьому періоді онтогенезу (фаза розетки).

Так, усі фенологічні фази починалися з розбіжністю по варіантах досліду 2–5 діб, тому що сорти мають різний за тривалістю період для формування товарної розетки листків – від 25 до 40 діб. Періодом технічної стиглості салату листкового вважають, як правило, коли рослини досягають бажаного розміру й мають відповідний сорту колір. Листя має бути досить великим для вживання, але разом із тим ще молодим і ніжним. Збір продукції розпочинають зазвичай за наявності в рослини 5–7 листків і їх висоти 15–20 см. Проте дослідженнями колективу зарубіжних учених доведено, що найвищу концентрацію поживних речовин, вітамінів і мінералів і меншу кількість нітратів мають рослини на ранній стадії розвитку (Rusu et al., 2021). Щоб ретельно вивчити вагу сортових ознак досліджуваних сортів та умов вирощування на вегетацію салату листкового, здійснили біометричні виміри. Виконували їх після кінцевого нормування густоти посіву у фазу формування розетки. Також здійснювали облік продукції на момент збирання.

Так, отримані дані свідчать, що рослини з наявними 4–6 листками мали різні біометричні параметри. Сформовані розетки рослин були діаметром 13,6–15,7 см, що аналогічно 2,5–3,3 тис. м^2 асиміляційної поверхні на одиницю площі. Проте кількість листків не впливала на діаметр рослини. Ця величина залежала від основних сортових морфологічних ознак – форми листків і їх гофрованості й розсіченості. Тобто сорти певного сортотипу сформують рослини з однотипними морфологічними ознаками та близькими значеннями біометричних показників (рис. 1).

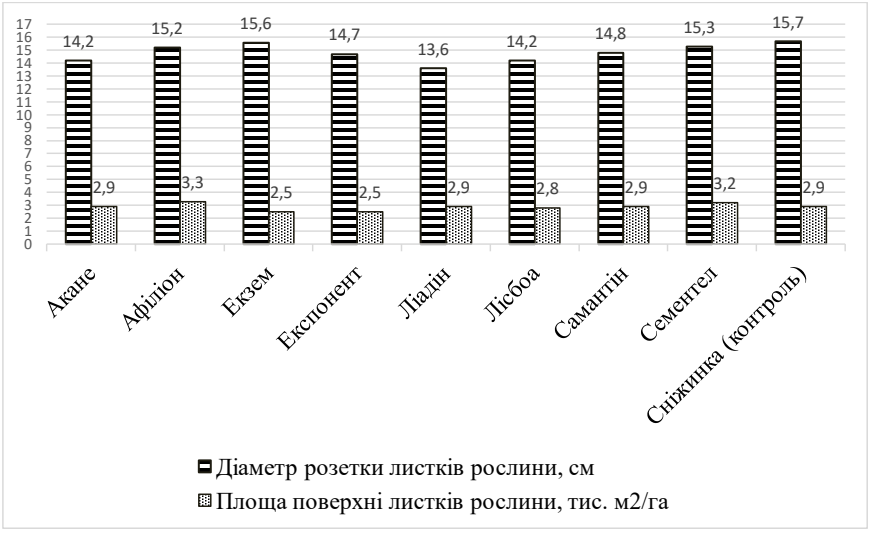


Рис. 1. Біометричні параметри рослин салату листкового на початку формування розетки листків (середнє значення за 2023–2025 роки)

Як уже зазначали, для салату листкового немає виразної фенофази або чітких біометричних параметрів рослини для визначення початку збирання врожаю. Саме тому продукцію одержуємо пролонговано в часі, допоки листкова маса придатна для споживання. На тривалість надходження врожаю має також вплив спосіб збирання. Збираючи врожай салату листкового, можна повністю зрізати розетку листків або періодично (по мірі наростання) зривати окремі найбільші листки. Під час проведення наукової роботи збір урожаю здійснювали, коли рослина вже максимально сформувала розвинену розетку листків. Ми зрізували надземну частину з невеликим сегментом кореня, аби не допустити розпадання розетки листків.

Як відмічено, досліджувані сорти належать до різних сортотипів, які мають дещо відмінні морфологічні ознаки за типом розетки, облисненості, формою листка, його щільністю й забарвленням. Це впливає на середню масу рослини й, відповідно, на врожайність, про що свідчать результати проведеної нами роботи. Також це проаналізовано й підтверджено трирічними дослідженнями закордонних науковців, які продемонстрували вплив генотипу та способу вирощування на врожайність і харчову цінність салату латук (Govedarica-Lučić et al., 2014). Іншими авторами зазначається, що безпосередньо від сорту залежить накопичення нітратів у продукції салату, зокрема більше їх у сортів з червоними листками, аніж у рослин із зеленим листям (Boskovic-Rakocevic et al., 2023).

Так, дані таблиці 1 переконують, що значення сортотипу й сорту для продуктивності салату листкового є незаперечним чинником. Саме тому для збільшення врожайності салату листкового й підвищення рівня його конкурентоспроможності на ринку овочевої продукції України важливим є збагачення сортименту.

Пересічно за роки спостереження по варіантах досліду розбіжностей у тенденції формування врожаю не зафіксовано. Але для більшості сортів досить строкаті погодні умови 2023 року проявилися менше сприятливими для вегетації рослин, порівняно з умовами 2024–2025 років. Так, маса рослини у 2023 році коливалася від 276 г до 458 г. У 2024 році цей показник становив 320–530 г, а у 2025 році – 325–525 г.

Маса товарної рослини по варіантах пересічно впродовж років дослідження була 325–525 г. Продуктивнішими (з показником 504 г та 483 г) виявилися сорти типу Батавія – Афіліон і Сементел. За ступенем зменшення маси продуктової частини наступними були рослини сортів Екзем та Експонент сортотипу Батавія з показником 427 г та 442 г відповідно. Дещо меншими сформувалися рослини салату листкового сортотипу Лолло Біонда, а саме Сніжинка, Лісбоа й Ліадін з показником маси товарної частини рослини 413 г, 387 г та 374 г відповідно. Меншу масу в досліді сформували рослини сортів Акане й Самантін сортотипу Лолло Росса – 307 г та 335 г відповідно. Варто зазначити, що сорт Сніжинка, який слугував контролем у досліді, мав проміжне значення по масі рослини.

Салат листковий є однією з небагатьох овочевих рослин, яким властиво формувати товарну продукцію впродовж короткого, порівняно з більшістю овочевих культур, інтервалу часу. Тому підсумком його вирощування було визначити більш урожайний сорт згідно з розрахунками врожайності за

Таблиця 1

Маса продуктової частини рослини салату листкового, г

Сорт	**Рік досліджень**			**Середнє за 2023–2025 роки**
	2023	***2024***	**2025**	
Акане	276	320	325	307
Афіліон	458	530	525	504
Екзем	385	435	460	427
Експонент	425	455	445	442
Ліадін	326	380	415	374
Лісбоа	346	385	430	387
Самантін	305	335	365	335
Сементел	455	505	490	483
Сніжинка (*контроль*)	385	420	435	413
$НІР_{05}$	21	25	27	–

варіантами досліду. Опрацьовуючи отримані дані, підтверджуємо, що для зеленних овочевих рослин правильно обраному сорту належить першочергове значення. Так, дослідженнями 2023 року науковці зі Словенії підтвердили, що під час вибору різновиду й сорту салату виробники та споживачі звертають увагу на його харчову якість. І саме колір є дуже важливою характеристикою, відіграє вирішальну роль у виборі, уподобанні та прийнятті свіжих салатних культур. Крім того, агрономічні параметри (врожайність і колір) надають важливу інформацію для виробників і потенційно можуть бути використані як основа для прийняття рішення про вирощування певного сорту (Sinkovic et al., 2023).

За вирощування салату листкового особливо чітко прослідковується вплив сортотипу на його продуктивність і врожайність. Тому, обираючи для вирощування сорт салату листкового, важливо зважати на значну різноманітність морфологічних ознак цієї зеленної культури. Своїми дослідженнями закордонні вчені дійшли висновку, що врожайність салату є характеристикою генотипу (Govedarica-Lučić et al., 2014). Це підтверджують й одержані нами результати проведеної роботи. У таблиці 2 представлено дані врожайності сортів салату листкового за три роки із зазначенням середнього значення за роки та відхилення від контрольного сорту Сніжинка, середня врожайність якого становила 53,7 т/га.

Отже, найвищу середню врожайність показали сорти Афіліон (65,6 т/га)і Сементел (62,8 т/га), які перевищили контроль на 11,9 т/га (22%) і 9,1 т/га (17%) відповідно. Дещо вищі за контроль показники мали також сорти Експонент (на 7%) та Екзем (на 3%), що свідчить про їхню стабільну продуктивність. Сорти з нижчими контролю показниками – Акане (39,9 т/га), Самантін (43,6 т/га), Ліадін (48,6 т/га) і Лісбоа (50,3 т/га). Найменш урожайним виявився сорт Акане, який поступався контролю на 13,8 т/га, або 26% (рис. 2).

Отже, найперспективнішими за врожайністю є сорти Афіліон і Сементел, які перевищують контроль і характеризувалися стабільною продуктивністю впродовж трьох років. Загалом спостерігається тенденція до збільшення врожайності майже в усіх сортів з 2023 до 2025 року, що може свідчити про покращення умов вирощування й стабілізацію адаптаційних властивостей сортів. Тому досліджувані сорти салату листкового зарубіжного походження проявили себе повністю придатними для вирощування в умовах правобережного Лісостепу України без змін своїх морфологічних і біологічних особливостей.

Але якщо зважати не лише на врожайність, а й на харчову цінність салату листкового, то варто прислухатися до вчених із Кореї, які досліджували антиоксидантну активність 23 різних сортів салату. Вони стверджують, що всі сорти червонолистого латуку мають особливий фітокомпонентний профіль Окрім ціанідину, вони багаті на каротиноїди, поліненасичені жирні кислоти, загальний уміст фенолів та антиоксидантний потенціал його споживання може мінімізувати захворювання, пов'язані з оксидативним стресом (Kim et al., 2014). Цей висновок підтверджений у 2022 році

Таблиця 2

Урожайність товарної продукції салату листкового, т/га

Сорт	**Рік досліджень**				**Відхилення від контролю**	
	2023	**2024**	**2025**	**середнє значення**	**т/га**	**%**
Акане	35,9	41,6	42,3	39,9	- 13,8	- 26
Афіліон	59,5	68,9	68,3	65,6	+ 11,9	+ 22
Екзем	50,1	56,6	59,8	55,5	+ 1,8	+ 3
Експонент	55,3	59,2	57,9	57,4	+ 3,7	+ 7
Ліадін	42,4	49,4	54,0	48,6	- 5,1	- 10
Лісбоа	45,0	50,1	55,9	50,3	- 3,4	- 6
Самантін	39,7	43,6	47,5	43,6	- 10,2	- 19
Сементел	59,2	65,7	63,7	62,8	+ 9,1	+ 17
Сніжинка (*контроль*)	50,1	54,6	56,6	53,7	0,0	0
$НІР_{05}$	2,5	2,1	1,7	–		

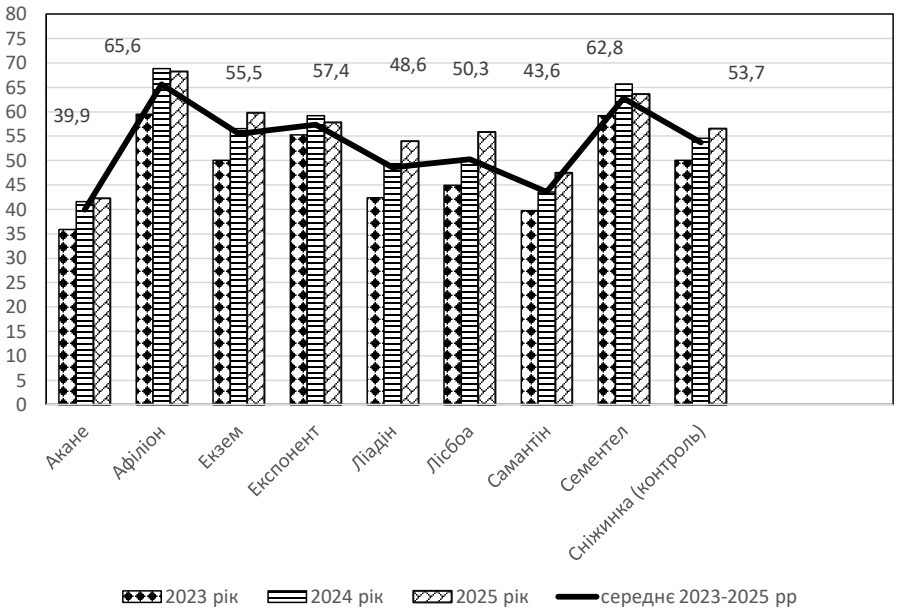


Рис. 2. Урожайність сортів салату листкового, т/га

дослідженнями науковців з Італії, Іспанії та Єгипту (Martinez-Ispizua et al., 2022).

Висновки

Підсумовуючи результати, можна стверджувати, що половина досліджуваних сортів забезпечили надбавку врожаю щодо контрольного сорту Сніжинка. По мірі зниження показників урожайності всі сорти можна розмістити в такій послідовності: Афіліон і Сементел (сортотип Батавія), Експонент та Екзем (сортотип Саланова), Сніжинка, Лісбоа й Ліадін (сортотип Лолло Біонда), Самантін та Акане (сортотип Лолло Росса). Продуктивність рослин по варіантах досліду впродовж 2023–2025 років була 276–530 г. Більш продуктивними проявили себе Сементел та Афіліон, а меншу масу рослини мали Самантін та Акане. Сорт Сніжинка, що функціонував контролем, по досліду мав проміжну позицію за продуктивністю й урожайністю.

Отже, з огляду на сортові морфологічні особливості та значні відмінності рослин салату листкового різних сортотипів, рекомендуємо овочівникам насамперед заздалегідь визначитися з бажаним сортотипом культури. Якщо акцентувати увагу на показникові врожайності, то промислове вирощування сортів Афіліон і Сементел сортотипу Батавія значно підвищує економічну ефективність виробництва салату листкового у відкритому ґрунті. Вітчизняним науковцям на перспективу пропонуємо продовжувати дослідження із сортами салату листкового й вивчати адаптивноздатність нових сортів закордонної селекції в різних ґрунтово-кліматичних зонах України.

Список використаної літератури

Бондаренко Г.Л., Яковенко К.І. Методика дослідної справи в овочівництві і баштанництві. Харків : Основа, 2001. 369 с.

Грицаєнко З.М., Грицаєнко А.О., Карпенко В.П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ : ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. 316 с.

Ґрунтознавство : підручник / Д.Г. Тихоненко, М.О. Горін, М.І. Лактіонов та ін. ; за ред. Д.Г. Тихоненка. Київ : Вища освіта, 2005. 703 с.

Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні / Український інститут експертизи сортів рослин. [Електронний ресурс]. URL: https://sops.gov.ua/derzavnij-reestr (дата звернення: 27.10.2025).

Єщенко В.О., Копитко П.Г., Опришко В.П., Костогриз П.В. Основи наукових досліджень в агрономії. Київ : Дія, 2005. 286 с.

Кецкало В.В. Забезпеченість вітчизняної галузі овочівництва сортовими ресурсами на 2025 рік. *Досягнення та концептуальні напрями розвитку сільськогосподарської науки в сучас-*

ному світі: збірник матеріалів V Всеукр. наук.-практ. конф. с. Олександрівка, Дніпропетровська область. Дніпро, 2025. С. 264–267.

Кецкало В., Тернавський А., Добрінов В. Оновлення сортового складу *Lactuca sativa* для овочевого ринку України. *Науково-технологічне та методичне забезпечення виробництва екологічної, конкурентоспроможної сільськогосподарської продукції в сучасних умовах* : збірник матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф. Умань, 2024а. С. 8.

Кецкало В.В., Щетина С.В., Тернавський А.Г., Поліщук Т.В. Формування продуктивності *Lactuca sativa L.* різних сортів. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва.* Умань, 2024б. Вип. 105. Ч. 1. С. 95–103. https://doi.org/10.32782/2415-8240-2024-105-1-95-103.

Позняк О.В., Касян О.І., Чабан Л.В. Збагачення вітчизняного сортименту салату посівного стеблового різновиду. *Тенденції та виклики сучасної аграрної науки: теорія і практика* : збірник матеріалів ІІІ Міжнар. наук. інтернет-конф. Київ. 2021. С. 241–242.

Хареба О.В., Горова Т.К. Адаптивна здатність, стабільність і пластичність салату посівного листкового у мінливих умовах середовища. *Вісник аграрної науки.* 2019. № 1(790). С. 27–32.

Хареба В.В., Хареба О.В., Лещук Н.В., Мельник С.І., Ткачик С.О., Києнко З.Б., Дидів О.Й., Позняк О.В. Салат посівний: морфологія, біологія, технологія : монографія. Вінниця : ТОВ Твори, 2021. 126 с. https://doi.org/10.21498/978-966-949-867-0.

Boskovic-Rakocevic L., Pavlovic N., Mladenovic J., Zdravkovic J., Tosic I., Marjanovic M. Yield and quality of lettuce (Lactuca sativa L.) depending on variety and type of nitrogen fertilizer. *Emirates journal of food and agriculture.* 2023. Vol. 35. Issue 8. P. 715–721. https://doi.org/10.9755/ejfa.2023.3128.

Govedarica-Lučić A., Mojević M., Perković G., Govedarica B. Yield and nutritional quality of greenhouse lettuce (Lactuca sativa L.) as affected by genotype and production methods. *Genetika.* 2014. Vol. 46. Issue 3. P. 1027–1036. https://doi.org/10.2298/GENSR1403027G.

Kim D-E., Shang X., Assefa A.D., Keum Y-S., Saini R.K. Metabolite profiling of green, green/red, and red lettuce cultivars: Variation in health beneficial compounds and antioxidant potential. *Food Research International.* 2018. Vol. 105. P. 361–370. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.028.

Leschuk N.V., Dydiv O.Y., Khareba O.V. Features of forming a conveyor of commodity products of lettuce, *Lactuca sativa L.*, varieties in the Western Forest-Steppe of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection.* Kyiv, 2019. Vol. 15. № 3. P. 273–278. https://doi.org/10.21498/2518-1017.15.3.2019.181085.

Martinez-Ispizua E., Calatayud A., Marsal J.I., Cannata C., Basile F., Abdelkhalik A., Soler S., Valcarcel J.V., Martinez-Cuenca M.-R. The nutritional quality potential of microgreens, baby leaves, and adult lettuce: an underexploited nutraceutical source. *Foods.* 2022. Vol. 11(3). P. 423. https://doi.org/10.3390/foods11030423.

Rusu T., Moraru P., Mintas O.S. Influence of environmental and nutritional factors on the development of lettuce (Lactuca sativa L.) microgreens grown in a hydroponic system: A review. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 2021. Vol. 49(3). P. 12427. https://doi.org/10.15835/nbha49312427.

Sinkovic L., Sinkovic D.K., Ugrinovic K. Yield and nutritional quality of soil-cultivated crisphead lettuce (Lactuca sativa L. var. capitata) and corn salad (Valerianella spp.) harvested at different growing periods. *Food science & nutrition.* 2023. Vol. 11. Issue 4. P. 1755–1769. https://doi.org/10.1002/fsn3.3205.

References

Bondarenko, H.L., & Yakovenko, K.I. (2001). Metodyka doslidnoi spravy v ovochivnytstvi i bashtannytstvi [Methods of research in vegetable growing and melon growing]. Kharkiv: Osnova, 369 p. [in Ukrainian].

Hrytsaienko, Z.M., Hrytsaienko, A.O., & Karpenko, V.P. (2003). Metody biolohichnykh ta ahrokhimichnykh doslidzhen roslyn i gruntiv [Methods of biological and agrochemical research of plants and soils]. Kyiv: ZAT «NIChLAVA», 316 p. [in Ukrainian].

Tykhonenko, D.H. (ed.) (2005). Gruntoznavstvo [Pedology]. Kyiv: Vyshcha shkola, 703 p. [in Ukrainian].

Derzhavnyi reiestr sortiv roslyn, prydatnykh dlia poshyrennia v Ukraini [State Register of Plant Varieties Suitable for Distribution in Ukraine]. Ukrainskyi instytut ekspertyzy sortiv roslyn.

[Electronic resource] URL: https://sops.gov.ua/derzavnij-reestr (access date 27.10.2025) [in Ukrainian].

Yeshchenko, V.O., Kopytko, P.H., Opryshko, V.P., & Kostohryz, P.V. (2005). Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii [Basics of scientific research in agronomy]. Kyiv: Diia, 286 p. [in Ukrainian].

Ketskalo, V.V. (2025). Zabezpechenist vitchyznianoi haluzi ovochivnytstva sortovymy resursamy na 2025 rik [Provision of the domestic vegetable growing industry with varietal resources for 2025]. *Dosiahnennia ta kontseptualni napriamy rozvytku silskohospodarskoi nauky v suchasnomu sviti: materialy V Vseukr. nauk.-prakt. konf. [Achievements and conceptual directions of the development of agricultural science in the modern world: V All-Ukrainian scientific and practical conference].* s. Oleksandrivka, Dnipropetrovska oblast, pp. 264–267 [in Ukrainian].

Ketskalo, V., Ternavskyi, A., & Dobrinov, V. (2024a). Onovlennia sortovoho skladu Lactuca sativa dlia ovochevoho rynku Ukrainy [Updating the varietal composition of Lactuca sativa for the vegetable market of Ukraine]. *Naukovo-tekhnolohichne ta metodychne zabezpechennia vyrobnytstva ekolohichnoi, konkurentospromozhnoi silskohospodarskoi produktsii v suchasnykh umovakh: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf. [Scientific-technological and methodological support for the production of ecological, competitive agricultural products in modern conditions: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference].* Uman, pp. 8 [in Ukrainian].

Ketskalo, V.V., Shchetyna, S.V., Ternavskyi, A.H., & Polishchuk, T.V. (2024b). Formuvannia produktyvnosti Lactuca sativa L. riznykh sortiv [Formation of productivity of Lactuca sativa L. of different varieties]. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho natsionalnoho universytetu sadivnytstva [Collection of scientific works of the Uman National University of Horticulture].* Ch. 1. Uman, 105, 95–103. https://doi.org/10.32782/2415-8240-2024-105-1-95-103 [in Ukrainian].

Pozniak, O.V., Kasian, O.I., & Chaban, L.V. (2021). Zbahachennia vitchyznianoho sortymentu salatu posivnoho steblovoho riznovydu [Enrichment of the domestic assortment of lettuce of the seeded stem variety]. *Tendentsii ta vyklyky suchasnoi ahrarnoi nauky: teoriia i praktyka: materialy III Mizhnar. nauk. internet-konf. [Trends and Challenges of Modern Agrarian Science: theory and practice III International Scientific Internet Conference].* Kyiv, pp. 241–242 [in Ukrainian].

Khareba, O.V., & Horova, T.K. (2019). Adaptyvna zdatnist, stabilnist i plastychnist salatu posivnoho lystkovoho u minlyvykh umovakh seredovyshcha [Adaptability, stability and plasticity of seed lettuce under changing environmental conditions]. *Visnyk ahrarnoi nauky [Herald of Agrarian Science],* 1 (790), 27–32 [in Ukrainian].

Khareba, V.V., Khareba, O.V., Leshchuk, N.V., Melnyk, S.I., Tkachyk, S.O., Kyienko, Z.B., Dydiv, O.I., & Pozniak, O.V. (2021). Salat posivnyi: morfolohiia, biolohiia, tekhnolohiia [Sown lettuce: morphology, biology, technology]. Monograph. Vinnytsia: TOV Tvory, 126 p. https://doi.org/10.21498/978-966-949-867-0 [in Ukrainian].

Boskovic-Rakocevic, L., Pavlovic, N., Mladenovic, J., Zdravkovic, J., Tosic, I., & Marjanovic, M. (2023). Yield and quality of lettuce (Lactuca sativa L.) depending on variety and type of nitrogen fertilizer. *Emirates journal of food and agriculture,* 35(8), 715–721. https://doi.org/10.9755/ejfa.2023.3128 [in English].

Govedarica-Lučić, A., Mojević, M., Perković, G., & Govedarica, B. (2014). Yield and nutritional quality of greenhouse lettuce (Lactuca sativa L.) as affected by genotype and production methods. *Genetika,* 46(3), 1027–1036. https://doi.org/10.2298/GENSR1403027G [in English].

Kim, D-E., Shang, X., Assefa A.D., Keum, Y-S., & Saini, R.K. (2018). Metabolite profiling of green, green/red, and red lettuce cultivars: Variation in health beneficial compounds and antioxidant potential. *Food Research International,* 105, 361–370. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.028 [in English].

Leschuk, N.V., Dydiv, O.Y., & Khareba, O.V. (2019). Features of forming a conveyor of commodity products of lettuce, *Lactuca sativa L.*, varieties in the Western Forest-Steppe of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection.* Kyiv. 15(3), 273–278. https://doi.org/10.21498/2518-1017.15.3.2019.181085 [in English].

Martinez-Ispizua, E., Calatayud, A., Marsal, J.I., Cannata, C., Basile, F., Abdelkhalik, A., Soler, S., Valcarcel, J.V., & Martinez-Cuenca, M-R. (2022). The nutritional quality potential of microgreens, baby leaves, and adult lettuce: an underexploited nutraceutical source. *Foods,* 11(3), 423. https://doi.org/10.3390/foods11030423 [in English].

Rusu, T., Moraru, P., & Mintas, O.S. (2021). Influence of environmental and nutritional factors on the development of lettuce (Lactuca sativa L.) microgreens grown in a hydroponic system:

A review. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca,* 49(3), 12427. https://doi.org/10.15835/nbha49312427 [in English].

Sinkovic, L., Sinkovic, D.K., & Ugrinovic, K. (2023). Yield and nutritional quality of soil-cultivated crisphead lettuce (Lactuca sativa L. var. capitata) and corn salad (Valerianella spp.) harvested at different growing periods. *Food science & nutrition*, 11(4), 1755–1769. https://doi.org/10.1002/fsn3.3205 [in English].

Отримано: 03.11.2025
Прийнято: 10.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 631.5:635.62 (477.42)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.21

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ ГАРБУЗА ГОЛОЗЕРНОГО ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОЛІЇ В УМОВАХ ПОЛІССЯ

В. В. Осадчук[1], В. В. Мойсієнко[2]

Результати досліджень та аналіз наукових матеріалів дають змогу стверджувати, що гарбуз звичайний (Cucurbita pepo L.) голозерний є важливою олійною культурою, у насінні й олії якої містяться цінні біологічно активні речовини для використання в кулінарії, медицині та косметології. Експериментальні дослідження проводили в умовах дерново-підзолистих суглинкових ґрунтів ФГ «ОФендП» Звягельського району Житомирської області впродовж 2023–2025 років. Установлено перевагу звичайної оранки ґрунту на 18 см порівняно з мінімальним обробітком на 4–6 см (mini-till), за якої приріст урожаю насіння гарбузів становив залежно від сорту й удобрення – 0,09–0,22 т/га. Найвища врожайність насіння отримана в сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст – 0,81–0,89 т/га, що на 0,11–0,16 т/га перевищує рівень врожайності сорту Ольга за кращого обробітку ґрунту. Комбіноване внесення $N_{81}P_{40}K_{84}$ із проведенням позакореневого підживлення рослин гарбуза органо-мінеральним добривом Фулвіт Баланс, 0,5 л/га, сприяло приросту врожаю насіння в сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст на 0,08 т/га, а в сорту Ольга – 0,13 т/га.
Маса 1 000 насінин гарбузів голозерних залежала від сорту, способів основного обробітку ґрунту, удобрення, становила в середньому за три роки досліджень від 193 до 223 г у сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст та 182–209 г у сорту Ольга. Масова частка олії формувалася залежно від сорту й становила у рослин сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст 37,78–46,22% за проведення оранки та 36,89–42,55% за мінімального обробітку ґрунту. У сорту Ольга вміст олії за варіантами був у межах від 33,89 до 40,11%. Проведення позакореневого підживлення рослин Фулвіт Баланс, 0,5 л/га на фоні $N_{81}P_{40}K_{84}$, сприяло зростанню масової частки олії в насінні сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст на 8,44%. Умовний вихід олії становив у сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст від 261,87 до 379,81 л/га, а сорту Ольга від 174,07 до 290,15 л/га.

Ключові слова: *гарбуз голозерний, обробіток ґрунту, сорти, удобрення, урожайність, маса 1 000 насінин, масова частка олії, умовний вихід олії.*

[1] аспірант кафедри технологій у рослинництві
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: osd4kv@gmail.com
ORCID: 0009-0000-4843-1449
[2] доктор сільськогосподарських наук,
професор кафедри технологій у рослинництві
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: veraprof@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8880-9864

OPTIMIZATION OF ELEMENTS OF THE TECHNOLOGY OF GROWING HULLESS PUMPKIN FOR OIL PRODUCTION IN THE POLISSIA REGION

V. V. Osadchuk, V.V. Moisiienko

The results of research and analysis of scientific materials allow us to conclude that the common hulless pumpkin (Cucurbita pepo L.) is an important oil crop, whose seeds and oil contain valuable biologically active substances for use in cooking, medicine, and cosmetology. Experimental studies were conducted on sod-podzolic loamy soils at the OFendP farm in the Zvyagel district of the Zhytomyr region during 2023–2025. The advantage of conventional plowing at a depth of 18 cm over minimum tillage at a depth of 4–6 cm (mini-till) has been established, with pumpkin seed yield increases ranging from 0,09 to 0,22 t/ha, depending on the variety and fertilization. The highest seed yield was obtained from the Gleisdorfer Olkurbis variety – 0,81–0,89 t/ha, which is 0,11–0,16 t/ha higher than the yield of the Olga variety with better soil cultivation. The combined application of $N_{81}P_{40}K_{84}$ with foliar feeding of pumpkin plants with Fulvit Balance organic-mineral fertilizer, 0,5 l/ha, contributed to an increase in seed yield in the Gleisdorfer Olkurbis variety by 0,08 t/ha, and 0,13 t/ha for the Olga variety. The weight of 1 000 seeds of naked pumpkin depended on the variety, methods of primary soil cultivation, fertilization, and averaged 193–223 g for the Gleisdorfer Olkurbis variety and 182–209 g for the Olga variety over three years of research. The mass fraction of oil was formed depending on the variety and amounted to 37,78–46,22% in plants of the Gleisdorfer Olkurbis variety during plowing and 36,89–42,55% during minimum tillage. In the Olga variety, the oil content ranged from 33,89 to 40,11% depending on the variant. Foliar feeding of plants with Fulvit Balance, 0,5 l/ha against a background of $N_{81}P_{40}K_{84}$, contributed to an 8,44% increase in the mass fraction of oil in the seeds of the Gleisdorfer Olkurbis variety. The conditional oil yield was from 261,87 to 379,81 l/ha for the Gleisdorfer Olkurbis variety and from 174,07 to 290,15 l/ha for the Olga variety.

Key words: *hulless pumpkin, soil cultivation, varieties, fertilization, yield, weight of 1 000 seeds, oil content, conditional oil yield.*

Вступ

Характерною особливістю голозерного гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo* L.) є відсутність твердої оболонки на насінні, а наявність тонкої, їстівної плівки робить його зручним для споживання і переробки. Гарбузова олія має насичений ароматний смак і темно-зелений колір, використовується в кулінарії та косметології. Містить вітаміни (A, E, F і B), мінерали (цинк, селен, магній), антиоксиданти й полінасичені жирні кислоти, що робить її корисною для серцево-судинної, нервової і травної систем, а також для шкіри й імунітету. Насіння та олія є цінними снеками (перекусами) і продуктами для здорового харчування. Вживають сирою для салатів та інших страв, оскільки вона не призначена для смаження.

Інтерпретація наявних наукових матеріалів в Україні та за кордоном щодо вдосконалення елементів технології вирощування різних видів гарбузів включає в себе підбір скоростиглих високопродуктивних сортів, які мають найбільшу селекційну цінність за врожайністю, пошук ефективних регуляторів росту та схем розміщення рослин з метою підвищення врожайності, удобрення рослин, поліпшення якості плодів під час їх зберігання та переробки (Дубініна та ін., 2011; Хареба і Кокойко, 2022; Троценко та ін., 2023).

Вивчення сортового складу гарбузів *Cucurbita moschata* свідчить, що найбільш скоростиглими виявилися сорти з найменшою тривалістю вегетаційного періоду (96–101 доба) – Доля, Диво та виду *Cucurbita maxima* – сорти Ждана (116 діб) і Польовичка (120 діб). Висока врожайність відмічена в сортів Польовичка (34,5 т/га) та Диво (38,4 т/га), маса плодів яких становила відповідно 6,3 та 7,2 кг (Кокойко, 2015). За схеми сівби 1,4 х 0,8 м у гарбуза мускатного скорочувалася тривалість періоду «початку достигання плодів» на чотири доби порівняно з контролем (1,4 х 1,4 м). Максимальна кількість плодів (1,9 шт.) та їхня маса (4,3 кг) утворилася за схем розміщення рослин 1,4 х 1,7 м. За схеми розміщення рослин 1,4 х 1,1 м загальна врожайність була найвищою – 38 т/га. Високий вихід стандартних плодів спостерігали на контролі (1,4 х 1,4 м), найнижчий – на варіанті 1,4 х 2,0 м (Хареба і Кокойко, 2016).

Дослідження трьох основних груп харчового гарбуза (мускатний, великоплідний і товстокорий, або звичайний) свідчить, що серед них найкращі споживчі властивості мають мускатні сорти, у яких гарні орга-

нолептичні показники. Вони добре зберігають свій аромат, колір і структуру за термічної обробки, тобто чудово підходять для харчової промисловості. За хімічним складом і органолептичними характеристиками найкращим виявився сорт Арабатський, у якого найбільший вміст β-каротину порівняно з іншими гарбузами цієї групи, що надає плодам гарного та яскравого кольору, впливає на зміцнення імунітету людини (Дзюндзя і Велнечук, 2024). Спонтанна мутація з «голим» (без оболонки) насінням (Cucurbita pepo L. convar. pepo var. styriaca Greb.) відбулася приблизно 100 років тому в Європі. Перший сорт олійного гарбуза *Gleisdorfer Ölkürbis* був виведений з безшкіркового місцевої породи й зараз в Австрії використовуються його гібриди з високою врожайністю насіння (Winkler, 2000; Cui & Loy, 2002). На основі досліджень вчених Ірану (Bahlgerdi et al., 2014) щодо лікарського гарбуза (*Cucurbita pepo* var. styriaca, cv. "Kaki") установлено, що розсадження є більш ефективним методом отримання оптимального врожаю насіння та олії, ніж прямий посів. Визначено, що вища густота рослин – 3 рослини на квадратний метр (30 тис. рослин на гектар) є оптимальною для максимізації виробництва насіння та олії. Густота (2 рослини/м^2) мала значний вплив на довжину рослини, кількість листків, кількість вузлів і кількість підгілок (Bahlgerdi et al., 2014). Рослини, що виросли з пересаджених саджанців, були пишними й дали більше за кількістю і розмірами плодів, ніж ті, що виросли із прямого висіву. Урожайність насіння, отриманого з пересаджених рослин, була значно вищою (3,35 кг на 20 м^2), ніж урожайність насіння, отриманого із прямого висіву (2,06 кг на 20 м^2), і попередньо пророщеного насіння (2,54 кг на 20 м^2). Беззбиткова ціна за 1 кг насіння, отриманого із прямого висіву (0,98 євро/кг насіння), була нижчою, ніж витрати на пересаджені саджанці (1,20 євро/кг), де прибуток з гектара був вищим (Bavec et al., 2002). Найвища врожайність гарбузового насіння була зареєстрована на ділянках із 2,2 рослини/м^2 і висіяних 18 квітня. Отримані результати показали, що відповідна густота насадження не може покращити врожайність та компоненти врожайності гарбуза, якщо проводити сівбу пізніше (Latifi et al., 2012).

Оцінювання чотирьох іранських сортів насіння гарбуза за хімічним складом і фізико-хімічними характеристиками видобутих олій свідчить, що вміст вологи в насінні був досить низьким і становив від 4,7 до 5,4%. Зразки показали високий рівень білка (28,8–35,5%) та вміст олії (36,9–47,8%), найвищий показник був у сорту Postekaghazi. Що стосується властивостей олії, то завдяки високому вмісту олеїнової кислоти (52,7%), за якою слідує лінолева кислота (28,1%), сорт Khoreshti значно відрізнявся від інших зразків з переважаючим вмістом лінолевої кислоти – 46,5–56,1% (Jafari et al., 2012). В Айові вивчали дванадцять сортів гарбуза (*Cucurbita maxima* D.) на вміст олії в насінні, склад жирних кислот і вміст токоферолу. Установлено, що вміст олії коливався від 10,9 до 30,9%. Загальний вміст ненасичених жирних кислот становив від 73,1 до 80,5%. Переважали лінолева, олеїнова, пальмітинова та стеаринова жирні кислоти. Були виявлені значні відмінності між сортами за вмістом стеаринової, олеїнової, лінолевої та гадолеїнової кислот в олії. Спостерігали низький вміст ліноленової кислоти (<1%). Вміст токоферолу в оліях становив від 27,1 до 75,1 мкг/г олії для альфа-токоферолу, від 74,9 до 492,8 мкг/г для гамма-токоферолу та від 35,3 до 1 109,7 мкг/г для дельта-токоферолу (Stevenson et al., 2007).

Дослідженнями, проведеними в Нігерії, щодо вивчення норми внесення добрив: 0, 50, 100, 150, 200 та 250 кг/га, установлено, що найвищі концентрації проаналізованих компонентів і антиоксидантів були виявлені в насінні контрольної групи та насінні, обробленому меншими дозами NPK. Середні значення вмісту білка, золи, сирої клітковини та вуглеводів у насінні гарбуза за внесення від 0 до 100 кг/га мінеральних добрив становили відповідно 27, 1,56, 0,56 та 11,7%. За таких самих рівнів внесення добрив вихід олії з насіння гарбуза становив 59%. Антиоксидантна активність коливалася від 89,9 до 90,4%, а загальний вміст фенолів становив 47 мг/100 г (Oloyede et al., 2012).

Олія з насіння гарбуза є поширеною олією для салатів в Австрії. Вона цікава не тільки своїм типовим смаком, але й потенційною здатністю лікувати захворювання простати. Окрім жирних кислот, важливими є мікроелементи, що містять вітамін Е, фітостероли та лігнани. Оскільки насіння перед пресуванням олії обсмажують, у складі жирних кислот і мікроелементів відбуваються зміни. Вразлива до окислення лінолева кислота зменшується з 54,6 до 54,2%, тоді як концентрація ізомерів вітаміну Е протягом перших 40 хвилин зменшується приблизно

на 30%, а потім протягом останніх 20 хвилин збільшується приблизно до того ж рівня, що й на початку процесу обсмажування (Murkovic et al., 2004). Результати досліджень показали, що процес обсмажування знизив вміст вологи й активність води гарбузового насіння, а присутність майорану збагатила його ароматичний профіль компонентами, характерними для цієї спеції. Отримані олії характеризувалися нижчими значеннями кислотності та вмісту хлорофілу (Kozłowska et al., 2025).

Матеріал і методи

Експериментальні дослідження проводили в умовах ФГ «ОФендП» Звягельського району Житомирської області впродовж 2023–2025 рр. Ґрунти дослідних ділянок – дерново-підзолисті суглинкові з умістом гумусу – 1,48%. Гідролітична кислотність становить 1,82 мг-екв./100 г, pH сольовий – 5,77, уміст лужногідролізованого азоту – 95,2 мг/кг, рухомих форм фосфору – 150 мг/кг, калію – 83,6 мг/кг, сірки – 13,5 мг/кг ґрунту.

Дослідження з гарбузом голозерним передбачали вивчення трьох факторів: А – технологія основного обробітку ґрунту: звичайна оранка на 18 см; мінімальний обробіток ґрунту на 4–6 см (mini-till); В – сорти гарбуза: Гляйсдорфер Олькюрбіст; Ольга; С – позакореневе листкове підживлення на фоні $N_{81}P_{40}K_{84}$: без підживлення; підживлення Фулвіт (Fulvit) Баланс, 05 л/га. Облікова площа – 100 м^2, повторність досліду триразова, розміщення ділянок у досліді систематичне. Попередник гарбуза – ячмінь ярий. Гарбузи висівали за роками в рекомендовані для Полісся строки: 28 травня 2023 р.; 22 травня 2024 р.; 26 травня 2025 р. Сівбу проводили сівалкою культиваторного типу “Alligator 3.1” + МТЗ 892,2. Норма висіву становила 18 тис. шт./га (3,6 кг/га), ширина міжрядь 140 см. Основний обробіток ґрунту (оранка) здійснювали за допомогою ПЛН 3-35 + МТЗ 892,2 і “Alligator 3.1” + МТЗ 892,2 (mini-till). Передпосівну культивацію проводили “Alligator 3.1” + МТЗ 892,2. Під основний обробіток ґрунту було внесене комплексне мінеральне добриво Tarnogran 21 (400 кг/га), що містить $N_3P_{10}K_{21}$ та $Ca_6Mg_3S_{18}$. А під час передпосівної культивації вносили також 150 кг/га карбаміду.

Добриво Фулвіт Баланс, що вивчали в дослідах, містить бор (100 г/л), екстракт морських водоростей (100 г/л), амінокислоти (15 г/л), органічний азот (50 г/л) та суміш макро- і мікроелементів (5 г/л). Це органо-мінеральне добриво в рідкій формі, яке призначене для забезпечення рослин борним живленням та стимуляції їхнього росту. Сорти голозерного гарбуза Гляйсдорфер Олькюрбіст (2015 р. реєстрації) і Ольга (2018 р. реєстрації) належать до олійного типу використання.

Урожайність насіння гарбуза визначали шляхом поділянкового зважування, з подальшим коригуванням на 100% чистоту зерна та базову вологість 10%. Дослідження проводили з використанням таких методів: польового – відбір зразків ґрунту для визначення агрохімічної характеристики: гумус за Тюріним в модифікації В. Симакова, азот, що легко гідролізується, за Корнфілдом, рухомий фосфор і калій за Кірсановим, кислотність, pH сол.; вимірювально-вагового – для проведення обліку врожаю насіння гарбузів за В. Єщенко та іншими (Основи …, 2005); лабораторного – для визначення якісних показників зерна гарбузів; оскільки для гарбузової олії немає окремого «ДСТУ олія гарбуза», ми використовували загальний стандарт для рослинних олій (ДСТУ ISO 659:2007, 2007 р.); умовний вихід олії з насіння гарбуза визначали за формулою: $V = У \times W \times \rho/100$, де: V – об’єм олії, л/га; У – урожай насіння, кг/га; W – масова частка олії, %; ρ – густина олії, кг/л (0,92); математично-статистичного – для проведення дисперсійного аналізу й статистичної обробки даних за В. Ушкаренко (Ушкаренко та ін., 2009).

Результати та їх обговорення

На основі проведених досліджень встановлено, що врожайність гарбуза голозерного залежить від погодних умов року, сортового складу й удобрення. Аналіз урожайності за роками досліджень (2023–2025 рр.) свідчить, що її рівень різнився за варіантами й був у межах від 0,01 до 0,1 т/га. У дослідах чітко відстежується перевага звичайної оранки ґрунту на 18 см порівняно з мінімальним обробітком на 4–6 см, за яких середня врожайність становила відповідно 0,65–0,89 та 0,56–0,67 т/га. Серед сортів найбільш урожайним був сорт Гляйсдорфер Олькюрбіст з показниками 0,81–0,89 т/га (за оранки) та 0,60–0,67 (за mini-till). Сорт Ольга забезпечив нижчу врожайність – 0,65–0,78 т/га на фоні оранки та 0,56–0,62 т/га за мінімального обробітку ґрунту (табл. 1).

Максимальна врожайність формувалася завдяки використанню мінеральних добрив $N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон) та позакореневого підживлення гарбузів органо-мінераль-

Таблиця 1

Урожайність насіння гарбуза голозерного залежно від елементів технології вирощування, т/га (2023–2025 рр.)

Обробіток ґрунту (фактор А)	**Сорт (фактор В)**	**Удобрення (фактор С)**	**Урожайність за роками, т/га**			
			2023	**2024**	**2025**	**середнє**
Оранка	Гляйсдорфер Олькюрбіст	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	0,82	0,79	0,81	0,81
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	0,90	0,88	0,90	0,89
	Ольга	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	0,67	0,64	0,64	0,65
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	0,82	0,73	0,80	0,78
Mini-till	Гляйсдорфер Олькюрбіст	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	0,58	0,66	0,57	0,60
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	0,61	0,71	0,69	0,67
	Ольга	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	0,56	0,56	0,55	0,56
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	0,60	0,64	0,62	0,62
$НІР_{05}$, т/га: 2023 р. АВС – 0,02; А – 0,01; В – 0,01; С – 0,01; АВ – 0,02; АС – 0,02; ВС – 0,02. 2024 р. АВС – 0,02; А – 0,01; В – 0,01; С – 0,01; АВ – 0,01; АС – 0,01; ВС – 0,01. 2025 р. АВС – 0,04; А – 0,02; В – 0,02; С – 0,02; АВ – 0,03; АС – 0,03; ВС – 0,03.						

ним добривом Фулвіт Баланс, 0,5 л/га. Так, сорт Гляйсдорфер Олькюрбіст сформував найбільшу врожайність – 0,89 т/га, що на 0,08 т/га більше порівняно з агрофоном ($N_{81}P_{40}K_{84}$), за проведення оранки, 0,67 т/га за мінімального обробітку ґрунту, що на 0,07 т/га перевищує варіант $N_{81}P_{40}K_{84}$, без листкового підживлення рослин гарбуза. Урожайність насіння сорту Ольга була меншою як за основним обробітком ґрунту, так і за варіантом комбінованого удобрення гарбузів, порівняно з $N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон).

Маса 1 000 насінин гарбузів голозерних незалежно від факторів, що вивчали в дослідах, була в межах 181,56–222,78 г. На фоні оранки маса 1 000 насінин гарбузів становила 187,33–222,78 г, а за мінімального обробітку ґрунту – 181,56–212,78 г. Найбільша маса 1 000 насінин виявлена за оранки в сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст, яка становила 222,78 г на варіанті Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га, що на 26,22 г більше порівняно з $N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон). За мінімального обробітку ґрунту (mini-till) цей показник знижувався до 212,78 г. Оптимальна маса 1 000 насінин гарбуза сорту Ольга зафіксована на варіанті Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га – 208,67 г (за оранки) та 204,78 г за mini-till (табл. 2).

Масова частка олії в насінні гарбуза істотно змінювалася залежно від сорту. Так, найбільший уміст олії був у сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст, який становив незалежно від факторів, що вивчали в дослідах, від 36,89 до 46,22%. Основний обробіток ґрунту – звичайна оранка мав переваги над мінімальним обробітком (mini-till) за масовою часткою олії (35,22–46,22 проти 33,89–42,55%). Найвищий вміст олії в насінні сорту Ольга становив на варіанті Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га за оранки – 40,11%, а за мінімального обробітку ґрунту 39,66% (табл. 3).

Гарбузове насіння є важливим джерелом отримання корисної олії. На вихід олії значний вплив мають біологічні особливості сортів гарбуза, якість сировини, стиглість і умови зберігання насіння. Результати досліджень свідчать, що умовний вихід олії із насіння гарбуза голозерного залежить від удосконалення елементів технології вирощування та погодних умов упродовж вегетаційного періоду.

Розрахунки показують, що умовний вихід олії може становити 290,15–379,81 л/га. Так, на варіанті з оранкою і удобренням у сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст вихід олії становив 281,09–379,81 л/га, що на 70,99–89,66 л/га більше порівняно із сортом Ольга. За мінімального обробітку ґрунту умовний вихід олії був значно нижчим і становив у сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст – 205,29–261,87 л/га, що перевищувало сорт Ольга на 31,22–35,25 л/га. Позакореневе підживлення рослин гарбуза органо-мінеральним добривом Фулвіт Баланс

Таблиця 2

Маса 1 000 насінин гарбуза залежно від елементів технології вирощування, г (2023–2025 рр.)

Обробіток ґрунту (фактор А)	**Сорт (фактор В)**	**Удобрення (фактор С)**	**Маса 1 000 насінин за роками, г**			
			2023	**2024**	**2025**	**середнє**
Оранка	Гляйсдорфер Олькюрбіст	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	196,67	202,33	190,67	196,56
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	220,67	230,67	217,00	222,78
	Ольга	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	185,67	188,00	188,33	187,33
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	207,00	210,00	209,00	208,67
Mini-till	Гляйсдорфер Олькюрбіст	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	195,67	195,67	187,33	192,89
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	212,00	215,33	211,00	212,78
	Ольга	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	184,33	179,67	180,67	181,56
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	202,33	205,00	207,00	204,78
$НІР_{05}$, г: 2023 р. АВС – 3,16; А – 1,58; В – 1,58; С – 1,58; АВ – 2,24; АС – 2,24; ВС – 2,24. 2024 р. АВС – 2,30; А – 1,15; В – 1,15; С – 1,15; АВ – 1,63; АС – 1,63; ВС – 1,63. 2025 р. АВС – 4,27; А – 2,14; В – 2,14; С – 2,14; АВ – 3,02; АС – 3,02; ВС – 3,02.						

Таблиця 3

Масова частка олії в перерахунку на суху речовину в насінні гарбуза залежно від елементів технології вирощування, % (2023–2025 рр.)

Обробіток ґрунту (фактор А)	**Сорт (фактор В)**	**Удобрення (фактор С)**	**Масова частка олії, %**			
			2023	**2024**	**2025**	**середнє**
Оранка	Гляйсдорфер Олькюрбіст	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	39,67	38,33	35,33	37,78
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	45,00	47,33	46,33	46,22
	Ольга	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	37,33	37,00	31,33	35,22
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	40,67	41,00	38,67	40,11
Mini-till	Гляйсдорфер Олькюрбіст	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	38,67	38,67	33,33	36,89
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	43,33	44,33	40,00	42,55
	Ольга	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	36,67	34,67	30,33	33,89
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	40,33	40,33	38,33	39,66
$НІР_{05}$, %: 2023 р. АВС – 1,11; А – 0,55; В – 0,55; С – 0,55; АВ – 0,78; АС – 0,78; ВС – 0,78. 2024 р. АВС – 2,29; А – 1,15; В – 1,15; С – 1,15; АВ – 1,62; АС – 1,62; ВС – 1,62. 2025 р. АВС – 1,84; А – 0,92; В – 0,92; С – 0,92; АВ – 1,30; АС – 1,30; ВС – 1,30.						

(0,5 л/га) на фоні $N_{81}P_{40}K_{84}$ сприяло значному підвищенню виходу олії із врожаю насіння сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст, приріст олії порівняно з фоном мінеральних добрив ($N_{81}P_{40}K_{84}$) становив 98,72 л/га за оранки та 56,58 л/га за проведення мінімального обробітку ґрунту. У сорту Ольга приріст олії становив 80,05 л/га за оранки та 52,55 л/га (табл. 4).

Висновки

Рослини обох сортів гарбуза голозерного (Гляйсдорфер Олькюрбіст та Ольга) належать до олійного типу використання і добре реагують на вдосконалення окремих елементів технології вирощування, зокрема на основний обробіток ґрунту й удобрення.

Кращим способом основного обробітку ґрунту під гарбузи звичайні виявлена оранка

Таблиця 4

Умовний вихід олії з насіння гарбуза голозерного залежно від елементів технології вирощування, л/га (2023–2025 рр.)

Обробіток ґрунту (фактор А)	**Сорт (фактор В)**	**Удобрення (фактор С)**	**Умовний вихід олії за роками, л/га**			
			2023	**2024**	**2025**	**середнє**
Оранка	Гляйсдорфер Олькюрбіст	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	299,18	279,80	264,29	281,09
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	372,51	384,87	382,05	379,81
	Ольга	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	229,02	216,78	184,49	210,10
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	308,02	276,71	285,72	290,15
Mini-till	Гляйсдорфер Олькюрбіст	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	206,29	234,81	174,77	205,29
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	243,25	289,55	252,82	261,87
	Ольга	$N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон)	190,04	179,71	152,47	174,07
		Фон + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га	221,41	238,68	219,76	226,62
$НІР_{05}$, л/га: 2023 р. АВС – 8,82; А – 0,41; В – 0,41; С – 0,41; АВ – 6,24; АС – 6,24; ВС – 6,24. 2024 р. АВС – 20,71; А – 10,35; В – 10,35; С – 10,35; АВ – 14,64; АС – 14,64; ВС – 14,64. 2025 р. АВС – 14,29; А – 7,15; В – 7,15; С – 7,15; АВ – 10,11; АС – 10,11; ВС – 10,11.						

на глибину 18 см, на фоні якої середня врожайність насіння становила від 0,65 до 0,89 т/га. За мінімального обробітку ґрунту на 4–6 см (mini-till) урожайність насіння перебувала в межах від 0,56 до 0,67 т/га. Серед сортів гарбуза звичайного найбільш продуктивним був сорт Гляйсдорфер Олькюрбіст з найвищим рівнем урожайності – 0,81–0,89 т/га на варіанті $N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон) + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га. Урожайність насіння сорту Ольга становила 0,65–0,78 т/га. Маса 1 000 насінин гарбуза різнилася між варіантами й становила для сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст – 192,89–222,78 г, а для сорту Ольга – 181,56–208,67 г.

Масова частка олії по досліду варіювала в межах від 33,89 до 46,22%. Максимальний вміст олії відмічений у сорту Гляйсдорфер Олькюрбіст. У насінні сорту Ольга вміст олії був нижчим і становив 35,22–40,11% за оранки, що на 1,33–0,45% більше порівняно з мінімальним обробітком ґрунту. За розрахунками, умовний вихід олії з насіння гарбузів становив за варіантами досліду 261,87–379,81 л/га. Найбільш високим виходом олії характеризувався сорт Гляйсдорфер Олькюрбіст за проведення оранки та внесення $N_{81}P_{40}K_{84}$ (фон) + Фулвіт Баланс, 0,5 л/га, у позакореневе підживлення.

Список використаної літератури

Дзюндзя О., Велнечук О. Дослідження різних сортів гарбуза для використання в харчовій промисловості. *Таврійський науковий вісник. Серія «Технічні науки».* 2024. № 6. Р. 174–180. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.6.19

ДСТУ ISO 659:2007. Насіння олійне. Визначення вмісту олії (контрольний метод). [Чинний від 2007-07-27]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007.

Дубініна А., Летута Т., Томашевська Р. Порівняльна оцінка якості господарсько-ботанічних сортів гарбуза. *Товари і ринки.* 2011. Вип. 1. С. 132–139.

Кокойко В. Продуктивність і якість плодів різних сортів гарбуза в умовах органічного овочівництва. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2015. № 1 [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Nd_2015_1_8.pdf (дата звернення 20.10.2025).

Основи наукових досліджень в агрономії / В. Єщенко та ін. Київ : Дія, 2005. 288 с.

Троценко В., Жатова Г., Коваленко І., Писаренко П., Скляр Ю., Бондарєва Л. Ефективність використання морфометричного аналізу для ідентифікації сортів гарбуза. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія».* 2023. Вип. 1(51). С. 120–128.

[Електронний ресурс] URL: https://repo.snau.edu.ua:8080/xmlui/handle/123456789/11164 (дата звернення 18.10.2025).

Ушкаренко В., Нікішенко В., Голобородько С., Коковіхін С. Дисперсійний і кореляційний аналіз результатів польових дослідів : монографія. Херсон : Айлант, 2009. 372 с.

Хареба В., Кокойко В. Ріст, розвиток та урожайність і якість плодів гарбуза мускатного залежно від схем розміщення рослин. *Селекція і насінництво.* 2016. Вип. 109. С. 147–152.

Хареба В., Кокойко В. Гарбуз: біологія, технологія вирощування та переробки : монографія. Київ : Аграрна наука, 2022. 208 с.

Bahlgerdi M., Aroiee H., Azizi M. The study of plant density and planting methods on some growth characteristics, seed and oil yield of medicinal pumpkin (Cucurbita pepo var. styriaca, cv. Kaki). *American J. Life Sci.* 2014. № 2(5). P. 319–324. https://doi.org/10.11648/J.AJLS.20140205.21

Bavec F., Gril L., Grobelnik-Mlakar S., Bavec, M. Seedlings of oil pumpkins as an alternative to seed sowing: yield and production costs. *Die Bodenkultur.* 2002. № 53(1). P. 39–43.

Cui H., Loy J.B. Heterosis for seed yield exhibited in hull-less seeded pumpkin. *Cucurbitaceae* / D.N. Maynard (Ed.). Alexandria, VA : ASHS Press, 2002. P. 323–329. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77594-4_16

Jafari M., Goli S.A.H., Rahimmalek M. The chemical composition of the seeds of Iranian pumpkin cultivars and physicochemical characteristics of the oil extract. *European J. Lipid Sci. Tech.* 2012. № 114(2). P. 161–167. https://doi.org/10.1002/ejlt.201100102

Kozłowska M., Ziarno M., Zawada K., Kowalska H., Derewiaka D., Chobot M., Scibisz I. Evaluation of Some Quality Parameters of Pumpkin Seeds and Oil After Roasting with Marjoram. *Foods.* 2025. № 14. P. 172. https://doi.org/10.3390/ foods14020172

Latifi M., Barimavandi A., Sedaghathoor S., Lipayi S.R. Sowing date and plant population effects on seed yield of Cucurbita pepo. *Int. J. Agric. Biol.* 2012. № 14(4). P. 641–644.

Murkovic M., Piironen V., Lampi A.M., Kraushofer A.M., Sontag G. Changes in chemical composition of pumpkin seeds during the roasting process for production of pumpkin seed oil. Part 1 : Non-volatile compounds. *Food Chem.* 2004. № 84(3). P. 359–365. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00240-1

Oloyede F.M., Obisesan I.O., Agbaje G.O., Obuotor E.M. Effect of NPK fertilizer on chemical composition of pumpkin (*Cucurbita pepo* Linn.) seeds. *The Scientific World Journal.* 2012. № 6. P. 808196. https://doi.org/10.1100/2012/808196

Stevenson D.G., Eller F.J., Wang L., Jane J.L., Wang T. and Inglette G.E. Oil and tocopherol content of pumpkin seed oil in 12 cultivars. *J. Agric. Food Chem.* 2007. № 55(1). P. 4005–4013. https://doi.org/10.1021/jf0706979

Winkler J. Breeding of hull-less seeded pumpkins (*Cucurbita pepo*) for the use of the oil. *Acta Hort.* 2000. № 510(510). P. 123–128. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.510.20

References

Dziundzia, O.V., & Velnechuk, O.O. (2024). Doslidzhennia riznykh sortiv harbuza dlia vykorystannia u kharchovii promyslovosti [Research on different pumpkin varieties for use in the food industry]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky [Tavriya Scientific Bulletin. Series "Technical Sciences"]*, 6, 174–180. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.6.19 [in Ukrainian].

DSTU ISO 659:2007 (2007). Nasinnia oliine. Vyznachennia vmistu olii (kontrolnyi metod) [Oilseeds. Determination of oil content (control method)]. [Chynnyi vid 2007-07-27]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].

Dubinina, A., Letuta, T., & Tomashevska, R. (2011). Porivnialna otsinka yakosti hospodarsko-botanichnykh sortiv harbuza [Comparative assessment of the quality of commercial and botanical pumpkin varieties]. *Tovary i rynky [Goods and markets],* 1, 132–139 [in Ukrainian].

Ieshchenko, V.L., Kopytko, P. H., & Opryshchenko, V.P. ta in. (2005). Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii [Fundamentals of Scientific Research in Agronomy]. Kyiv: Diia, 288 p. [in Ukrainian].

Kokoiko, V.V. (2015). Produktyvnist i yakist plodiv riznykh sortiv harbuza v umovakh orhanichnoho ovochivnytstva [Productivity and quality of fruits of different pumpkin varieties in organic vegetable growing]. *Naukovi dopovidi Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy [Scientific reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine]*, 1. [Electronic resource] URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Nd_2015_1_8.pdf (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Trotsenko, V.I., Zhatova, H.O., Kovalenko, I.M., Pysarenko, P.V., Skliar, Yu.L., & Bondarieva, L.M. (2023). Efektyvnist vykorystannia morfometrychnoho analizu dlia identyfikatsii sortiv harbuza [Effectiveness of morphometric analysis for identifying pumpkin varieties]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia "Ahronomiia i biolohiia" [Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series "Agronomy and Biology"]*, 1(51), 120–128. [Electronic resource] URL: https://repo.snau.edu.ua:8080/xmlui/handle/123456789/11164 (access date 18.10.2025) [in Ukrainian].

Ushkarenko, V.O., Nikishenko, V.L., & Holoborodko, S.P. et al. (2009). Dyspersiinyi i koreliatsiinyi analiz rezultativ polovykh doslidiv [Dispersion and correlation analysis of field experiment results]: monohrafiia, Kherson: Ailant, 372 p. [in Ukrainian].

Khareba, V.V., & Kokoiko, V.V. (2016). Rist, rozvytok ta urozhainist i yakist plodiv harbuza muskatnoho zalezhno vid skhem rozmishchennia roslyn [Growth, development, yield, and quality of nutmeg pumpkin fruits depending on plant spacing patterns]. *Selektsiia i nasinnytstvo [Selection and seed production],* 109, 147–152 [in Ukrainian].

Khareba, V.V., & Kokoiko, V.V. (2016). Harbuz: biolohiia, tekhnolohiia vyroshchuvannia ta pererobky [Pumpkin: biology, cultivation and processing technology]: monohrafiia, Kyiv: Ahrarna nauka, 2022, 208 p. [in Ukrainian].

Bahlgerdi, M., Aroiee, H., & Azizi, M. (2014). The study of plant density and planting methods on some growth characteristics, seed and oil yield of medicinal pumpkin (Cucurbita pepo var. styriaca, cv. Kaki). *American J. Life Sci.* 2(5), 319–324. https://doi.org/10.11648/J.AJLS.20140205.21 [in English]

Bavec, F., Gril, L., Grobelnik-Mlakar, S., & Bavec, M. (2002). Seedlings of oil pumpkins as an alternative to seed sowing: yield and production costs. *Die Bodenkultur*, 53(1), 39–43 [in English].

Cui, H., & Loy, J.B. (2002). Heterosis for seed yield exhibited in hull-less seeded pumpkin. In: Cucurbitaceae, Maynard, D.N. (Ed.), *ASHS Press, Alexandria, VA*, 323–329. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77594-4_16 [in English].

Jafari, M., Goli, S.A.H., & Rahimmalek, M. (2012). The chemical composition of the seeds of Iranian pumpkin cultivars and physicochemical characteristics of the oil extract. *European J. Lipid Sci. Tech*, 114(2), 161–167. https://doi.org/10.1002/ejlt.201100102 [in English].

Kozłowska, M., Ziarno, M., Zawada, K., Kowalska, H., Derewiaka, D., Chobot, M., & Scibisz, I. (2025). Evaluation of Some Quality Parameters of Pumpkin Seeds and Oil After Roasting with Marjoram. *Foods,* 14, 172. https://doi.org/10.3390/ foods14020172 [in English].

Latifi, M., Barimavandi, A., Sedaghathoor, S., & Lipayi S.R. (2012). Sowing date and plant population effects on seed yield of Cucurbita pepo. *Int. J. Agric. Biol*, 14(4), 641–644 [in English].

Murkovic, M., Piironen, V., Lampi, A.M., Kraushofer, A.M., & Sontag, G. (2004). Changes in chemical composition of pumpkin seeds during the roasting process for production of pumpkin seed oil (Part 1: Non-volatile compounds). *Food Chem*, 84(3), 359–365. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00240-1 [in English].

Oloyede, F.M., Obisesan, I.O., Agbaje, G.O., & Obuotor, E.M. (2012). Effect of NPK fertilizer on chemical composition of pumpkin (*Cucurbita pepo* Linn.) seeds. *The Scientific World Journal*, 6, 808196, https://doi.org/10.1100/2012/808196 [in English].

Stevenson, D.G., Eller, F.J., Wang, L., Jane, J.L., Wang, T., & Inglette, G.E. (2007). Oil and tocopherol content of pumpkin seed oil in 12 cultivars. *J. Agric. Food Chem,* 55(10), 4005–4013. https://doi.org/10.1021/jf0706979 [in English].

Winkler, J. (2000). Breeding of hull-less seeded pumpkins (*Cucurbita pepo*) for the use of the oil. *Acta Hort,* 510(510), 123–128. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.510.20 [in English].

Отримано: 31.10.2025
Прийнято: 21.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 631.526.32: 633.34:631.8
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.22

ВИВЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛИСТКОВОЇ ПОВЕРХНІ ТА ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ СОЇ (*GLICINE HISPIDA*) ЗАЛЕЖНО ВІД СОРТУ, ПРОТРУЄННЯ ТА ПЕРЕДПОСІВНОЇ ІНОКУЛЯЦІЇ В УМОВАХ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ

В. З. Панчишин[1], Б. В. Матвійчук[2], А. А. Мелешко[3], Л. А. Журавська[4], Л. М. Безверха[5]

У статті наведені основні результати дослідження щодо вивчення впливу протруєння насіння та проведення передпосівної інокуляції на листкову поверхню рослин сої залежно від сорту, а також взаємозв'язку між масою бульбочкових бактерій і їх кількістю в умовах Полісся України. Мета дослідження полягала в порівнянні сортових особливостей сої залежно від застосованих агротехнічних заходів – протруєння насіння та передпосівної інокуляції. Матеріалом для проведення експерименту були сорти сої Ментор і Фаворит. Передпосівну інокуляцію насіння проводили препаратом РизоСтарт, протруєння – препаратом Бастіон.

[1] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: panch22@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5256-5052
[2] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: bogdanmatviychuk@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2226-814X
[3] здобувач вищої освіти першого (бакалаврського рівня)
за спеціальністю «Біологія»
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
ORCID: 0009-0008-5846-4699
[4] кандидат сільськогосподарських наук,
викладач спеціальних дисциплін кафедри агрономії та лісового господарства
(Житомирський агротехнічний фаховий коледж, м. Житомир)
e-mail: innazhuravska1@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9332-1134
[5] кандидат сільськогосподарських наук,
викладач спеціальних дисциплін кафедри агрономії та лісового господарства
(Житомирський агротехнічний фаховий коледж, м. Житомир)
e-mail: lubov_bezverxa@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2518-972x

Встановлено, що вегетаційний період сорту Ментор був на 10 днів довшим порівняно із сортом Фаворит, що безпосередньо вплинуло на показники висоти рослин і розвиток листкового апарату. Також відмічена висока пряма залежність маси зерна з рослини від кількості бульбочкових бактерій, що підкреслює важливість інокуляції насіння для підвищення продуктивності культури.

Висота рослин сої у варіанті без протруєння та інокуляції у фазу цвітіння (ВВСН 69) збільшилася на 50,7–41,0% порівняно з фазою бутонізації (ВВСН 59). За інокуляції без протруєння приріст становив 61,9–59,3%, у разі застосування протруйника без інокуляції – 60,4–42,9%. У варіантах із комбінованим використанням протруйника Бастіон та інокулянту РизоСтарт висота рослин зросла на 65,7–46,8% порівняно з контрольним варіантом, що свідчить про стимулюючий вплив обох препаратів на розвиток вегетативної маси сої.

За результатами досліджень були визначені показники площі листкової поверхні рослин сої на різних фазах розвитку культури. Окрім того, проведено аналіз вегетаційного періоду та побудовано рівняння регресії, яке відображає кореляційну залежність маси зерна з рослини від кількості бульбочкових бактерій на рослині під час фази цвітіння (ВВСН 69). Отримані результати підтверджують ефективність застосування протруйника й інокулянту для оптимізації росту, розвитку та продуктивності сої, а також демонструють значення цих агротехнічних заходів для підвищення врожайності культури в умовах Полісся України.

Ключові слова: *площа листкової поверхні, протруйник, сорт, зерно, інокуляція.*

STUDY OF THE PARAMETERS OF THE LEAF SURFACE AND THE DEPENDENCIES OF THE INDIVIDUAL PRODUCTIVITY OF SOYBEANS (GLICINE HISPIDA) DEPENDING ON VARIETY, TREATMENT AND PRE-SOWING INOCULATION IN THE POLISSYA REGION OF UKRAINE

V. Z. Panchyshyn, B. V. Matviychuk, A. A. Meleshko, I. A. Zhuravska, L. M. Bezverkha

The article presents the main results of a study on the influence of seed treatment and pre-sowing inoculation on the leaf surface area of soybean plants depending on the variety, as well as the relationship between the mass and number of nodule bacteria under the conditions of Polissia of Ukraine.

The aim of the study was to compare varietal characteristics of soybean depending on the applied agrotechnical measures – seed treatment and pre-sowing inoculation, The experimental material included soybean varieties Mentor and Favorit, Pre-sowing inoculation was carried out using the RhizoStart preparation, and seed treatment was performed with the Bastion fungicide,

It was established that the vegetation period of the Mentor variety was 10 days longer than that of the Favorit variety, which directly affected plant height and the development of the leaf apparatus, A strong positive correlation was noted between the grain mass per plant and the number of nodule bacteria, emphasizing the importance of inoculation in increasing crop productivity,

In the variant without seed treatment and inoculation, the plant height during the flowering phase (BBCH 69) increased by 50,7–41,0% compared to the budding phase (BBCH 59), In the inoculated variant without seed treatment, the increase was 61,9–59,3%, while with seed treatment only (without inoculation), the increase was 60,4–42,9%, In the combined variant using both BASTION and RhizoStart, plant height increased by 65,7–46,8% compared to the control, indicating the stimulating effect of both products on vegetative growth of soybean plants,

The study also measured leaf surface area at different growth stages, Additionally, an analysis of the vegetation period was conducted, and a regression equation was constructed to reflect the correlation between grain mass per plant and the number of nodule bacteria during the flowering phase (BBCH 69), The results confirm the effectiveness of seed treatment and inoculation in optimizing soybean growth, development, and productivity, highlighting the importance of these agrotechnical practices for improving yields of Polissia of Ukraine.

Key words: *leaf surface area, seed treatment, variety, grain, inoculation.*

Вступ

Соя посідає провідні позиції у світі за обсягами вирощування та використання серед усіх високобілкових і олійних культур. Її популярність зумовлена низкою переваг, серед яких – виняткова здатність адаптуватися до різноманітних кліматичних і ґрунтових умов, що дозволяє успішно вирощу-

вати цю культуру в багатьох регіонах світу. Завдяки своїй універсальності соя широко застосовується як у харчовій промисловості, так і у виробництві кормів, олії та переробленої продукції.

Особливо цінним є її білковий склад: соєвий білок має добре збалансований амінокислотний профіль, високі показники засвоюваності та функціональної активності, що робить його одним із найважливіших рослинних джерел білка для людини й тварин. Саме поєднання високої врожайності, поживної цінності та широких можливостей використання робить сою стратегічно важливою культурою у світовому аграрному секторі (Бабич, 1996; Mourtzinis et al., 2017).

Соя вирощується на всіх континентах світу, серед зернобобових і технічних культур вона є найбільш розповсюдженою. Ця культура має велике значення для формування зернового, продовольчого та кормового балансів. Її особливість полягає в тому, що соєвий білок, насичений незамінними амінокислотами, є значно доступнішим за вартістю порівняно з іншими джерелами: він удвічі дешевший за білок пшениці, у сім разів – за рисовий, приблизно у двадцять – за білок тваринного походження.

У складі насіння сої міститься 38–42% білка, 18–23% жиру та 25–30% вуглеводів, а також присутні ферменти, вітаміни й мінеральні елементи (Бабич, 1993).

Сучасні високопродуктивні сорти сої потребують не лише ретельного добору технологій вирощування з урахуванням гідротермічних показників, а й створення умов, які забезпечують повне розкриття їхнього біологічного потенціалу. Це є запорукою досягнення максимальної врожайності культури. Використання сучасних адаптивних технологій вирощування дає змогу отримувати стабільно високі врожаї сої, що відіграє важливу роль у розвитку галузі рослинництва (Бабич та ін., 2001).

Останніми роками створено багато сортів сої, які вирізняються невисоким ростом і швидким достиганням і є найбільш придатними для традиційного рядкового посіву з міжряддями 15 см. Такі сорти мають вертикальний тип росту, слабко розгалужуються, формують міцне потовщене стебло й за дотримання оптимальної густоти дають відносно велике насіння. Їх доцільно застосовувати як у широкорядних посівах, так і в суцільному рядковому висіві, проте за більшої густоти рослин порівняно з пізньостиглими сортами (Бахмат і Чинчик, 2010).

У нових селекційних сортах сої більшість бобів формується переважно на головному стеблі, тоді як на бічних пагонах закладається значно менша їх кількість. Така морфологічна особливість сприяє більш рівномірному достиганню рослин та полегшує механізоване збирання. Важливою перевагою цих сортів є підвищене розташування нижнього ярусу бобів, що істотно зменшує втрати під час збирання врожаю, оскільки комбайн менше зачіпає рослини біля самої поверхні ґрунту. Це дозволяє отримати чистіше та якісніше зерно, що має вагоме значення як для продовольчого, так і для кормового використання.

Продуктивність новостворених сортів значною мірою залежить від їх групи стиглості. Скоростиглі сорти здатні забезпечувати врожай на рівні 19,0–25,0 ц/га, що є оптимальним для регіонів із коротшим вегетаційним періодом або менш сприятливими кліматичними умовами. Ранньостиглі сорти демонструють вищий потенціал – 26,0–30,0 ц/га, поєднують відносно швидке достигання з підвищеною врожайністю. Найбільш продуктивними є середньостиглі сорти, які за сприятливих умов можуть формувати 35,0–40,0 ц/га, забезпечувати максимальне використання біологічного потенціалу рослин.

Використання нових високоефективних сортів сої відіграє ключову роль у підвищенні загальної врожайності культури. Їхні покращені властивості дають можливість частково компенсувати негативний вплив несприятливих ґрунтово-кліматичних умов, зменшити залежність від надмірного внесення мінеральних добрив і скоротити потребу в застосуванні засобів захисту рослин. У результаті вирощування таких сортів стає більш економічно вигідним, екологічно збалансованим і технологічно ефективним, що є важливим чинником розвитку сучасного рослинництва (Каленська та ін., 2011).

Соя є одним із найважливіших джерел рослинного білка й олії. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (далі – ФАО), добове споживання білка має становити приблизно 12% від загальної калорійності харчування, що відповідає 90–100 г білка на день, 60–70% цього обсягу рекомендується отримувати із продуктів тваринного походження. На світовому рівні питання забезпечення населення достатньою кількістю рослинного білка стає все більш нагальним. Одним з ефективних

шляхів вирішення цієї проблеми є нарощування виробництва зернобобових культур.

У сільському господарстві бобові мають особливе значення, оскільки завдяки симбіозу з бульбочковими бактеріями роду Rhizobium вони здатні фіксувати атмосферний азот і збагачувати ним ґрунт упродовж усього періоду вегетації. Це покращує родючість ґрунту, сприяє підвищенню врожайності та зменшує потребу у внесенні мінеральних азотних добрив (Надкернична та ін., 2011; Бахмат та ін., 2017).

Виробництво й використання інокулянтів є значно більш економічним, ніж внесення мінеральних добрив. Завдяки процесу біологічної фіксації азоту, який забезпечують бульбочкові бактерії, у ґрунті після вирощування бобових культур додатково залишається 0,35–0,55 ц азоту.

Соя здатна нагромаджувати після себе приблизно 0,6–1,5 ц/га біологічного азоту (60–150 кг/га), рослини наступних культур засвоюють його на 90–100%, тоді як коефіцієнт засвоєння мінеральних добрив становить лише 50–60%. Додатково соя залишає у ґрунті приблизно 0,2–0,25 ц/га фосфору (20–25 кг/га) та 0,3–0,4 ц/га калію (30–40 кг/га) (Патика та ін., 2003).

Інокуляція є обов'язковою технологічною операцією тоді, коли на полі протягом останніх 2–3 років не вирощувалися бобові культури, отже, у ґрунті бракує активних і життєздатних бульбочкових бактерій. За таких умов рослини без додаткового внесення специфічних мікроорганізмів, які містять інокулянти, не здатні повноцінно утворювати бульбочки на кореневій системі, що призводить до зниження рівня біологічної азотфіксації, отже, і врожайності.

Передпосівна обробка насіння сої бактеріальними препаратами, створеними на основі високоефективних штамів *Rhizobium*, забезпечує швидке заселення коренів корисними мікроорганізмами вже на початкових етапах розвитку рослин. У результаті формуються численні й такі, що добре функціонують, бульбочки, які активно фіксують атмосферний азот і перетворюють його на форму, доступну для живлення сої.

Саме через ці бульбочки відбувається ключовий для бобових культур процес – біологічна фіксація азоту, що дозволяє рослинам мінімізувати потребу в азотних добривах, а ґрунту – накопичувати природний азот для наступних культур у сівозміні. Отже, інокуляція стає важливим елементом ефективної та екологічно збалансованої технології вирощування сої (Щербачук та ін., 2016).

Для кожної бобової культури добирають окремий, спеціалізований штам бактерій, здатний ефективно стимулювати формування бульбочок. Зокрема, соя найкраще взаємодіє саме з азотфіксувальними бактеріями виду Bradyrhizobium japonicum, щодо яких вона проявляє особливо високу чутливість і позитивну реакцію (Гуменюк та ін., 2018).

Керівникам і спеціалістам сільськогосподарських підприємств, а також фермерам приватного сектору, які прагнуть зменшити собівартість вирощування сої та забезпечити стабільно високі врожаї, варто приділяти більше уваги препаратам на основі бульбочкових бактерій. Це особливо актуально з огляду на те, що посівні площі сої в Україні щороку збільшуються. Часто культуру висівають на нових ділянках, де у ґрунті природно відсутні специфічні бульбочкові бактерії, необхідні для її повноцінного розвитку, що зрештою позначається на кінцевих показниках урожайності (Бабич, 2003).

Низка вчених вивчала вплив фунгіцидів на площу листків, де виявлено, що максимальних значень площа листкової поверхні рослин сої в сортів Ауреліна й Амадеа досягала у фазу наливу зерна – 44,85 і 45,91 тис. м²/га відповідно. Найменші показники асиміляційної поверхні спостерігалися у фазу бутонізації – 15,10 і 15,07 тис. м²/га. Застосування фунгіцидів сприяло збільшенню площі листкової поверхні в сортів Амадеа й Ауреліна у фазу цвітіння на 0,90 і 0,94 тис. м²/га, а в період наливу зерна – на 3,11 і 3,46 тис. м²/га, порівняно з контролем. Найбільший приріст листкової поверхні зафіксовано за поєднання передпосівної обробки насіння препаратом Стандак Топ (2 л/т) з обприскуванням посівів Абакусом (2 л/га) протягом вегетації. За даними дисперсійного аналізу, визначальними чинниками формування площі листкової поверхні були сортові особливості (37,7%) та фунгіцидний захист (35,4%), тоді як їхня взаємодія становила 12,3% (Мостипан і Грабовський, 2023; Грабовський і Мостипан, 2023).

Ефективність сучасних технологій вирощування сої залежить не лише від якісного та своєчасного виконання комплексу технологічних заходів, але й від правильно обраного агротехнічного прийому. Цей технологічний захід має узгоджуватися з агро-

кліматичними умовами місцевості та враховувати специфічні властивості обраного сорту сої (Анішин та ін., 2000).

Матеріал і методи

Схему досліду було сформовано так: Фактор 1 (сорт): a) Ментор, b) Фаворит; Фактор 2 (протруєння насіння): a) без протруювання (контроль), b) передпосівне протруєння; Фактор 3 (інокуляція): a) без інокуляції, b) передпосівна інокуляція насіння.

Дослід проводили у триразовій повторності. Об'єктом вивчення була соя сортів Ментор і Фаворит.

Сорт сої Ментор. Оригінатором сорту є компанія «Євраліс Семанс» (Франція). Сорт сої Ментор рекомендовано для вирощування в умовах Степу, Лісостепу та Полісся України. Він відзначається середньоранніми строками початку цвітіння та достигання, а після повного дозрівання рослини характерно скидають листя. На стадії появи примордіальних листків гіпокотиль має антоціанове забарвлення.

У період формування бобів приблизно до середини їх достигання рослини цього сорту проявляють проміжний тип росту та формують напівстиснутий кущ. Висота рослин коливається від середньої до високої, опушення має сірий відтінок. Стебло зазвичай тонке, з помірною кількістю вузлів, не схильне до фасціації; скручування стебла або відсутнє, або виражене дуже слабо.

Такий комплекс морфологічних і фізіологічних особливостей забезпечує добру адаптивність сорту Ментор до різних агрокліматичних умов і визначає його високий потенціал урожайності (Бахмат і Бахмат, 2012).

У сорту Ментор у фазі повного цвітіння листки набувають світло-зеленого відтінку, вирізняються слабкою пухирчастістю, а центральний листочок має середні розміри та клиноподібну форму із заокругленою верхівкою. Квітки характеризуються фіолетовим забарвленням. Боби – світло-піщані, короткі, вузькі, з легким вигином.

Насіння має округло-випуклу форму, жовту оболонку та лінійний рубчик без вічка, зі специфічним смугастим рисунком навколо нього. Маса 1 000 насінин належить до дрібної фракції і коливається в межах 148,4–200,1 г. Сорт є ранньостиглим, забезпечує високий рівень врожайності та характеризується середнім умістом олії.

Сорт сої Фаворит. Оригінатором сорту є компанія "NS SEME" («НС СЕМЕ»), спільно створена Україною та Сербією. Рослини цього сорту мають гіпокотиль з антоціановим забарвленням на стадії формування примордіальних листків. Сорт характеризується дуже раннім цвітінням і дозріванням, після дозрівання листя природно опадає. Рослини належать до індетермінантного типу росту й мають напівстислу форму куща. Їхня висота варіюється від середньої до високої, а опушення – жовто-коричневе. Завивання стебла в цьому сорті відсутнє або дуже слабке. Стебло середньої товщини, з помірною кількістю вузлів, без проявів фасціації (Панасюк і Панасюк, 2016).

Листя сої сорту Фаворит у фазі повного цвітіння має помірно-зелений колір, що свідчить про оптимальний рівень хлорофілу й активну фотосинтетичну діяльність. Листова пластинка проявляє слабку пухирчастість, що забезпечує ефективний газообмін і зниження ризику розвитку грибкових захворювань. Середній листочок у цій фазі невеликий за розміром, клиноподібної форми із загостреною верхівкою, що сприяє рівномірному освітленню нижніх ярусів листя та покращує процес фотосинтезу. Квіти сорту мають фіолетове забарвлення, що є типовою ознакою сорту й полегшує його ідентифікацію в польових умовах.

Боби рослин сорту Фаворит світло-пісочного кольору, слабко вигнуті, середньої довжини та ширини. Вони характеризуються високою якістю насіння та відносною однорідністю, що є важливим для механізованого збирання та подальшої обробки. Насіння під час повної стиглості має випукло-округлу форму, жовту оболонку та темно-коричневий рубчик. Рубчик має лінійну форму з вічком і характерним смужкуватим візерунком, що є морфологічною ознакою сорту й використовується в його селекційній ідентифікації.

Маса насіння сорту Фаворит коливається в межах 131–190 г, переважно між 143,6 і 177,1 г, що відображає стабільність продуктивності сорту та його потенціал для отримання високого врожаю. Цей сорт характеризується скоростиглістю, високою продуктивністю та помірним вмістом олії в насінні, що робить його цінним для харчової та технічної переробки. Соя сорту Фаворит проявляє високу стійкість до основних грибкових і бактеріальних захворювань, як-от аскохітоз, септоріоз, фузаріоз, бактеріоз і пероноспороз. Окрім того, рослини добре протистоять виляганню, осипанню насіння та посушливим умовам, що робить сорт придатним для вирощування в різних агрокліматичних зонах.

Отже, сорт сої Фаворит поєднує в собі високу продуктивність, стійкість до хвороб і несприятливих умов зовнішнього середовища, що робить його перспективним для вирощування в різних регіонах України та для використання як у продовольчих, так і у промислових цілях.

Для підвищення схожості та захисту насіння під час проростання застосовували препарат Бастіон у нормі 1,5 л/т насіння. Обробку проводили за тиждень до посіву, що забезпечувало надійний захист від ґрунтових патогенів і шкідників. Інокуляція насіння проводилась у день посіву препаратом РизоСтарт із нормою 2,5 кг/т. Цей препарат обрали через його високу ефективність: він містить високоякісні штами бульбочкових бактерій (Bradyrhizobium elkanii, штами U1301 та U1302), які забезпечують максимальну фіксацію атмосферного азоту, покращують азотне живлення рослин і сприяють підвищенню врожайності без додаткових внесень мінеральних добрив.

Для статистичної обробки отриманих даних застосовували методи дисперсійного аналізу, що дозволили оцінити достовірність отриманих даних. Кількісні показники обробляли методами математичної статистики із застосуванням комп'ютерних програм "Microsoft Excel 2015" та "Statistica 10". Було розраховано середнє арифметичне, стандартне відхилення та показники кореляції між досліджуваними значеннями (Волкодав та ін., 2000; Ермантраут і Присяжнюк, 2007).

Площу листків сої визначали за допомогою методу «висічок» (Савченко і Кожушко, 2013).

Розрахунки здійснювалися за відповідною формулою:

$$П = \frac{Зм * П_1 * к}{Мв},$$

де: П – загальна площа листків, см^2;

Зм – загальна маса листків, г;

$П_1$ – площа однієї висічки, см^2;

к – кількість висічок, шт.

Фенологічні спостереження за ростом і розвитком рослин проводили відповідно до положень «Методики державного сортовипробування сільськогосподарських культур». Для визначення міжфазних періодів і етапів розвитку сої було використано шкалу ВВСН (Вовкодав та ін., 2000; Meier, 2001).

Висоту визначали за допомогою мірної лінійки, аналізували 10 рослин, заміри проводили у триразовому повторенні (Єщенко та ін., 2005).

Результати та їх обговорення

Ми визначили тривалість міжфазних періодів сої залежно від досліджуваних факторів. Сходи сорту Фаворит з'явилися на 14-й день після сівби, тоді як сорт Ментор – на 16-й день. Середня тривалість міжфазного періоду «сходи – бутонізація» (ВВСН 10–49) становила 20 днів для сорту Фаворит і 23 дні для Ментор. Період «цвітіння – налив зерна» (ВВСН 70–79) тривав 27–29 днів. Міжфазний період «бутонізація – цвітіння» (ВВСН 51–69) становив 3 дні незалежно від сорту. Тривалість періоду «налив зерна – повна стиглість» (ВВСН 80–99) становила 24–26 днів.

Загальна вегетація сої сорту Ментор тривала 106 днів, а сорту Фаворит – 96 днів, що на 10 днів (або 10,4%) коротше (рис. 1).

У результаті досліджень встановлено, що на контрольних ділянках без протруєння та інокуляції насіння висота рослин сої сорту Фаворит у фазу бутонізації (ВВСН 59) становила 43,0 ± 2,8 см, а сорту Ментор – 43,4 ± 3,0 см. У результаті застосування протруєння препаратом Бастіон без інокуляції висота рослин обох сортів збільшилася на 0,2 см. Отже, у фазу бутонізації (ВВСН 59) висота рослин обох сортів була приблизно на одному рівні (табл. 1).

У фазу цвітіння (ВВСН 69) рослини сорту Фаворит показали вищі показники висоти. На варіанті без інокуляції та без протруєння висота рослин сорту Фаворит перевищила сорт Ментор на 3,6 см, а за протруєння насіння препаратом Бастіон – на 7 см. На варіантах із проведенням інокуляції різниця між сортами становила 1,3–8,5 см. У фазу дозрівання (ВВСН 85) спостерігалася аналогічна тенденція: висота рослин сорту Фаворит коливалася в межах 88,9–89,6 см, що на 10,2–13,1 см більше порівняно із сортом Ментор.

Збільшення висоти рослин сої у варіанті без протруєння та інокуляції у фазу цвітіння (ВВСН 69) становило 50,7–41,0%, без протруєння із проведенням інокуляції – 61,9–59,3%, із застосуванням протруйника без інокуляції – 60,4–42,9%. Використання комбінованого варіанту із протруйником Бастіон та інокулянтом РизоСтарт забезпечило зростання висоти на 65,7–46,8% порівняно з контрольним варіантом.

У фазу дозрівання (ВВСН 85) висота рослин без протруєння та інокуляції збільшилася на 37,2–23,9%, тоді як у варіанті

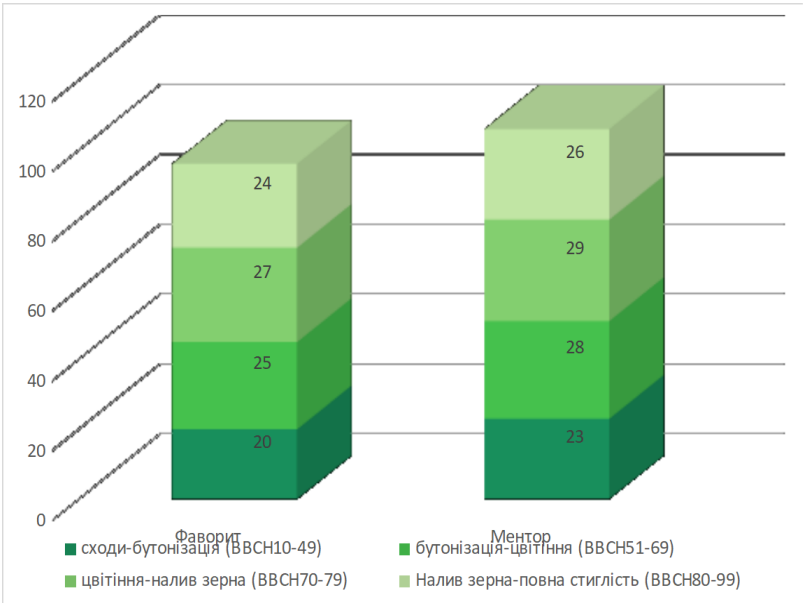


Рис. 1. Тривалість вегетаційного періоду в різних сортів сої, днів

Таблиця 1

Висота рослин сої залежно від досліджуваних факторів, см, M ± m

Сорт	Протруйник	Інокуляція	Фаза вегетації		
			бутонізація (ВВСН 59)	цвітіння (ВВСН 69)	дозрівання (ВВСН 85)
Фаворит	без протруєння	без інокуляції	43,0 ± 2,8	64,8 ± 5,3	88,9 ± 1,4
		РизоСтарт	43,3 ± 2,3	70,1 ± 2,5	89,0 ± 1,1
	Бастіон	без інокуляції	43,2 ± 2,3	69,3 ± 3,9	89,2 ± 1,4
		РизоСтарт	43,4 ± 2,1	71,9 ± 1,7	89,6 ± 1,1
Ментор	без протруєння	без інокуляції	43,4 ± 3,0	61,2 ± 5,8	75,8 ± 2,2
		РизоСтарт	43,2 ± 2,6	68,8 ± 5,4	76,5 ± 1,6
	Бастіон	без інокуляції	43,6 ± 2,8	62,3 ± 3,6	78,7 ± 1,9
		РизоСтарт	43,2 ± 2,4	63,4 ± 3,8	79,4 ± 2,0

з інокуляцією показники були значно меншими – 27,0–11,2%. За внесення протруйника без інокуляції приріст становив 28,7–26,3%, а з використанням препарату РизоСтарт – 24,6–25,2%.

У фазі цвітіння (ВВСН 69) у сорту Фаворит висота рослин без протруєння насіння з інокуляцією перевищувала висоту рослин без інокуляції на 5,3 см, а в разі застосування протруйника Бастіон ця різниця становила 2,6 см, що вказує на позитивний вплив інокуляції на ріст рослин у цій фазі. У фазу дозрівання різниця була незначною – 0,1–0,7 см. З використанням протруйника без інокуляції приріст висоти рослин у період цвітіння становив 4,5 см, а з інокуляцією – 1,8 см. У фазу дозрівання різниця між варіантами становила 0,3–0,6 см. Аналіз показав, що препарати РизоСтарт і Бастіон мають мінімальний вплив на висоту рослин сорту Фаворит.

У сорту Ментор у фазу цвітіння (ВВСН 69) без протруєння, але із проведенням інокуляції, висота рослин перевищувала варіант без інокуляції на 7,6 см, а в разі застосування протруйника ця різниця становила 1,1 см. Використання препарату Бастіон без інокуляції забезпечило приріст висоти на 1,1 см, а з інокуляцією – на 5,4 см. У фазу дозрівання показники висоти рослин варіювали в межах 2,9 см.

У результаті досліджень динаміки площі листкової поверхні сої на різних фазах росту та розвитку встановлено, що на контрольних ділянках без протруєння та інокуляції під час фази бутонізації (ВВСН 59) площа

листкової поверхні становила 357,7 см²/рослину для обох сортів. Це свідчить про стандартний рівень розвитку вегетативної маси рослин без застосування додаткових агротехнічних заходів.

У результаті застосуванні інокулянту РизоСтарт площа листкової поверхні в сорту Фаворит становила 356,7 см²/рослину, а в сорту Ментор – 347,7 см²/рослину. Незначне зменшення порівняно з контролем пояснюється специфікою впливу мікробіологічної обробки, яка стимулює не лише нарощування листкової поверхні, а й розвиток кореневої системи та накопичення асимілятів у стеблі. Використання протруйника Бастіон сприяло формуванню площі листкової поверхні в межах 360,0–348,0 см²/рослину, що свідчить про незначну стимулювальну та захисну дію препарату на молоді рослини. Комбіноване застосування протруйника й інокулянту забезпечило площу листкової поверхні 356,7 см²/рослину в сорту Фаворит та 347,7 см²/рослину в сорту Ментор, що підтверджує взаємодоповнюваний ефект цих препаратів.

У фазі цвітіння (ВВСН 69) на контрольних ділянках без обробки насіння площа листкової поверхні становила 534,3 см²/рослину в сорту Фаворит і 537,0 см²/рослину в сорту Ментор. Проведення інокуляції привело до незначного збільшення цього показника в межах 535,3–537,0 см²/рослину, що можна пояснити активізацією азотфіксувальної діяльності бульбочкових бактерій, які забезпечують кращу доступність азоту для рослин у фазу інтенсивного росту листя. Застосування протруйника Бастіон сприяло формуванню площі листкової поверхні на рівні 538,7 см²/рослину в сорту Фаворит та 536,3 см²/рослину в сорту Ментор, що відображає стимулювальний ефект на розвиток вегетативної маси за одночасного захисту рослин від патогенів. Комбіноване використання протруйника й інокулянту забезпечило площу листків 536,7 см²/рослину в сорту Фаворит і 537,0 см²/рослину в сорту Ментор, що демонструє синергетичний ефект обох препаратів на оптимізацію росту листкової поверхні.

У фазі дозрівання (ВВСН 85) спостерігалося зменшення площі листкової поверхні до 310,3–313,7 см²/рослину, що є закономірним процесом старіння листя та початку відмирання нижніх ярусів. Незважаючи на застосування препаратів Бастіон і РизоСтарт, тенденція до зменшення листкової поверхні зберігається, оскільки основна роль листя на цьому етапі розвитку – завершення фотосинтезу та перенесення накопичених асимілятів у насіння.

Отримані дані свідчать, що обробка насіння протруйником та інокулянтом загалом сприяє оптимізації росту листкової поверхні, забезпечує кращий розвиток вегетативної маси на початкових етапах росту та підтримку продуктивності рослин у фазу цвітіння. Проте у фазу дозрівання вплив препаратів стає мінімальним, оскільки процес старіння листя і природне зменшення площі листкової поверхні є біологічно запрограмованими.

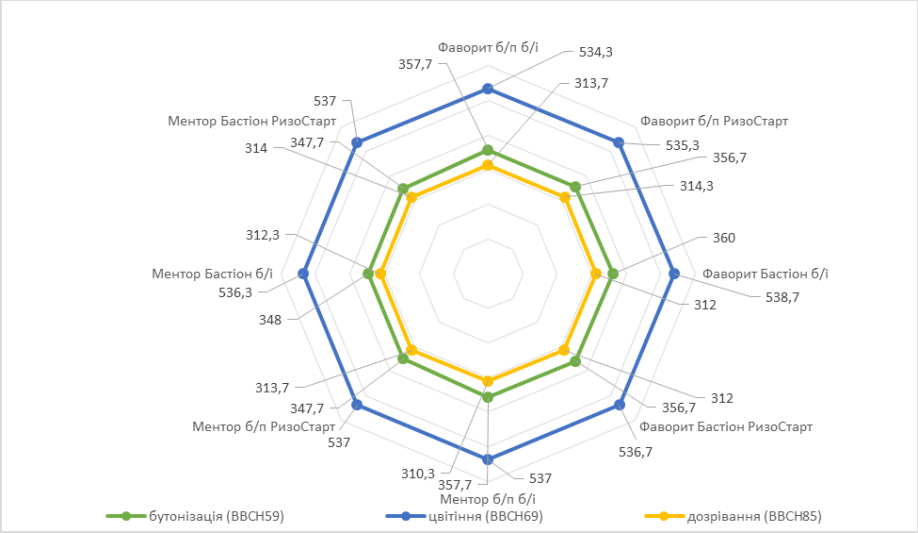


Рис. 2. Площа листкової поверхні сої за фазами росту та розвитку, см²/рослину

У разі проведення інокуляції площа листкової поверхні становила для сорту Фаворит 314,3 см²/рослину, а для сорту Ментор – 313,7 см²/рослину. У варіанті з використанням препарату Бастіон середні показники становили 312,0–312,3 см²/рослину. За комбінованого застосування обох препаратів площа листкової поверхні коливалася в межах 312,0–314,0 см²/рослину.

На основі отриманих даних було розраховано кореляційну залежність маси зерна з рослини від кількості бульбочкових бактерій на рослині у фазу цвітіння (BBCH 69) сої (рис. 3).

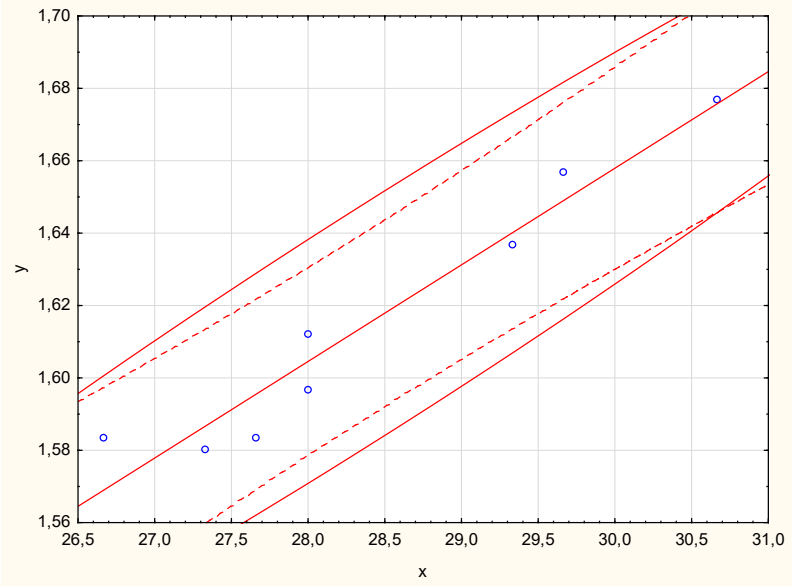


Рис. 3. Кореляційна залежність маси зерна з рослини від кількості бульбочкових бактерій на рослині під час фази цвітіння сої (BBCH 69)

На основі отриманих даних виявлено сильну пряму залежність між досліджуваними факторами (r = 0,96). Було побудовано відповідне рівняння регресії:

$$y = 0{,}8571 + 0{,}0268 * x,$$

де: y – маса зерна з рослини сої, г/рослину;

x – кількість бульбочкових бактерій на рослині, шт./рослину.

Коефіцієнт детермінації (r^2) – 0,94.

Висновки

Встановлено, що сорт Фаворит зійшов на 14-й день після сівби, а сорт Ментор – на 16-й день. Середня тривалість міжфазного періоду «сходи – бутонізація» (BBCH 10–49) становила 20 днів для сорту Фаворит і 23 дні для сорту Ментор. Період «цвітіння – налив зерна» (BBCH 70–79) тривав 27–29 днів, а міжфазний період «бутонізація – цвітіння» (BBCH 51–69) тривав три дні незалежно від сорту. Період «налив зерна – повна стиглість» (BBCH 80–99) тривав 24–26 днів.

На контрольних ділянках без протруєння та інокуляції насіння висота рослин у фазу бутонізації (BBCH 59) становила 43,0 ± 2,8 см у сорту Фаворит та 43,4 ± 3,0 см у сорту Ментор. Застосування протруйника Бастіон без інокуляції спричинило незначне збільшення висоти рослин обох сортів – на 0,2 см.

У фазу цвітіння (BBCH 69) площа листкової поверхні на контрольних ділянках без обробки насіння становила 534,3 см²/рослину в сорту Фаворит і 537,0 см²/рослину в сорту Ментор. У результаті проведення інокуляції площа листкової поверхні зросла до 535,3–537,0 см²/рослину. Використання протруйника Бастіон забезпечило площу листкової поверхні 538,7 см²/рослину в сорту Фаворит і 536,3 см²/рослину в сорту Ментор. Комбіноване застосування протруйника й інокулянту дало показники 536,7 см²/рослину в сорту Фаворит і 537,0 см²/рослину в сорту Ментор.

Список використаної літератури

Анішин Л.А., Жилкін В.О., Пономаренко С.П. Рекомендації із впровадження регуляторів росту рослин у сільськогосподарське виробництво. Київ : Високий урожай, 2000. 32 с.

Бабич А.О. Світове виробництво зернобобових культур для вирішення проблеми білка і біологічного азоту. *Оптимізація агроландшафтів: раціональне використання, рекультивація, охорона :* збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції, 2003 р. Дніпропетровськ, 2003. С. 8–12.

Бабич А.О. Світові земельні, продовольчі і кормові культури : монографія. Київ : Аграр. наука, 1996. 570 с.

Бабич А.О. Сучасне виробництво і використання сої. Київ : Урожай, 1993. 429 с.

Бабич А.О., Колісник С.І., Венедіктов О.М. Посів та захист сої від хвороб. *Пропозиція.* 2001. № 5. С. 40–42.

Бахмат М.І., Бахмат О.М. Формування сортової врожайності сої в умовах Лісостепу Західного. *Корми і кормовиробництво.* 2012. Вип. 73. С. 138–144.

Бахмат О.М., Бахмат М.І., Федорук І.В. Аграрна наука та освіта Поділля. *Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції,* 14–16 березня 2017 р., м. Кам'янець-Подільський, ПДАТУ. Тернопіль : Крок, 2017. Ч. 1. С. 59–62.

Бахмат О.М., Чинчик О.С. Агротехнічні заходи при вирощуванні сої на насіння в умовах Поділля. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва.* 2010. Вип. 74. С. 159–164.

Біологічний азот / В.П. Патика та ін. Київ : Світ, 2003. 424 с.

Волкодав В.В., Андрущенко А.В., Пількевич А.В. Методика сортовипробування сільськогосподарських культур. Київ : ДКУПВТОСР, 2000. 100 с.

Грабовський М.Б., Мостипан О.В. Економічна оцінка застосування фунгіцидного і гербіцидного захисту сортів сої різних груп стиглості. *Таврійський науковий вісник.* 2023. № 134. С. 45–53. https://doi.org 10.32782/2226-0099.2023.134.7

Гуменюк І.І., Грузінський С.Ю., Бровко І.С., Чабанюк Я.В. Коренева система сої за дії *Bradyrhizobium japonicum. Агроекологічний журнал.* 2018. № 1. С. 138–143.

Ермантраут Е.Р., Присяжнюк О.І. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті "Statistika-6" : методичні вказівки. Київ : Поліграф-Консалтинг, 2007. 55 с.

Єщенко В.О., Копитко П.Г., Опришко В.П., Костогриз П.В. Основи наукових досліджень в агрономії. Київ : Дія, 2005. 288 с.

Каленська С.М., Новицька Н.В., Андрієць Д.В. Продуктивність як інтегральний показник застосування технологічних прийомів вирощування сої на чорноземах типових. *Корми і кормовиробництво.* 2011. Вип. 69. С. 74–78.

Мостипан О.В., Грабовський М.Б. Вплив фунгіцидного захисту на формування фотосинтечних показників посівів сої. *Агробіологія.* 2023. № 2. С. 50–59. https://doi.org 10.33245/2310-9270-2023-183-2-50-59

Надкернична О.В., Ковалевські Т.М., Козар С.Ф. Особливості впливу деяких азотфіксуючих бактерій на розвиток рослин сої. *Корми і кормовиробництво.* 2001. Вип. 27. С. 112–114.

Панасюк О.Я., Панасюк Р.М. Інокуляція насіння як основний чинник підвищення врожайності зерна сої та родючості ґрунту. *Актуальні проблеми агрохімії та ґрунтознавства :* матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 18–19 лютого 2016 р. Львів, 2016. С. 299–303.

Савченко П.В., Кожушко Н.С. Методи визначення площі листкової поверхні рослини. *Вісник Сумського національного аграрного університету.* 2013. № 11(26). С. 191–195.

Щербачук В.М., Панасюк Р.М., Панасюк О.В., Лихочвор В.В. Вплив удобрення на формування фотосинтетичної та зернової продуктивності сої в умовах Західного Лісостепу. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво.* 2016. Вип. 60. С. 88–96.

Meier U. Growth Stages of Mono and Dicotyledonous Plants. *BBCH Monograph, Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry.* Bonn, 2001. 158 p.

Mourtzinis S., Marburger D., Gaska J., Diallo Th., Lauer Joe G., Conley S. Corn, soybean, and wheat yield response to crop rotation, nitrogen rates, and foliar fungicide application. *Crop Science.* 2017. № 57. P. 983–992. https://doi.org 10.2135/cropsci2016.10.0876

References

Anishyn, L.A., Zhylkin, V.O., & Ponomarenko, S.P. (2000). Rekomendatsiyi z vprovadzhennya rehulyatoriv rostu roslyn u silskohospodarske vyrobnytstvo [Recommendations for the introduction of plant growth regulators into agricultural production]. Kyiv: *Vysokyj urozhay* [in Ukrainian].

Babych, A.O. (1993). Suchasne vyrobnytstvo i vykorystannya soyi [Modern production and use of soybeans]. Kyiv: Urozhay [in Ukrainian].

Babych, A.O. (1996). Svitovi zemelni, prodovolchi i kormovi kultury : monohrafiya [World land, food and fodder crops: monograph]. Kyiv: Ahrar. Nauka [in Ukrainian].

Babych, A.O. (2003). Svitove vyrobnytstvo zernobobovykh kultur dlya vyrishennya problemy bilka i biolohichnoho azotu. Optymizatsiya ahrolandshaftiv: ratsionalne vykorystannya, rekultyvatsiya, okhorona: materialy mizhnar. nauk.-prakt. konf. [World production of leguminous crops to solve the problem of protein and biological nitrogen. Optimization of agricultural landscapes: rational use, reclamation, protection: materials of the international scientific and practical conference]. Dnipropetrovsk [in Ukrainian].

Babych, A.O., Kolisnyk, S.I., & Venediktov, O.M. (2001). Posiv ta zakhyst soyi vid khvorob [Sowing and protection of soybeans from diseases]. *Propozytsiya [Offer]*, 5, 40–42 [in Ukrainian].

Bakhmat, M.I., & Bakhmat, O.M. (2012). Formuvannya sortovoyi vrozhaynosti soyi v umovakh Lisostepu Zakhidnoho [Formation of varietal yield of soybeans in the conditions of the Western Forest-Steppe]. *Kormy i kormovyrobnytstvo [Feed and feed production],* 73, 138–144 [in Ukrainian].

Bakhmat, O., Bakhmat, M., & Fedoruk, I. (2017). Sortova produktyvnist zerna soyi v umovakh Lisostepu Zakhidnoho [Varietal productivity of soybean grain in the conditions of the Western Forest-Steppe]. *Zb. Naukovykh prats Mizhnar. nauk.-prakt. konf [Collection of Scientific Papers of the International Scientific-Practical Conference].* [in Ukrainian].

Bakhmat, O.M., & Chynchyk, O.S. (2010). Ahrotekhnichni zakhody pry vyroshchuvanni soyi na nasinnya v umovakh Podillya. Zb. naukovykh prats Umanskoho nats. universytetu sadivnytstva *[Agrotechnical measures when growing soybeans for seeds in Podillia. Collection of Scientific Works of the Uman National University of Horticulture]*, 74, 159–164 [in Ukrainian].

Volkodav, V.V., Andrushchenko, A.V., & Pilkevych, A.V. (2000). Metodyka sortovyprobuvannya s.-h. kultur [Methodology of variety testing of agricultural crops.]. Kyiv: *DKU PVTOSR* [in Ukrainian].

Hrabovskyi, M.B., & Mostypan, O.V. (2023). Ekonomichna otsinka zastosuvannia funhitsydnoho i herbitsydnoho zakhystu sortiv soi riznykh hrup styhlosti [Economic evaluation of the use of fungicide and herbicide protection of soybean varieties of different maturity groups]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk [Tavria Scientific Bulletin]*, 134, 45–53. https://doi.org 10.32782/2226-0099.2023.134.7 [in Ukrainian]

Ermantraut, E.R., & Prysyazhnyuk, O.I. (2007). Statystychnyy analiz ahronomichnykh doslidnykh danykh v paketi "Statistika-6": metod. vkazivky [Statistical analysis of agronomic research data in the package "Statistika-6": method. instructions]. Kyiv*:* Polihraf konsaltynh [Polygraph consulting]. [in Ukrainian].

Humenyuk, I.I., Hruzinskyy, C.Yu., Brovko, I.S., & Chabanyuk, Ya. (2018). Koreneva systema soyi za diyi Bradyrhizobium japonicum [The root system of soybean under the action of Bradyrhizobium japonicum]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological Journal]*, 1, 138–143 [in Ukrainian].

Kalenska, S.M., Novytska, N.V., & Andriyets, D.V. (2011). Produktyvnist yak intehralnyy pokaznyk zastosuvannya tekhnolohichnykh pryyomiv vyroshchuvannya soyi na chornozemakh typovykh. [Productivity as an integral indicator of the application of technological methods of growing soybeans on typical chernozems.]. *Kormy i kormovyrobnytstvo [Feed and feed production]*, 69, 74–78 [in Ukrainian].

Mostypan, O.V., & Hrabovskyi, M.B. (2023). Vplyv funhitsydnoho zakhystu na formuvannia fotosyntechnykh pokaznykiv posiviv soi [The influence of fungicide protection on the formation of photosynthetic indicators of soybean crops]. *Ahrobiolohiia [Agrobiology]*, 2, 50–59. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2023-183-2-50-59 [in Ukrainian].

Nadkernychna, O.V., Kovalevski, T.M., & Kozar, S.F. (2001) Osoblyvosti vplyvu deyakykh azotfiksuyuchykh bakteriy na rozvytok roslyn soyi [Peculiarities of the influence of some nitrogen-fixing bacteria on the development of soybean plants]. *Kormy i kormovyrobnytstvo [Feed and feed production]*, 27, 112–114 [in Ukrainian].

Panasyuk, O.Ya., & Panasyuk, R.M. (2016). Inokulyatsiya nasinnya yak osnovnyy chynnyk pidvyshchennya vrozhaynosti zerna soyi ta rodyuchosti gruntu. Aktualni problemy ahrokhimiyi ta gruntoznavstva: materialy mizhnar. nauk.-prakt. inter.-konf. [Seed inoculation as the main factor

in increasing soybean grain yield and soil fertility. Current problems of agrochemistry and soil science: materials of the international scientific-practical intern. conference]. Lviv. [in Ukrainian].

Patyka, V.P., Kots, S.Ya., Volkohon, V.V., & et al. (2003). Biolohichnyy azot. [Biological nitrogen] Kyiv: *Svit* [in Ukrainian].

Savchenko, P.V., & Kozhushko, N.S. (2013). Metody vyznachennya ploshchi lystkovoyi poverkhni roslyny [Methods for determining the area of the leaf surface of a plant]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu [Bulletin of Sumy National University]*, 11(26), 191–195 [in Ukrainian].

Shcherbachuk, V.M., Panasyuk, R.M., Panasyuk, O.V., & Lykhochvor, V.V. (2016). Vplyv udobrennya na formuvannya fotosyntetychnoyi ta zernovoyi produktyvnosti soyi v umovakh Zakhidnoho Lisostepu [The influence of fertilizer on the formation of photosynthetic and grain productivity of soybean in the conditions of the Western Forest-Steppe]. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnytstvo [Foothill and mountain agriculture and animal husbandry]*, 60, 88–96 [in Ukrainian].

Yeshchenko, V.O., Kopytko, P.H., Opryshko, V.P., & Kostohryz, P.V. (2005). Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomiyi [Fundamentals of Scientific Research in Agronomy]. Kyiv: Diya [in Ukrainian].

Meier, U. (2001). Growth Stages of Mono and Dicotyledonous Plants. *BBCH Monograph, Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry*. Bonn [in English].

Mourtzinis, S., Marburger, D., Gaska, J., Diallo, Th., Lauer, Joe, G., & Conley, S. (2017). Corn, soybean, and wheat yield response to crop rotation, nitrogen rates, and foliar fungicide application. *Crop Science*, 57, 983–992. https://doi.org 10.2135/cropsci2016.10.0876 [in English].

Отримано: 31.10.2025
Прийнято: 15.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 631.53.01:635.657:631.5 (477.7)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.23

УРОЖАЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ СОРТІВ СОЧЕВИЦІ ЗАЛЕЖНО ВІД ЕЛЕМЕНТІВ АГРОТЕХНОЛОГІЇ ЗА КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Л. А. Сергєєв[1], Т. Ю. Марченко[2], І. М. Когут[3], С. В. Почколіна[4], В. Д. Марченко[5]

Мета дослідження – визначити вплив гербіцидів на рівень забур'яненості посіву, площу листкової поверхні та продуктивність сортів сочевиці Антоніна, Серпанок, Даринка. Польові випро-

[1] кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник,
в.о. директора
(Одеська державна сільськогосподарська дослідна станція
Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України, смт Хліодарське)
e-mail: odsds-chlebodarskoe@ukr.net
ORCID: 0000-0003-4169-8938
[2] доктор сільськогосподарських наук, професор,
завідувач відділу селекції сільськогосподарських культур
(Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України, смт Хліодарське;
Одеський державний аграрний університет, м. Одеса)
e-mail: tmarchenko74@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6994-3443
[3] кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник,
заступник директора з наукової роботи, учений секретар
(Одеська державна сільськогосподарська дослідна станція
Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України, смт Хліодарське)
e-mail: innakogut10@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4418-5954
[4] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
завідувачка відділу агромоніторінгу та інноваційних технологій сільськогосподарських культур
(Одеська державна сільськогосподарська дослідна станція
Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України, смт Хліодарське)
e-mail: svetlanalozovsk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4369-2436
[5] студентка агрономічного факультету 3-го курсу, СПГ-23,
кафедра садово-паркового мистецтва та ландшафтного дизайну
(Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро)
e-mail: ranbom163.mail.com@gmail.com
ORCID: 0009-0009-8010-8284

бування виконано на дослідному полі Одеської державної сільськогосподарської дослідної станції Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства Національної академії аграрних наук у 2023–2025 роках з метою вдосконалення елементів агротехнології вирощування сочевиці на півдні України в умовах кліматичних змін. Дослідне поле розташоване у селищі міського типу Хліободарське Одеського району Одеської області, 46°29'5" пн. ш. 30°35'31" сх. д.

Застосування ручного прополювання – найефективніший метод для забезпечення максимальної індивідуальної продуктивності рослин сочевиці, але і найбільш затратний. Для боротьби із сегетальною рослинністю на посівах сочевиці серед варіантів внесення гербіцидів найбільш ефективним є використання суміші гербіцидів д. р. імазамокс + д. р. бентазон.

Для підвищення фотосинтетичної діяльності сортів сочевиці доцільно використовувати суміші гербіцидів д. р. імазамокс + д. р. бентазон, що забезпечує площу листкової поверхні у фазу цвітіння 31,9–32,2 тисячі м^2/га. Максимальна площа листової поверхі спостерігалась в сорту Даринка за ручного прополювання: 20,9 тисячі м^2/га (фаза гілкування) – 35,8 тисячі м^2/га (фаза цвітіння).

Максимальна врожайність насіння сочевиці сорту Даринка була отримана на експериментальних ділянках, де застосовувалися гербіциди в комбінації д. р. імазамокс + д. р. бентазон і ручна прополка. У середньому протягом років досліджень, за застосування гербіцидів у комбінації д. р. імазамокс + д. р. бентазон, показник урожайності становив 2,49 т/га, що перевищує контроль на 0,56 т/га, або на 29,11 %. Застосування окремо гербіциду д. р. імазамокс підвищило врожайність на 0,24 т/га, або на 12,4%, гербіциду д. р. бентазон – на 0,48 т/га, або на 24,8%. Максимальний рівень врожайності насіння сорту Даринка спостерігався на ділянці з ручною прополкою – 2,55 т/га, приріст урожайності – 0,62 т/га, або 32,1%.

Ключові слова: *сочевиця, сорт, насіння, гербіциди, забур'яненість посівів, площа листової поверхні, урожайність, ручне прополювання.*

YIELD POTENTIAL OF LENTIL VARIETIES DEPENDS ON AGRICULTURAL TECHNOLOGY ELEMENTS UNDER CLIMATE CHANGE

L. A. Serhieiev, T. Yu. Marchenko, I. M. Kohut, S. V. Pochkolina, V. D. Marchenko

The purpose of the study is to determine the effect of herbicides on the level of weediness of the crop, the leaf surface area and the productivity of the lentil varieties Antonina, Serpanok, Darynka. Field tests were carried out at the experimental field of the Odessa State Agricultural Experimental Station of the Institute of Climate-Oriented Agriculture of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2023–2025 in order to improve the elements of agrotechnology for growing lentils in southern Ukraine under climate change. The experimental field is located in the village of Khlibodarske, Odessa district, Odessa region, 46°29'5" N. lat. 30°35'31" E.

The use of manual weeding is the most effective method for ensuring maximum individual productivity of lentil plants, but also the most costly. To combat segetal vegetation on lentil crops, among the options for applying herbicides, the most effective is the use of a mixture of herbicides Imazamox + Bentazon.

To increase the photosynthetic activity of lentil varieties, it is advisable to use mixtures of herbicides Imazamox + Bentazone, which provides a leaf surface area in the flowering phase of 31,9–32,2 thousand m^2/ha. The maximum leaf surface area was observed in the Darynka variety during manual weeding: 20,9 thousand m^2/ha (branching phase) – 35,8 thousand m^2/ha (flowering phase). The maximum yield of lentil seeds of the Darynka variety was obtained in experimental plots where herbicides in the combination of Imazamox + Bentazone and manual weeding were used. On average, over the years of research, when herbicides in the combination of Imazamox + Bentazone were used, the yield index was 2,49 t/ha, which exceeds the control by 0,56 t/ha or 29,11%. The use of the herbicide Imazamox alone increased the yield by 0,24 t/ha or 12,4%, the herbicide Bentazon – by 0,48 t/ha or 24,8%. The maximum yield of seeds of the Darynka variety was observed on the site with manual weeding – 2,55 t/ha, the yield increase – 0,62 t/ha or 32,1%.

Key words: *lentils, variety, seeds, herbicides, weed infestation of crops, leaf surface area, yield, manual weeding.*

Вступ

Сочевиця є перспективною харчовою культурою для України. Значення її вирощування полягає не тільки у смаковій і поживній цінності для людини, а й у тому, що, як і інші зернобобові, вона слугує ефективним поліпшувачем родючості ґрунту. Щоб реалізувати її біологічний потенціал урожайно-

сті, важливо забезпечити оптимальні умови вирощування. Також не менш важливим для підвищення її продуктивності є використання гербіцидів на посівах сочевиці. Актуальність теми зумовлена недостатньою вивченістю питань системи захисту сочевиці в умовах південних регіонів України.

Незважаючи на тривалу історію вирощування сочевиці та велику кількість технологічних розробок, що пропонуються для її культивування, рівень її врожайності залишається досить низьким (Лавренко і Гридякіна, 2014; Gaur et al., 2015; Січкар та ін., 2018).

Сучасні кліматичні зміни та зростання інтересу аграріїв до вирощування і використання сочевиці на різні цілі зумовлює потребу в розробленні покращених адаптивних технологій її культивування та пошуку ефективних заходів захисту рослин за комбінування цих агротехнологічних рішень із застосуванням широкого діапазону біопрепаратів і регуляторних речовин (Sichkar et al., 2020).

На реалізацію генетичного потенціалу суттєво впливає ефективна робота фотосинтетичного апарату, оскільки у процесі фотосинтезу утворюються органічні сполуки, що становлять основу формування їхньої продуктивності (Shrestha et al., 2023).

Агрокультури мають різну площу фотосинтетичної поверхні, і цей параметр варіює в широких межах. Так, наприклад, для зернових культур оптимальна площа листкової поверхні коливається в межах 40–60 тис. м²/га (Kumar et al., 2020), а збільшення чи зменшення показника зазвичай призводить до зниження врожаю. За площі листя посівів сочевиці 30–40 тис. м²/га спостерігається зростання частки поглинутої енергії, а за подальшого підвищення листкового індексу можливе погіршення освітленості середніх і особливо нижніх ярусів листя, що може знижувати чисту продуктивність фотосинтезу (Peshuk & Prykhodko, 2023).

Розмір листя та ефективність роботи асиміляційного апарату суттєво залежать від насиченості рослин вологою та мінеральними елементами, дотримання оптимальних норм висіву, строків сівби та інших технологічних заходів (Nurbekow, 2017; Kaale et al., 2023).

Сонячна радіація вбирається всіма органами рослини, проте найактивніше – листковими пластинками. У сочевиці листки з'являються разом зі зростанням стебла й повільно розвиваються від низу вгору. Тому їх світловий режим коливається під час вегетації. Зазвичай листки поглинають приблизно 80–90% сонячної енергії, решта поглинається стеблами й іншими органами. У сочевиці, як і в деяких інших бобових культурах, частиною листків є вусики, які також беруть участь у фотосинтезі, підтримують рослини у більш випрямленому положенні, що забезпечує інтенсивніше проникнення сонячних променів у глибину посіву (Kumar et al., 2020; Silva-Perez et al., 2022).

Зміна клімату в напрямі глобального потепління та зростання посушливості змушують аграріїв розширювати площі посівів посухостійких культур. Однією з таких культур є сочевиця, яка містить значну кількість білка, мінералів і вітамінів. Збільшення площ посівів під сочевицею в Україні та вдосконалення технології її вирощування сприятиме вирішенню продовольчих, екологічних і економічних проблем, а також забезпечить стабільне постачання цінного високобілкового зерна на світовий аграрний ринок, зміцнюючи позиції України на міжнародній арені (Польовий та ін., 2023).

Розширенню посівних площ та більш повному задоволенню потреб у зерні сочевиці заважає низка причин. Серед них важливе місце належить біологічним особливостям культури – фактично необмежене часом цвітіння, низькорослість, повільний ріст на початку вегетації, що призводить до пригнічення бур'янами. Низький рівень впровадження сочевиці у виробництво зумовлений декількома причинами. Зокрема, це відсутність адаптивних технологій її вирощування та неточність наявних рекомендацій щодо вирощування сочевиці, які не повною мірою відповідають біологічним і технологічним можливостям сортів сочевиці (Sydiakina, 2024).

Тому дослідження впливу вдосконалених елементів агротехнології на врожайність інноваційних сортів сочевиці є актуальними.

Мета дослідження – визначити вплив гербіцидів на забур'яненість посіву, площу листкової поверхні та продуктивність сортів сочевиці Антоніна, Серпанок, Даринка.

Матеріал і методи

Польові дослідження проведено на дослідному полі Одеської державної сільськогосподарської дослідної станції Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства НААН у 2023–2025 рр. з метою оптимізації технології вирощування сочевиці на півдні України в умовах змін клі-

мату. Дослідне поле розташоване в смт Хліборобське Одеського району Одеської області, 46°29′5″ пн. ш. 30°35′31″ сх. д. Склад доступних макроелементів у ґрунті в роки дослідження такий: N (легкогідролізований) – 2,60 мг/100 г ґрунту (відповідно до чинного ДСТУ 7863:2015); P_2O_5 – 6,25 мг/100 г ґрунту; K_2O – 17,4 мг/100 г ґрунту (відповідно до чинного ДСТУ 4115:2002).

Діюча речовина імазамокс – мутно-білі кристали, без запаху. Розчинний у деяких органічних розчинниках. За pH = 5, 7 і 9 імазамокс стабільний до гідролізу. Гербіцид системної та ґрунтової дії, що поставляється у формі розчинного концентрату (40 г/л) У воді піддається фотолітичному розкладанню. Імазамокс має чітко виражену контактну та системну дії, селективний, абсорбується листками та корінням, може рухатись по рослині. Діюча речовина потрапляє до меристематичних тканин або ділянок росту по ксилемі і флоемі, інгібує синтез ацетолактат синтази (ALS), фермент бере участь у синтезі трьох незамінних амінокислот (валін, лейцин, ізолейцин), які необхідні для синтезу білка та ДНК, росту клітин, далі порушується синтез білка.

Дієва речовина бентазон – білі або безбарвні кристали. Стабільний за кімнатної температури до впливу розбавлених кислот і лугів (протягом 48 годин не розкладається). Готові препарати – рідини коричневого кольору, добре розчинні у воді.

Схема досліду

Засіб захисту рослин (фактор А)	Сорти (фактор В)		
Ручне прополювання	Антоніна	Серпанок	Даринка
Д. р. імазамокс			
Д. р. бентазон			
Д. р. імазамокс + д.р. бентазон			

Розмір ділянок і розташування: у масиві посіву ділянки 15 м^2 (10 х 1,5 м). Захисна смуга становить 6 м. Повторність досліду – чотириразова.

Для здійснення фенологічних спостережень, що включали встановлення часу появи таких фаз, як сходи, бутонізація, цвітіння, утворення плодів, налив зерна, фізіологічна стиглість, а також для обліку густоти рослин на етапі сходів і перед збиранням урожаю була використана «Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур (2001)» (Методика …, 2000).

Площу фотосинтезуючої поверхні сочевиці вимірювали за методикою «Прискореного визначення площі листової поверхні сільськогосподарських культур за допомогою комп'ютерної технології». Аналіз забур'яненості поля виконувався ваговим методом. Методом інфрачервоної спектроскопії згідно з ДСТУ 4117:20 проводили визначення вмісту білка в зерні. Дослідження проводили за методикою польового досліду авторства Р.А. Вожегової зі співавторами (Вожегова та ін., 2014).

Результати та їх обговорення

Розширення площ посівів і збільшення обсягів виробництва цієї бобової культури зменшить залежність від імпорту сочевиці та забезпечить стабільне постачання високобілкового зерна на внутрішній ринок. Окрім того, збільшення врожайності сочевиці підвищить прибутковість агровиробників, що позитивно вплине на економічний розвиток країни. Удосконалення технології вирощування сочевиці може стати значним кроком у розвитку сільського господарства України та забезпеченні стабільного постачання цієї цінної культури на міжнародний ринок.

В експерименті використали один із найпоширеніших на посівах зернобобових культур гербіцид з діючої речовиною бентазон (480 г/л) та діючою речовиною імазамокс (40 г/л), які використовували окремо та в сумішах.

Дослідження виявили, що обидва ці гербіциди ефективніше вносити в сумішах у половинних дозах. Тому у практичному плані суміш готували з 1,5 л/га бентазону (480 г/л) та 0,5 л/га імазамоксу (40 г/л).

Забур'яненість посівів сочевиці визначали за кількістю бур'янів, які рахували на площі 1 м^2 у чотирьох повтореннях на початку вегетації і напередодні збирання врожаю.

Результати досліджень свідчать, що посіви сочевиці мали змішаний тип забур'яненості з перевагою однорічних злакових видів, які становили 75–80% від загальної кількості. З ранніх домінували гірчак березкоподібний (*Polygonum convolvulus*), а з пізніх – мишій сизий (*Seteria glauca* L.), лобода біла (*Chenopodium album* L.), просо куряче (*Echinochlaerus-galli* L.), щириця звичайна (*Amarantus retraflexus* L.). Багаторічні кореневищні були представлені латуком

татарським (*Latuca tatarica* L.) та берізкою польовою (*Convulvulus arvensis* L.).

Співвідношення видів бур'янів в експериментальних варіантах наведено в таблиці 1.

За застосування гербіцидів з д. р. імазамокс і д. р. бентазон у чистому вигляді загальна кількість бур'янів на початку вегетації зменшилася в 6,6 і 9,7 раза відповідно, а в результаті використання їх суміші –

Таблиця 1

Вплив гербіцидів на забур'яненість посівів сочевиці, шт./м^2

Гербіцид	**Кількість бур'янів**			
	Однорічні		**Багаторічні коренепаросткові**	**Усього**
	злакові	**широколистяні**		
У фазу 5 листочків на рослинах сочевиці				
Контроль (без внесення гербіцидів)	105	54	6	165
Ручне прополювання	0	0	0	0
д. р. імазамокс	10	6	1	17
д. р. бентазон	15	8	2	25
д. р. імазамокс + д. р. бентазон	7	4	1	12
Перед збиранням				
Контроль (без внесення гербіцидів)	108	71	9	188
Ручне прополювання	0	0	0	0
д. р. імазамокс	20	8	5	33
д. р. бентазон	12	10	3	25
д. р. імазамокс + д. р. бентазон	7	2	2	11

у 13,7 раза. Перевага бакової суміші тривала і до збирання. Цей варіант найефективніше впливає на *Polygonum convolvulus*, *Amarantus retraflexus* L., *Convulvulus arvensis* L. На посівах збереглися частково рослини *Seteria glauca* L. і *Echinochlaerus-galli* L. В експериментальних варіантах не спостерігали зменшення густоти сочевиці. Після ручного прополювання контрольних ділянок сегетальна рослинність на посівах була відсутня.

Отримані дані демонструють, що засоби захисту рослин сприяли збільшенню площі листкового апарату в усіх фазах росту й розвитку рослин сочевиці (табл. 2). Протягом вегетаційного періоду рослини сортів сочевиці формували площу листкового апарату залежно від етапу розвитку. Так, поступове зростання спостерігалося до фази цвітіння, після чого показник повільно знижувався, що можна пояснити відмиранням листочків у нижніх ярусах.

Найнижчі значення площі листкової поверхні в усіх досліджуваних етапах росту й розвитку та сортах зафіксовані у варіанті контроль (без обробки гербіцидами): у фазі гілкування – 14,3–17,1 тис. м^2/га, цвітіння – 30,3–31,8 тис. м^2/га та формування бобів – 28,1–30,5 тис. м^2/га. Варто зазначити позитивний вплив засобів захисту рослин на сорти сочевиці щодо формування листкової площі, яка збільшилася на 13–32% залежно від стадії розвитку рослин.

Внесення засобів захисту рослин позитивно позначилося на темпах наростання листової поверхні. Так, залежно від варіанту внесення засобів захисту рослин спостерігалося зростання площі фотосинтетично-активної поверхні у фазі гілкування до рівня 17,6–19,2 тис. м^2/га за внесення гербіциду з д. р. імазамокс; 17,1–19,0 тис. м^2/га за внесення гербіциду з д. р. бентазон; 18,1–19,4 тис. м^2/га за внесення суміші гербіцидів з д. р. імазамокс + д. р. бентазон.

Найбільша площа листової поверхі у фазу гілкування спостерігалась за ручного прополювання – 18,3–20,9 тис. м^2/га.

У фазі цвітіння зазначені показники були на рівні 32–33,9 тис. м^2/га за внесення гербіциду з д. р. імазамокс (40 г/л), 31,9–33,5 тис. м^2/га за внесення гербіциду з д. р. бентазон (480 г/л), 32,8–34,1 тис. м^2/га за внесення суміші гербіцидів з д. р. імазамокс + д. р. бентазон.

Таблиця 2

Вплив гербіцидів на динаміку площі листової поверхні сочевиці, тис. м^2/га (середнє за 2023–2025 рр.)

Засоби захисту рослин	**Фаза розвитку рослин сочевиці**		
	Гілкування	**Цвітіння**	**формування бобів**
Сорт Антоніна			
Контроль (без обробки гербіцидами)	14,3	30,3	28,1
Ручне прополювання	18,3	33,3	32,1
д. р. імазамокс	17,6	32,0	30,8
д. р. бентазон	17,1	31,9	30,1
д. р. імазамокс + д. р. бентазон	18,1	32,8	31,9
Сорт Серпанок			
Контроль (без обробки гербіцидами)	15,7	30,5	28,9
Ручне прополювання	18,5	33,4	32,5
д. р. імазамокс	17,9	32,0	31,1
д. р. бентазон	17,6	31,9	30,8
д. р. імазамокс + д. р. бентазон	18,1	32,8	32,1
Сорт Даринка			
Контроль (без обробки гербіцидами)	17,1	31,8	30,5
Ручне прополювання	20,9	35,8	32,8
д. р. імазамокс	19,2	33,9	32,3
д. р. бентазон	19,0	33,5	31,7
д. р. імазамокс + д. р. бентазон	19,4	34,1	32,2
$НІР_{05}$, тис. м^2/га	1,77	1,31	1,28

Серед досліджуваних варіантів найбільшу площу листкового апарату виявлено за ручного прополювання – у фазу цвітіння 35,8 тис. м^2/га у сорту сочевиці Даринка.

Під час фази утворення бобів площа листкової поверхні посівів сортів сочевиці становила: 30,8–32,3 тис. м^2/га за внесення гербіциду з д. р. імазамокс; 30,1–31,7 тис. м^2/га за внесення гербіциду з д. р. бентазон; 31,9–32,2 тис. м^2/га за внесення суміші гербіцидів з д. р. імазамокс + д. р. бентазон.

Максимальна площа листової поверхі у фазу утворення бобів спостерігалась за ручного прополювання – 31,9–32,2 тис. м^2/га.

Максимальна площа листової поверхі спостерігалась у сорту Даринка за ручного прополювання: 20,9 тис. м^2/га (фаза гілкування) – 35,8 тис. м^2/га (фаза цвітіння).

Удосконалення технології вирощування сочевиці в Україні дозволить підвищити рівень врожайності та покращити показники якості зерна, особливо на основі принципів ресурсозбереження, що буде досить важливим у повоєнний період відновлення України.

У роки досліджень спостерігали досить посушливі умови, тому врожайність сочевиці виявилась невисокою. У всіх трьох сортів сочевиці у варіанті із внесенням суміші д. р. імазамокс + д. р. бентазон та за ручного прополювання була зафіксована найбільша врожайність (табл. 3).

Найвища врожайність насіння сочевиці сорту Даринка була отримана на дослідних ділянках, де застосовувалися хімічні засоби в суміші д. р. імазамокс + д. р. бентазон та проводилось ручне прополювання. У середньому за роки досліджень урожайності сорту Даринка становила 2,49 т/га, що перевищує контрольну умову на 0,56 т/га, або на 29,11%. Окреме використання гербіциду Імазамокс підвищило врожайність на 0,24 т/га, або на 12,4%, а гербіциду Бентазон – на 0,48 т/га, або на 24,8 %. Найвищий рівень врожайності насіння сорту Даринка спостерігався на ділянці з ручним прополюванням – 2,55 т/га, зростання врожайності – 0,62 т/га, або 32,1%. Проте така врожайність не забезпечувала високої прибутковості виробництва через значні матеріальні витрати на подвійне ручне прополювання.

Найвища врожайність насіння сочевиці сорту Антоніна була отримана на експериментальних ділянках, де застосовувались гербіциди в суміші д. р. імазамокс + д. р. бентазон і здійснювалось ручне прополю-

Таблиця 3

Вплив гербіцидів на врожайність насіння сортів сочевиці, т/га
(середнє за 2023–2025 рр.)

Засоби захисту рослин	**Сорти**		
	Антоніна	**Серпанок**	**Даринка**
Контроль (без обробки гербіцидами)	1,17	1,64	1,93
Ручне прополювання	2,02	2,21	2,55
д. р. імазамокс	1,33	1,76	2,17
д. р. бентазон	1,50	1,94	2,41
д. р. імазамокс + д. р. бентазон	1,64	2,09	2,49
$НІР_{05}$, т/га	0,069	0,110	0,132

вання. У середньому протягом досліджуваних років величина врожайності за застосування гербіцидів в суміші д. р. імазамокс + д. р. бентазон становила 1,64 т/га, що перевищує контрольний варіант на 0,47 т/га, або на 40,2%. Окреме використання гербіциду з д. р. імазамокс підвищило врожайність на 0,16 т, або на 13,6%, застосування гербіциду з д. р. бентазон – на 0,33 т, або на 28,2%. Найвища врожайність насіння сочевиці сорту Антоніна спостерігалась за ручного прополювання – 2,02 т/га, що більше контрольного варіанту на 0,85 т/га, або на 72,6%.

Максимальна врожайність рослини сочевиці сорту Серпанок була отримана на експериментальних ділянках, де застосовувалося внесення суміші д. р. імазамокс + д. р. бентазон та ручне прополювання. У середньому за роки досліджень значення врожайності за застосування препаратів у суміші д. р. імазамокс + д. р. бентазон – 2,09 т/га, що перевищує контрольну ділянку на 0,45 т/га, або на 27,4%. Окреме внесення гербіциду з д. р. імазамокс підвищило врожайність на 0,12 т/га, або на 7,3%, а внесення гербіциду з д. р. бентазон – на 0,30 т/га, або на 18,3 %. Найвища врожайність сорту Серпанок була зафіксована за ручного прополювання – 2,21 т/га, що більше контрольної ділянки на 0,57 т/га, або на 34,7%.

Отримані результати досліджень виявили, що оптимальні умови для досягнення максимальної індивідуальної продуктивності рослин сочевиці сортів Даринка, Антоніна та Серпанок включають застосування гербіцидів у суміші д. р. імазамокс + д. р. бентазон і ручного прополювання.

Висновки

1. Застосування ручного прополювання є найефективнішим методом для досягнення максимальної продуктивності рослин сочевиці, проте й найдорожчим. З метою боротьби із сегетальною рослинністю в посівах сочевиці серед варіантів внесення гербіцидів найефективнішою є суміш гербіцидів із д. р. імазамокс + д. р. бентазон.

2. З метою підвищення фотосинтетичної активності сортів сочевиці доцільно застосовувати комбінацію гербіцидів із д. р. імазамокс + д. р. бентазон, що забезпечує площу листкової поверхні у фазі цвітіння 31,9–32,2 тис. м²/га. Найвища площа листкової поверхні була зафіксована у сорту Даринка за ручного прополювання: 20,9 тис. м²/га (фаза гілкування) – 35,8 тис. м²/га (фаза цвітіння).

3. Максимальна врожайність насіння сочевиці сорту Даринка була досягнута на експериментальних ділянках, де застосовували гербіциди в комбінації д. р. імазамокс + д. р. бентазон та проводилося ручне прополювання. У середньому за роки досліджень за застосування гербіцидів у суміші д. р. імазамокс + д. р. бентазон показник урожайності становив 2,49 т/га, що перевищує контрольний варіант на 0,56 т/га, або на 29,11%. Окреме застосування гербіциду з д. р. імазамокс підвищило врожайність на 0,24 т/га, або на 12,4%, застосування гербіциду з д. р. бентазон підвищило врожайність на 0,48 т/га, або на 24,8%. Найвищий рівень врожайності насіння сорту Даринка виявлявся на ділянці з ручним прополюванням – 2,55 т/га, приріст урожайності – 0,62 т/га, або 32,1%.

Список використаної літератури

Вожегова Р.А., Лавриненко Ю.О., Малярчук М.П. Методика польових і лабораторних досліджень на зрошуваних землях. Херсон : Д.С. Грінь, 2014. 286 с.

ДСТУ 7863:2015 Якість ґрунту. Визначення легкогідролізного азоту методом Корнфілда. [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=62745 (дата звернення: 02.10.2025)

ДСТУ 4115-2002 Ґрунти. Визначання рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова. [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58863 (дата звернення: 05.10.2025)

ДСТУ 4117:2007 Зерно та продукти його переробки. Визначення показників якості методом інфрачервоної спектроскопії. [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=85620 (дата звернення: 02.10.2025)

Лавренко С.О. Гридякіна О.М. Урожайність зерна та ефективність використання вологи рослинами сочевиці залежно від строків сівби в умовах півдня України. *Шляхи підвищення ефективності зрошуваного землеробства.* 2014. № 56–2. С. 31–36.

Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур. Вип. 1. Загальна частина / ред. : В.В. Волкодав ; Держ. коміс. України з випробування та охорони сортів рослин. Київ, 2000. 100 с.

Січкар В.І., Орехівський В.Д., Кривенко А.І., Маматов М.О., Соломонов Р.В. Особливості біології розвитку сочевиці. *Вісник Харківського національного аграрного університету.* Серія «Рослинництво, селекція і насінництво, плодоовочівництво і зберігання». 2018. Вип. 1. С. 190–202.

Польовий А.М., Божко Л.Ю., Барсукова О.А., Гончар К.В. Вплив змін клімату на формування врожаю сочевиці в Південному Степу України. *Зелене повоєнне відновлення продовольчих систем в Україні :* збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 26 січня 2023 р. Одеса, 2023. С. 76–83.

Gaur P.M., Samineni S., Krishnamurthy L., Kumar S., Ghanem M.E., Beebe S., Rao I., Chaturvedi S.K., Basu P.S., Nayyar H. High temperature tolerance in grain legumes. *Legume Perspect.* 2015. Vol. 7. P. 23–24.

Kaale L.D., Siddiq M., Hooper S. Lentil (Lens culinaris Medik) as nutrient'rich and versatile food legume: A review. *Legume Science.* 2023. Vol. 5(2). P. 169.

Kumar J., Gupta D.S., Tiwari P. Lentil Breeding in Genomic Era: Present Status and Future Prospects. *Accelerated Plant Breeding; Food Legumes.* Cham, Switzerland : Springer, 2020. Vol. 3. P. 193–209.

Nurbekow R. Kazakhstan intends to become world's fourth largest lentils exporter. Kazinform. Intern. News Agancy. 12 September 2017. [Електронний ресурс]. URL: https://www.inform.kz/en/kazakhstan-intends-to-become-world-s-fourth-largest-lentils-exporter-a3064034 (дата звернення 01.09.2025).

Peshuk L.V., Prykhodko D.Y. New technologies. artificial meat as a new source of protein products in the nutrition of modern people. *Journal of Chemistry and Technologies.* 2023. Vol. 31. № 3. P. 611–626. https://doi.org/10.15421/jchemtech. v31i3.288736

Sichkar V.I., Kryvenko A.I., Solomonov R.V. Lantil in world and Ukraine: current state and prospect. *Journal of Native and Alien Plant Studies.* 2020. Vol. 16. P. 178–193.

Silva-Perez V., Shunmugam A.S.K., Rao S., Cossani C.M., Tefera A.T., Fitzgerald G.J., Armstrong R., Rosewarne G.M. Breeding has selected for architectural and photosynthetic traits in lentils. *Frontiers in Plant Science.* 2022. Vol. 13. P. e925987.

Shrestha S., van't Hag L., Haritos V.S., Dhital S. Lentil and Mungbean protein isolates: Processing, functional properties, and potential food applications. *Food hydrocolloids.* 2023. Vol. 135. P. 108142.

Sydiakina O.V. Current state and prospects of lentil production. *Таврійський науковий вісник.* 2024. № 137. С. 214–223. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.27

References

Vozhegova, R.A. (ed.) (2014). Metodyka polovykh i laboratornykh doslidzhen na zroshuvanykh zemliakh: monohrafiia [Methodology of field and laboratory research on irrigated lands: monograph]. Kherson : Hrin D.S. [in Ukrainian].

DSTU 7863:2015 Yakist gruntu. Vyznachennia lehkohidroliznoho azotu metodom Kornfilda [Electronic resource] URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=62745 (access date 02.10.2025) [in Ukrainian].

DSTU 4115-2002 Grunty. Vyznachannia rukhomykh spoluk fosforu i kaliiu za modyfikovanym metodom Chyrykova [Electronic resource] URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58863 (access date 05.10.2025) [in Ukrainian].

DSTU 4117:2007 Zerno ta produkty yoho pererobky. Vyznachennia pokaznykiv yakosti metodom infrachervonoi spektroskopii [Electronic resource] URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=85620 (access date 02.10.2025) [in Ukrainian].

Lavrenko, S.O., & Hrydiakina, O.M. (2014). Vrozhainist zerna ta efektyvnist vykorystannia volohy roslynamy sochevytsi zalezhno vid strokiv sivby v umovakh pivdnia Ukrainy [Grain yield and efficiency of moisture use by lentil plants depending on sowing dates in the conditions of southern Ukraine Grain yield and efficiency of moisture use by lentil plants depending on sowing dates in the conditions of southern Ukraine]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti zroshuvanoho zemlerobstva [Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture],* 56–2, 31–36 [in Ukrainian].

Metodyka derzhavnoho sortovyprobuvannia silskohospodarskykh kultur [Methodology of state variety testing of agricultural crops]. (2000) Vyp 1. Ukrainy po vyprobuvanniu ta okhoroni sortiv roslyn [State Commission of Ukraine for Testing and Protection of Plant Varieties] [in Ukrainian].

Sichkar, V. (2004). Urozhainist sortiv soi v sukhodolnykh umovakh Stepu Ukrainy [Yield of soybean varieties in dryland conditions of the Ukrainian Steppe]. *Proposal [Propozytsiia]*, 2, 40 [in Ukrainian].

Sichkar, V.I., (ed.). (2018). Osoblyvosti biolohii rozvytku sochevytsi [Peculiarities of the biology of lentil development]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu Seriia "Roslynnytstvo, selektsiia i nasinnytstvo, plodoovochivnytstvo i zberihannia" [Bulletin of the Kharkiv National Agrarian University Series "Plant growing, selection and seed production, fruit and vegetable growing and storage"]*, 1, 190–202 [in Ukrainian].

Polovyi, A.M. (ed.). (2023). Vplyv zmin klimatu na formuvannia vrozhaiu sochevytsi v Pivdennomu Stepu Ukrainy [The impact of climate change on the formation of lentil harvests in the Southern Steppe of Ukraine]. *Zelene povoienne vidnovlennia prodovolchykh system v Ukraini: zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. m. Odesa, 26 sichnia [Green post-war restoration of food systems in Ukraine: collection of materials of the International Scientific and Practical Conference. Odessa, January 26],* 76–83 [in Ukrainian].

Gaur, P.M. (ed.). (2015). High temperature tolerance in grain legumes. *Legume Perspect*, 7, 23–24 [in English].

Kaale, L.D. (ed.). (2023). Lentil (Lens culinaris Medik) as nutrient'rich and versatile food legume: A review. *Legume Science*, 5(2), e169 [in English].

Kumar, J. (ed.). (2020). Lentil Breeding in Genomic Era: Present Status and Future Prospects. *In Accelerated Plant Breeding; Food Legumes; Springer: Cham, Switzerland*, 3, 193–209 [in English].

Nurbekow, R. (2017). Kazakhstan intends to become world's fourth largest lentils exporter. Kazinform. Intern. News Agancy. 12 September [Electronic resource] URL: https://www.inform.kz/en/kazakhstan-intends-to-become-world-s-fourth-largest-lentils-exporter-a3064034 (access date 01.09.2025) [in English].

Peshuk, L.V., & Prykhodko, D.Y. (2023). New technologies. artificial meat as a new source of protein products in the nutrition of modern people. *Journal of Chemistry and Technologies,* 31(3), 611–626. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.288736 [in English].

Sichkar, V.I. (ed.). (2020). Lantil in world and Ukraine: current state and prospect. *Journal of Native and Alien Plant Studies*, 16, 178–193 [in English].

Silva-Perez, V. (ed.). (2022). Breeding has selected for architectural and photosynthetic traits in lentils. *Frontiers in Plant Science*, 13, e925987 [in English].

Shrestha, S. (ed.). (2023). Lentil and Mungbean protein isolates: Processing, functional properties, and potential food applications. *Food hydrocolloids*, 135, 108142 [in English].

Sydiakina, O.V. (2024). Current state and prospects of lentil production. *Tavriiskyi naukovyi visnyk [Tavria Scientific Bulletin]*, 137, 214–223. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.27 [in English].

Отримано: 10.10.2025
Прийнято: 03.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 635.15:631.5
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.24

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ГОЛОВНИХ КОМПОНЕНТ ВПЛИВУ ТРИВАЛОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ ЯК ПРОМІЖНОГО СИДЕРАТУ НА ІНДЕКС ЯКОСТІ ҐРУНТУ

Я. Г. Цицюра[1]

Обґрунтовано ефективність та значимість застосування систематичної сидерації для забезпечення процесів ґрунтореабілітації та зниження деградації ґрунтового покриву в активному шарі ґрунтового профілю 0–30 см.

Мета досліджень передбачала тривале оцінювання рівня ефективності використання редьки олійної як сидерату у варіанті проміжного (літнього) її використання з періодичністю раз на два роки в сівозміні із загальним циклом досліджень 12 років.

За тривалий період польових досліджень (2014–2025 роки) проведено комплексне оцінювання впливу використання сидеральної надземної та кореневої біомаси редьки олійної на формування агрохімічних, агрофізичних і гідрологічних ознак і властивостей у зіставленні із сумісним динамічним контролем з тим же набором культур у сівозміні без застосування сидерації та будь-якого додаткового застосованого удобрення.

За результатами визначення основних властивостей і режимів сірого лісового ґрунту доведена ефективність біоорганічного сидерального проміжного удобрення основних культур у сівозміні з періодичністю раз на два роки за використання одновидових сидеральних агрофітоценозів редьки олійної (Raphanus sativus L. var. oleiformis Pers.) під культури нехрестоцвітої групи за загортання сидеральної маси на глибину 14–16 см у фазу цвітіння культури. Така система удобрення дозволила за 12-тирічний цикл застосування забезпечити в шарі ґрунту 0–30 см середньорічні темпи динаміки таких показників, як: вміст гумусу – +0,0024%/рік, щільність ґрунту – −0,017 г/см^3 на рік, щільність складення ґрунту – −0,014 г/см^3 на рік, твердість ґрунту – −0,296 кг/см^2, загальна пористість – +0,570%/рік, капілярна пористість – +0,252%/рік, некапілярна пористість – +0,319%/рік, пористість аерації ґрунту – +0,393%/рік, водоутримувальна здатність – +0,422%/рік, pH – +0,021 на рік, органічний вуглець – +0,0024%/рік, загальний азот – +0,001%/рік, співвідношення C/N – 0,008 на рік, легкогідролізований азот – +0,897 мг/кг на рік, рухомий фосфор – +1,092 мг/кг на рік, обмінний калій – +1,242 мг/кг на рік, у підсумку забезпечити середній індекс якості ґрунту (SOI) у значенні 0,657 проти 0,460 на вихідному контролі на початку проведення досліду.

Ключові слова: *сидеральний потенціал, біопродуктивність, агрохімічні властивості ґрунтів, агрофізичні властивості ґрунтів, гідрологічні константи ґрунту, індекс якості ґрунту.*

[1] кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: yaroslavtsytsyura@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9167-833X

SYSTEM ANALYSIS OF THE MAIN COMPONENTS OF THE IMPACT OF LONG-TERM USE OF OILSEED RADISH AS AN INTERMEDIATE GREEN MANURE ON THE SOIL QUALITY INDEX

Ya. G. Tsytsiura

The study substantiates the effectiveness and significance of systematic green manuring in ensuring soil rehabilitation processes and reducing soil degradation within the active 0–30 cm layer of the soil profile. The aim of the research was to perform a long-term evaluation of the efficiency of using oilseed radish as a green manure crop in an intermediate (summer) application, with a recurrence once every two years in crop rotation, within a total 12-year experimental cycle.

During the long-term field experiment (2014–2025), a comprehensive assessment was conducted on the use of the aboveground and root biomass of oilseed radish for improving agrochemical, agrophysical, and hydrological soil properties, compared to a control rotation with the same crop set but without green manuring or any additional fertilization.

The results of the analysis of the main properties and regimes of grey forest soils demonstrated the efficiency of bio-organic intermediate green manuring applied once every two years using monoculture green manure agrocenoses of oilseed radish (Raphanus sativus L. var. oleiformis Pers.) under non-Brassicaceae crops. The incorporation of green biomass at a depth of 14–16 cm during the flowering stage contributed to the following average annual dynamics within the 0–30 cm soil layer over the 12-year period: humus content – +0,0024%/year, soil bulk density – −0,017 g/cm³ per year, soil packing density – −0,014 g/cm³ per year, soil hardness – −0,296 kg/cm² per year, total porosity – +0,570%/year, capillary porosity – +0,252%/year, non-capillary porosity – +0,319%/year, soil aeration porosity – +0,393%/year, water-holding capacity – +0,422%/year, pH –+0,021 per year, organic carbon – +0,0024%/year, total nitrogen – +0,001%/year, C/N ratio – +0,008 per year, easily hydrolyzable nitrogen – +0,897 mg/kg per year, available phosphorus – +1,092 mg/kg per year, and exchangeable potassium – +1,242 mg/kg per year.

As a result, the mean Soil Quality Index (SOI) reached 0,657 compared to 0.460 in the baseline control at the beginning of the experiment.

Key words: *green manure potential, biological productivity, agrochemical soil properties, agrophysical soil properties, hydrological soil constants, soil quality index.*

Вступ

Сидерація розглядається як комплексна оптимізуюча біоорганічна система утримання ґрунту й удобрення, яка ставить за мету максимальну позитивну імітацію природних процесів акумуляції органічного вуглецю та досягнення цим загального поліпшення комплексу властивостей ґрунту (Lim et al., 2012; Dey & Nath, 2015; Abdulraheem & Tobe, 2022; Ansari et al., 2022).

Формування позитивних результатів сидерації має поліфакторну основу й залежить від чинників гідротермічних умов території, видових адаптивних властивостей рослини-сидерату та біохімічного складу її листостеблової та кореневої маси, а також від технології самої сидерації (Clark, 2008; Florentín et al., 2010; Hansen et al., 2021). Важливим у цьому плані є також стан ґрунтового профілю, розвинутість відповідних ґрунтових режимів з позиції оптимальності та доцільності, а також характер інтенсивності переважання процесів аеробної акумуляції над процесами інтенсивної мінералізації та анаеробної ферментації – основних результуючих чинників, які визначають позитивно-динамічне гумусонакопичення (De Willigen et al., 2008; Das et al., 2020; Kucerik et al., 2024).

З позиції дослідження сидерації доцільним є вивчення позитивного її впливу на ґрунти не в розрізі окремих ознак і властивостей ґрунту, а в застосуванні комплексного підходу, який передбачає вивчення спряжених системних ознак і властивостей, які в кінцевому варіанті дії визначають формування ґрунтових режимів, оптимізованих для реабілітації ґрунтів, зниження внутрішньопрофільної ґрунтової деградації та гарантування відновлення потенціалу ґрунтової родючості (Deus et al., 2022; Lei et al., 2022; Indoria et al., 2025).

Важливим, з позиції ефективних сидеральних технологій, є підбір відповідного виду сидерату, який, з одного боку, є адаптованим до умов його прямого сидерального використання, а з іншого – сприяє отриманню позитивного ефекту від застосування в найбільш доступному короткочасному періоді (Li et al., 2019; Naz et al., 2023; Israt & Parimal, 2023).

Серед понад 60 видів рослин-сидератів найбільш широкого застосування набули бобові та хрестоцвіті види, які поєднують позитивні риси високого вмісту білкових і азотистих сполук, що гарантує оптимізований параметр співвідношення C/N для формування оптимальної динаміки розкладення сидеральної маси у ґрунті з переважанням процесів акумуляції, а також володіють комплексом цінного портфоліо біохімічного складу за ознаками зольності та структурованості, співвідношення макро- та мікроелементів (Silva et al., 2008; Liu et al., 2020; Singh et al., 2023).

Варто також ураховувати додатковий позитивний вплив підібраного сидерату на комплекс властивостей ґрунту завдяки розвитку визначеної морфометрії кореневих систем, формуванню відповідної ризосфери та сприянню зміні мікробіологічного потенціалу ґрунту з огляду на можливий варіант симбіотичної та синергічної взаємодії з окремими групами ґрунтових мікроорганізмів (Toungos & Bulus, 2019; Suon et al., 2023; Xu et al., 2023; Tsytsiura, 2024a; Wang et al., 2024).

Відмічено необхідність оцінювання біопродуктивного потенціалу рослини-сидерату з огляду на лімітацію гідротермічних ресурсів території, толерантність до строків сівби та сидерального використання, біологічні особливості культури у варіантах проміжного використання в літньо-осінній період (Ma et al., 2020; Rani et al., 2021; Yadav et al., 2021; Zhang et al., 2025).

З позиції вищеокреслених чинників редька олійна, відповідно до тривалого вивчення в умовах нестійкого зволоження на ґрунтах низького та середнього потенціалу родючості, зарекомендувала себе як ефективний кандидат до застосування в сидеральних технологіях за основного і проміжного терміну використання в сівозмінах різної ротації за допустимого її насичення іншими видами хрестоцвітих сільськогосподарських культур (Tsytsiura, 2024b). Цінним також є збереження принципів мультифункціональності з позиції як потенційних можливостей застосування сформованої надземної та кореневої біомаси, так і напряму та характеру впливу на ґрунтовий профіль з можливим пролонгуючим і стійким позитивним характером впливу (Tsytsiura, 2025).

Маловивченим питанням є дослідження ефективності систематичного сидерального застосування редьки олійної на тому самому полі за відповідного циклу використання щодо формування комплексу агрофізичних, агрохімічних і гідрологічних властивостей ґрунту в період відповідної ротації дослідної сівозміни без включення хрестоцвітих видів рослин, що й стало метою проведених тривалих досліджень на сірих лісових ґрунтах в умовах нестійкого зволоження в рамках виконання етапів державної тематики «Розробка екологоорієнтованих технологій вирощування біоенергетичних культур для забезпечення енергонезалежності та ґрунтозбереження задля формування кліматичної нейтральності» (№ держреєстрації 0124U000483).

Матеріал і методи

Місце проведення досліджень відповідало зоні північної підпровінції правобережної центальної високої провінції (агроґрунтове шифрування $ЛС2_1$) з повним циклом у 12 років (2014–2025 рр.) у межах дослідного поля Вінницького національного аграрного університету (місце локації N 49°11′31″, E 28°22′16″), на сірих лісових ґрунтах. Показники агрохімічної забезпеченості ґрунтового покриву відповідали середньому потенціалу із вмістом гумусу на рівні 2,68%, легкогідролізованого азоту 81,5 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору 176,1 мг/кг ґрунту, обмінного калію 110,8 мг/кг ґрунту, pH_{KCl} 5,8.

Схема досліду включала багатофакторну схему вивчення систематичного застосування проміжної літньої сидерації за використання редьки олійної в сівозмінах без наявності інших видів хрестоцвітих культур. Дослідження проводились за відсутності будь-якого додаткового застосування мінеральних добрив за винятком власне сидерації під такі культури та роки в таких ланках сіозміни: сорго зернове (2014 р.) – горох (2016 р.) – соя (2018 р.) – соняшник (2020 р.) – нут (2022 р.) – кукурудза на зерно (2024 р.). Загальна схема сівозміни в досліді за період оцінювання: сорго зернове (після гороху) – ярий ячмінь – горох – ярий ячмінь – соя – яра пшениця – соняшник – озимий горох – нут – ярий ячмінь – кукурудза на зерно.

Облік показників було проведено у три часові інтервали за загальний період досліду, у 2014 р. – на початку проведення досліду, проміжний етап – 2019 р., заключний етап – 2025 р. (навесні до посіву відповідної культури згідно зі схемою чергування). Схема досліду представлена в таблиці 1.

Облікова площа індикації ґрунтових показників 25 м^2 за чотириразового пов-

торення. Редька олійна була представлена сортом кмбінованого використання Журавкою за сидерельного способу формування агроценозу редьки олійної – кількісна норма висіву 2,5 млн схожих насінин/га з міжряддям 15 см за комбінованого обробітку ґрунту після збору попередника на глибину 12–16 см. Сидеральне загортання листостеблової маси редьки олійної на глибину 14–16 см (із застосуванням важких дискових борін БДН-2,4) було проведено за досягнення рослинами фенологічної фази цвітіння за попереднього підкошування листостеблової маси сидерату з подрібненням.

Облік надземної продуктивності сидерату проводили методом обікових ділянок (1 м^2 по 4 ділянки для кожного повторення) шляхом прямого зважування після видалення сторонніх іншовидових рослинних домішок. Облік сформованої кореневої біомаси проводили із застосуванням методу мікромонолітів, що адаптований для сидеральних агроценозів редьки олійної (Tsytsiura, 2024b; Tsytsiura, 2025). Переведення сфомованої надземної та кореневої біомаси проводили на підставі висушування до постійної ваги (стандртний режим t = 105 ℃, подальшого озолення за t = 550 ℃).

Еквівалетне переведення сформованої загальної біомаси рослин у формат класичного органічного добрива тваринного походження здійснено згідно із тривалим біохімічним оцінюванням рослин редьки олійної (Tsytsiura, 2024b) та рекомендаціями щодо еталонних параметрів видів органіки (Brown, 2021; Composts & Fertilizers, 2023).

Відбір зразків ґрунту для формування індикаційних показників його властивостей проводили з інтервалом у 10 см на глибину до 30 см, із застосуванням стандартних рекомендованих способів (Carter & Gregorich, 2008).

Щільність ґрунту (ЩГ, г/см^3) була визначена на підставі гравіметричного методу за використання циліндрів Копецького в результуючому виразі відношення маси сухого ґрунту до його об'єму (Borek, 2019). Щільність складення ґрунту (ЩСГ, г/см^3) визначали відповідно до європейського протоколу (ASTM-D854, 2010 р.).

Твердість ґрунту (ТГ, кг/см^2) визначали за використання пенетрометра "Walcom FM-204TR" з обліком середнього для п'яти визначень з кожного горизонту в кожному повторенні варіантів досліду.

Капілярну пористість ґрунту ($P_к$, %), некапілярну пористість ґрунту ($P_{нк}$, %) та пористість аерації ($P_а$, %) визначали стандартними лаборторно-розрахунковими методами (Spasić et al., 2023). Загальну пористість ґрунту ($P_з$, %) калькулювали як загальну суму $P_к$ та $P_{нк}$.

Таблиця 1

Загальна схема досліду вивчення впливу систематичної сидерації за викристання редьки олійної на інтегральні показники якості ґрунту

Назва варіанту	**Технологічний зміст варіанту**
Абсолютний контроль	Відбір зразків ґрунту з ділянок на комплексний аналіз до початку проведення досліду (базові вихідні параметри досліду)
Контроль I	Вирощування культур на ділянках без сидерації з таким чергуваням: сорго зернове (2014 р.) – ярий ячмінь (2015 р.) – горох (2016 р.) – ярий ячмінь (2017 р.) – соя (2018 р.)
Сидерація I	Таке саме чергування культур на ділянці, що й у варіанті Контроль I, із застосуванням сидерації під такі культури: сорго зернове (2014 р.) – горох (2016 р.) – сою (2018 р.)
Рубіжний контроль показників ґрунту для варіантів Контроль I та Сидерація I у 2019 р. до посіву основної культури	
Контроль II	Вирощування культур на ділянках без сидерації з таким чергуваням (продовження варіанту Контроль I): яра пшениця (2019 р.) – соняшник (2020 р.) – озимий горох (2021 р.) – нут (2022 р.) – ярий ячмінь (2023 р.) – кукурудза на зерно (2024 р.)
Сидерація II	Таке саме чергування культур на ділянці, що й у варіанті Контроль II, із застосуванням сидерації під такі культури: соняшник (2020 р.) – нут (2022 р.) – кукурудзу на зерно (2024 р.)
Рубіжний контроль показників ґрунту для варіантів Контроль II та Сидерація II у 2025 р. до посіву основної культури	

Водоутримувальну здатність ґрунту (ВЗ, %) визначали стандартним лабораторним методом (Dobriyal et al., 2012; Gould, 2024).

Найменша вологоємність ґрунту (НВГ, %) визначена на підставі методики, деталізованої Gould (2024 р.).

Електропровідність ґрунту (Е, 0,1 см/м), визначали кондуктометрично за використання кондуктометра-солеміра (EZODO-8200 M (EZODO, Тайвань)).

Вміст гумусу (Г, %) було визначено відповідно до національного стандарту (ДСТУ 4289:2004, 2005).

Вміст легкогідролізованого азоту ($N_л$, мг/кг), рухомого фосфору (Р, мг/кг), обмінного калію (К, мг/кг) було визначено відповідно до аналітичного припису для агрохімічних лабораторій від 2014 р. (відповідно до ДСТУ 7863:2015, 2016; ДСТУ 4115–2002, 2003). Показник pH_{KCl} (сольове) було визначено також за національним стандартом (ДСТУ ISO 10390–2007, 2009 (ідентичний міжнародному стандарту ISO 10390:2005)).

Груповий і фракційний склад гумусу ґрунту визначався за методом І.В. Тюріна в модифікації В.В. Пономарьової та Т.А. Плотникової, спалюванням за Б.А. Нікітіним (варіант Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії» Національної академії аграрних наук України із визначенням вмісту гумінових кислот ($C_{гк}$, % від вмісту органічного вуглецю ($C_{орг}$)), фульвокислот ($C_{фк}$, % від вмісту органічного вуглецю ($C_{орг}$)), залишку ($C_з$, % (як різниця між $C_{гк}$ та $C_{фк}$)) та співвідношення $C_{гк}/C_{фк}$ (ДСТУ 7828:2015, 2016).

Вміст органічного вуглецю розраховувався як відношення вмісту гумусу (Г, %) до коефіцієнта 1,724 відповідно до стандартних рекомендацій (ДСТУ 7828:2015, 2016).

Для визначення загального вмісту азоту ($N_{заг}$) було застосовано метод Кельдаля (AOAC, 1995).

Показник відношення $C_{орг}/N_{заг}$ розраховували як відношення вмісту органічного вуглецю ($C_{орг}$, %) до загального азоту ($N_{заг}$, %).

Індекс якості ґрунту (у загальній міжнародній транскрипції – Soil Quality Index (SQI)) визначали відповідно до моделі нелінійного вагування критеріїв (w_i) значущості ознак і властивостей (Uthappa et al., 2024) за рівнянням 1, а нормалізацію S_i відповідно до рівняння 2:

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} w_i \times S_i \ , \qquad (1)$$

де: n – число параметрів (показників), w_i – факторна вага і-того параметра (показника); S_i – нормалізований і-тий параметр (показник).

$$S_i = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{X}{X_0}\right)^b\right]}, \qquad (2)$$

де: X – фактичний показник; X_0 – середнє значення показника в масиві даних; b – нахил кривої нормалізації у значенні −10,5 для показника в логістичному значенні «більше – краще» та +10,5 для показника «менше – краще».

Вагові значення w_i були отримані застосуванням PCA аналізу (так званий метод аналізу головних компонент) як відношення спільних характеристик і-го показника до суми спільних характеристик усіх показників (Iheshiulo et al., 2024).

Рівень спільності факторів (communality) визначали відповідно до (Zhang et al., 2025) за рівнянням 3:

$$Communality_i = l_{i1}^2 + l_{i2}^2 + \cdots + l_{ik}^2, \qquad (3)$$

де: l_{ij} – факторне навантаження змінної і на компоненту j, k – кількість компонент PCA аналізу.

Для оцінювання гідротермічних режимів за загальний період досліджень було застосовано такі показники, як: середньодобова температура (℃), кількість опадів (мм), гідротермічний коефіцієнт (далі – ГТК) (рівняння 4), коефіцієнт значущості відхилень (C_{sd}) (рівняння 5) (табл. 2):

$$ГТК = \frac{\sum R}{0.1 \times \sum t_{>10}}, \qquad (4)$$

де: ΣR – сума опадів за період з температурою вище за 10 ℃, $\Sigma t_{>10}$ – сума ефективних температур за період досліджень. Рейтингування режиму погоди за показником умов за значенням ГТК: >1,6 – надмірно вологий, 1,3–1,6 – вологий, 1,0–1,3 – помірно сухий, 0,7–1,0 – сухий, 0,4–0,7 – дуже сухий.

$$C_{sd} = \frac{\left(X_i - X_{av}\right)}{S} \ , \qquad (5)$$

де: X_i – поточний елемент погоди; X_{av} – показник середнього багаторічного значення; S – середнє квадратичне відхилення; і – порядковий номер року. Рівень C_{sd}: 0 ÷ 0,5 (−0,5) – умови близькі до нормальних; (−1) 1 ÷ (−2) 2 – суттєво відрізняються від багаторічних; >2 (<−2) – близькі до екстремальних.

Таблиця 2

Оцінка гідротермічного режиму періоду досліджень
(зона Dfa/Dfb за кліматично-режимною класифікацією Кеппена – Гейгера), 2014–2024 рр.

Рік	Сума опадів, мм (IV–X)	$^{*}t_{aver}$, °C (IV-X)	Місяці періоду вегетації										$C_{sd\,aver}$ V–IX	$^{*}t_{aver}$, °C	**Сума опадів, мм
			V		VI		VII		VIII		IX				
			X_i	C_{sd}	X_i	C_{sd}	X_i	C_{sd}	X_i	C_{sd}	X_i	C_{sd}			
2014	590,4	14,62	3,93	3,39	1,55	1,00	1,31	0,24	1,05	0,46	1,25	1,10	1,24	0,2	245,5
2015	303,1	15,48	0,92	0,19	0,72	−0,53	0,32	−1,16	0,12	−1,13	1,184	0,97	−0,33	9,5	256,1
2016	406,1	15,33	0,49	−0,26	1,27	0,48	1,06	0,39	0,90	0,46	0,01	−1,17	−0,02	−0,6	325,7
2017	443,1	15,04	0,78	0,04	0,50	−0,92	1,52	1,38	0,82	0,30	3,10	4,47	1,05	−0,4	323,7
2018	444,2	16,39	0,31	−0,45	4,40	6,28	2,16	2,71	0,59	−0,19	1,38	1,33	1,94	0,0	271,0
2019	560,2	15,70	4,90	4,42	1,68	1,25	1,01	0,30	0,24	−0,90	0,99	0,62	1,14	2,9	200,5
2020	589,2	15,64	5,33	4,87	1,55	1,01	0,59	−0,59	0,53	-0,30	0,86	0,38	1,07	−0,3	356,1
2021	459,7	14,33	3,13	2,54	1,68	1,25	0,78	−0,19	1,46	1,61	0,71	0,10	1,06	1,2	216,9
2022	678,7	15,15	1,43	0,74	1,50	0,91	0,90	0,06	1,71	2,13	4,96	7,86	2,34	2,2	278,0
2023	486,9	16,24	0,09	−0,69	1,64	1,18	1,41	1,14	0,65	−0,05	1,02	0,66	0,45	2,9	371,2
2024	481,9	17,94	0,58	−0,17	1,66	1,21	1,19	0,67	0,77	1,46	0,45	−0,38	0,41	1,2	263,8

* – середня середньодобова температура (°C) за період листопад попереднього року – березень наступного; ** – сума опадів (мм) за період листопад попереднього року – березень наступного.

Статистичне оцінювання результатів досліджень передбачало використання базових показників варіаційної статистики (Wong, 2018), використання таких показників, як: середнє арифметичне, стандартне відхилення (SD), коефіцієнт варіації (C_V) (для $p < 0,05$), з розрахунком у програмі "Statistica 10" (StatSoft – Dell Software Company, США). Для визначення та відображення істотності різниці між значеннями облікових показників між варіантами було застосовано кореляційний і дисперсійний методи аналізу з розрахунком найменшої істотної різниці (НІР для $p < 0,05$).

Результати

Оцінення біопродуктивності редьки олійної за період досліджень підтвердило її ефективність як проміжного сидерального компонента за використання на ґрунтах з невисоким потенціалом родючості для умов нестійкого зволоження (табл. 3). Це підтверджено результатами середнього за період досліджень досяжного потенціалу загальної біопродуктивності як у сирій (24,01 т/га), так і в сухій речовині (4,02 т/га), що відповідало середньому еквіваленту класичного гною ВРХ на рівні 14,41 т/га.

Водночас визначена варіативність показників біопродуктивності за параметром коефіцієнта варіації (34,96% для виразу в сирій речовині, 31,93% для виразу в сухій речовині, 34,95% для еквівалента у виразі класичної органіки) вказує на істотний вплив гідротермічних умов періоду вегетації редьки олійної від повних сходів до початку її сидерального використання. Це підтверджено результатами визначених кореляційних залежностей між масивом гідротермічних умов у роки сидерального застосування редьки олійної (див. табл. 3) з усередненими параметрами погодних умов (див. табл. 2). За результатами такого кореляційного зіставлення біопродуктивності редьки олійної як у сирому, так і в сухому виразах вона має тісну пряму залежність з кількістю опадів 0,741 (за $p < 0,01$) та 0,654 (за $p < 0,01$) відповідно, обернену залежність від рівня середньодобової температури: −0,896 (за $p < 0,01$), −0,936 (за $p < 0,01$) відповідно.

На підставі сформованого за період досліджень масиву даних встановлено істотний позитивний вплив варіанту систематичної сидерації за використання редьки олійної на формування як агрофізичних, так і агрохімічних властивостей ґрунту

Таблиця 3

Сидеральна біопродуктивність редьки олійної в досліді (на феностадію цвітіння)

Сидеральна біопродуктивність	**Рік досліду із сидерацією**							
	2014	**2016**	**2018**	**2020**	**2022**	**2024**	**Середнє**	***НІР$_{0.5}$**
Загальна біопродуктивність рослин (надземна та коренева біомаса), т/га	28,8	26,82	28,64	14,38	32,8	12,61	28,8	1,15
Загальна біопродуктивність рослин (надземна та коренева біомаса) у сухій речовині, т/га	4,83	4,69	4,74	2,52	5,09	2,23	4,83	0,33
Приблизний еквівалент класичного гною ВРХ, т/га	17,28	16,10	17,18	8,63	19,68	7,57	14,41	0,84

(табл. 4). Зокрема, у зіставленні з варіантами без сидерації вміст гумусу мав виражену спадну динаміку з роками, у середньому для горизонту 0–30 см – –0,021%/рік за період 2014–2025 рр. Навпаки, у варіанті сталого сидерального використання редьки олійної показник мав приростний характер для шару ґрунту 0–30 см на рівні 0,024%/рік. Позитивними є також структурні зрушення у співвідношенні гумінових і фульвокислот у структурі органічного вуглецю. Визначено, що систематичне застосування редьки олійної як сидерату, відповідно до схеми досліду, забезпечило усереднене зростання для горизонту 0–30 см вмісту гумінових кислот на 5,58%, на відміну варіанту без сидерації, де визначено зворотний характер формування показника зі зниженням частки гумінових кислот у середньому на 3,35%. Такий характер формування структури гумусових сполук сформував істотно відмінну динаміку у співвідношенні гумусових і фульвоксилот у загальній структурі гумусу ($C_{гк}/C_{фк}$) – приріст на рівні до 29% на рубіжну дату обліку (2025 р.) для варіанту з послідовним сидеральним використанням редьки олійної та динамічне зниження до 14% за тієї ж системи порівняння у варіантів без сидерації. Відмічено також позитивні баланси вмісту як загального азоту ($N_{заг}$), так і доступних форм основних макроелементів (NPK). Так, у порівнянні варіантів Сидерація ІІ й Абсолютний контроль (на 2025 р.) у середньому для товщини ґрунтового профілю 0–30 см відмічено загальне зростання $N_{заг}$ на 11,06%. За зіставлення варіантів Абсолютний контроль та Контроль ІІ відмічено обернений характер формування показника за середньобагаторічного зниження вмісту $N_{заг}$ на рівні 3,15%.

З урахуванням визначеної динаміки для вмісту гумусу (отже, і для органічного вуглецю) та загального азоту було сформовано передумови для істотного зниження показника $C_{орг}/N_{заг}$ у варіанті без застосування сидерації в середньобагаторічному вимірі на 9,81% у зіставленні з абсолютним контролем на фоні загального зростання показника на 10,75% у варіанті за послідовної сидерації.

Позитивною була й динаміка азоту, фосфору та калію у варіантах сидерального використання редьки олійної (див. табл. 4). Так, у зіставленні з абсолютним контролем у середньому для шару ґрунту 0–30 см приріст вмісту легкогідролізованого азоту був 13,97%, рухомого фосфору – до 25%, обмінного калію – до 23%.

Позитивним є також зниження кислотності ґрунту за використання редьки олійної у формі сидерату – за повний цикл досліду на 2025 р. у зіставленні з абсолютним контролем для варіанту систематичної сидерації встановлено зниження показника pH на 4,30% за оберненої тенденції зростання на 2,81% у варіанті без сидерації.

Закономірно, що позитивні процеси підвищення концентрації макроелементів, оптимізація ємності вбирання, активізація катіонно-аніонного вбирання ґрунтом і зміна у структурі гумусових сполук вплинули й на рівень електропровідності ґрунту, яка завдяки підвищеній гумусованості й іммобілізації мікроелементів у складні халатні біоорганічні комплекси мала тенденцію до зниження для шару ґрунту в 0–30 см порівняно з варіантами Абсолютний контроль та Сидерація ІІ на 3,39%.

Встановлена тенденція до зниження гумусованості ґрунту на фоні погіршення структури гумусу, зниження вмісту макро-

Таблиця 4

Масив параметрів властивостей ґрунту за різних варіантів досліду
(для етапів обліку 2014/2019/2025 рр.)

Варіант досліду	Шар ґрунту, см	Г, %	$C_{орг}$, %	$C_{гк}$, % (від $C_{орг}$)	$C_{фк}$, % (від $C_{орг}$)	$C_з$, % (від $C_{орг}$)	$C_{гк}$: $C_{фк}$	$N_{заг}$, %	$C_{орг}/N_{заг}$	N, мг/кг	P, мг/кг	K, мг/кг	pH_{kcl}	E_i, 0,1 см/м
2014 р.														
Абсолютний контроль	0–10	2,68^{a}	1,555^{a}	42,37^{a}	30,04^{a}	27,59^{a}	1,410^{a}	0,151^{a}	10,29^{a}	85,3^{a}	177,5^{a}	118,8^{a}	5,82^{a}	0,285^{a}
	10–20	2,56^{b}	1,485^{b}	41,92^{a}	31,61^{b}	26,47^{b}	1,326^{b}	0,141^{a}	10,53^{a}	83,7^{a}	179,1^{a}	110,8^{b}	5,84^{a}	0,281^{a}
	20–30	2,15^{c}	1,247^{c}	40,84^{b}	32,75^{c}	26,41^{b}	1,247^{c}	0,125^{b}	9,98^{b}	77,4^{b}	171,6^{b}	105,7^{c}	5,73^{b}	0,319^{b}
2019 р														
Контроль І*	0–10	2,61^{a}	1,514^{a}	41,21^{a}	31,18^{a}	27,61^{a}	1,322^{a}	0,147^{a}	10,30^{a}	81,3^{a}	163,7^{a}	110,4^{a}	5,71^{a}	0,234^{a}
	10–20	2,47^{b}	1,433^{b}	40,88^{b}	31,14^{a}	27,98^{a}	1,313^{a}	0,132^{b}	10,85^{a}	77,5^{b}	167,2^{a}	104,1^{b}	5,73^{a}	0,262^{b}
	20–30	2,03^{c}	1,177^{c}	39,77^{b}	32,59^{b}	27,64^{a}	1,220^{b}	0,124^{b}	9,50^{c}	71,2^{c}	161,4^{b}	95,3^{c}	5,85^{b}	0,289^{b}
Сидерація І**	0–10	2,84^{a}	1,647^{a}	45,71^{a}	30,25^{a}	24,04^{a}	1,511^{a}	0,159^{a}	10,36^{a}	95,7^{a}	180,2^{a}	122,3^{a}	5,87^{a}	0,251^{a}
	10–20	2,71^{b}	1,572^{b}	45,58^{a}	30,43^{a}	23,99^{a}	1,498^{a}	0,157^{a}	10,01^{a}	86,9^{b}	187,5^{b}	117,4^{b}	5,94^{b}	0,272^{a}
	20–30	2,35^{c}	1,363^{c}	44,21^{b}	30,69^{a}	25,10^{b}	1,441^{b}	0,145^{b}	9,40^{b}	80,5^{c}	177,3^{a}	120,7^{a}	6,00^{b}	0,301^{b}
2025 р.														
Контроль ІІ****	0–10	2,36^{a}	1,369^{a}	38,97^{a}	32,96^{a}	28,07^{a}	1,182^{a}	0,143^{a}	9,57^{a}	73,8^{a}	151,8^{a}	105,7^{a}	5,63^{a}	0,218^{a}
	10–20	2,28^{a}	1,323^{a}	38,15^{b}	33,29^{a}	28,56^{b}	1,146^{a}	0,137^{a}	9,65^{a}	68,9^{b}	152,7^{a}	102,4^{a}	5,68^{a}	0,237^{a}
	20–30	1,98^{b}	1,148^{b}	37,91^{b}	34,27^{b}	27,82^{a}	1,106^{b}	0,134^{b}	8,57^{b}	65,8^{c}	146,9^{b}	100,6^{b}	5,87^{b}	0,259^{b}
Сидерація ІІ*****	0–10	2,92^{a}	1,694^{a}	47,53^{a}	28,12^{a}	24,35^{a}	1,690^{a}	0,157^{a}	10,79^{a}	102,3^{a}	184,4^{a}	127,7^{a}	5,95^{a}	0,263^{a}
	10–20	2,78^{b}	1,613^{b}	47,28^{a}	27,09^{b}	25,63^{b}	1,745^{b}	0,154^{a}	10,47^{a}	92,8^{b}	193,7^{b}	121,4^{b}	6,07^{b}	0,285^{b}
	20–30	2,54^{c}	1,473^{c}	46,84^{a}	27,32^{b}	25,84^{b}	1,714^{a}	0,150^{a}	9,82^{b}	83,6^{c}	189,4^{c}	130,9^{a}	6,12^{b}	0,307^{c}

Продовження таблиці 4

Варіант досліду	Шар ґрунту, см	ЩГ, г/см³	ЩСГ, г/см³	ТГ, кг/см²	$P_к$, %	$P_{нк}$, %	$P_а$, %	$P_з$, %	ВЗ, %	НВГ, %
2014 р.										
Абсолютний контроль	0–10	1,32[a]	2,55[a]	13,51[a]	26,36[a]	20,44[a]	21,54[a]	46,80[a]	23,87[a]	23,41[a]
	10–20	1,36[b]	2,57[a]	16,17[b]	26,78[a]	19,78[b]	18,64[b]	46,56[a]	26,62[b]	23,08[a]
	20–30	1,45[c]	2,62[b]	19,56[c]	25,35[b]	18,53[b]	14,98[c]	43,88[b]	28,47[c]	21,81[b]
2019 р.										
Контроль І*	0–10	1,37[a]	2,61[a]	15,29[a]	24,74[a]	19,74[a]	20,43[a]	44,48[a]	21,54[a]	22,02[a]
	10–20	1,41[b]	2,63[a]	18,39[b]	25,29[a]	19,15[a]	17,17[b]	44,44[a]	24,51[b]	21,15[b]
	20–30	1,49[c]	2,65[a]	19,44[b]	23,28[b]	18,47[a]	12,22[c]	41,75[b]	27,11[c]	20,29[c]
Сидерація І**	0–10	1,18[a]	2,48[a]	11,24[a]	27,22[a]	23,17[a]	23,61[a]	50,39[a]	24,29[a]	24,85[a]
	10–20	1,22[b]	2,51[a]	14,87[b]	29,14[b]	21,17[b]	20,48[b]	50,31[a]	28,15[b]	23,08[b]
	20–30	1,29[c]	2,54[b]	16,24[b]	28,84[b]	19,63[c]	18,07[b]	48,47[b]	30,53[c]	22,77[b]
2025 р.										
Контроль ІІ ****	0–10	1,42[a]	2,65[a]	16,18[a]	24,72[a]	18,41[a]	18,23[a]	43,13[a]	20,37[a]	20,51[a]
	10–20	1,45[a]	2,67[a]	19,81[b]	25,19[a]	17,12[b]	15,47[b]	42,31[a]	23,86[b]	19,34[b]
	20–30	1,49[b]	2,72[b]	21,96[c]	23,92[b]	16,85[b]	11,15[c]	40,77[b]	28,79[c]	18,34[c]
Сидерація ІІ*****	0–10	1,14[a]	2,39[a]	10,12[a]	28,18[a]	24,59[a]	25,59[a]	52,77[a]	27,63[a]	25,45[a]
	10–20	1,17[a]	2,41[a]	12,24[b]	29,89[b]	23,55[b]	23,48[b]	53,44[b]	33,59[b]	24,31[b]
	20–30	1,22[b]	2,44[a]	13,21[b]	29,48[b]	22,08[b]	20,22[c]	51,56[c]	32,93[b]	23,82[b]

Примітка. Різні малі літери в таблиці вказують на істотні відмінності між варіантами досліду між шарами ґрунту для того самого варіанту (для рівня значущості $p < 0,05$).

елементів і супутніх негативних процесів у ґрунтовому профілі характерна для варіанту без сидерації, протилежні процеси у варіантах із застосуванням сидерації – позитивно відобразились на формуванні агрофізичних властивостей ґрунту в аналізованому шарі 0–30 см у варіанті із систематичною періодичною сидерацією у сталій послідовній динаміці за період 2014–2025 рр., за зіставлення вихідних показників на рівні абсолютного контролю та у варіанті Сидерація ІІ на кінцеву дату обліку (2025 р.). Так, встановлено в середньому для шару ґрунту 0–30 см зниження щільності ґрунту (ЩГ) на 19,05%, щільності складення ґрунту (ЩСГ) на 9,95%, твердості ґрунту (ТГ) на 33,95% за одночасного зростання показників капілярної пористості ($P_к$) на 18,63%, некапілярної пористості ($P_{нк}$) на 34,06%, пористості аерації ($P_а$) – на 57,83%. Для варіанту без сидерації аналогічні показники, навпаки, продемонстрували обернену динаміку (див. табл. 4) у значеннях: +5,65, +3,88, +18,18, −5,93, −10,82, −19,31% відповідно.

Визначена динаміка зміни видів пористості сірого лісового ґрунту в досліді сприяла відповідним зрушенням і за такими показниками, як водоутримувальна здатність ґрунту (ВЗ) та найменша вологоємність ґрунту (далі – НВГ). Що стосується водоутримувальної здатності, то застосуванням сидерації було досягнуто середній для шару ґрунту 0–30 см приріст показника на рівні 30,27% за повний цикл досліджень. У варіанті без сидерації було відмічено зниження показника на 21,37% за тих же варіантів зіставлення. Подібні особливості спостережено й для показника НВГ – зростання на 7,72% у варіанті систематичної сидерації та зниження на 14,81% у варіанті без її застосування.

Визначена істотність впливу варіантів досліду на масив облікованих показників і властивостей ґрунту з огляду на результати статистичного зіставлення на рівні $p < 0,05$ дозволила застосувати метод оцінювання на підставі аналізу головних компонент (у міжнародній абревіатурі – PCA метод). Результати такого аналізу відповідно до стандартної процедури в пакеті програми “Statistica 10” представлено в таблиці 5.

Відповідно до визначених вагових значень параметрів варіант двокомпонентного аналізу цілком задовольняє умову не менш як 80% рівня загальної кумулятивної дисперсії обох компонент, а індивідуальні значення ваги облікових параметрів ґрунту підтвердили додатково їхню значимість щодо формування результуючого показника якості ґрунту, відповідно до номінального їх значення в загальній системі PCA аналізу.

У результуючому підсумку підтверджено ефективність застосування редьки олійної як сидерату у варіанті біоорганічного удобрення та відновлення ґрунтів за їх агрофізичної та агрохімічної деградації на основі отриманого результуючого показника індексу якості ґрунту (SQI) для досліджуваних горизонтів ґрунтового профілю в розрізі застосованих варіантів досліду (рис. 1).

Отриманий показник якості ґрунту, у розрізі варіантів досліду, підтвердив наші узагальнення щодо позитивно формувальних ефектів впливу сидерації на інтегральний підсумок збереження та відновлення ґрунтових умов родючості. Зокрема, за систематичного сидерального використання редьки олійної, порівняно з варіантом абсолютного контролю, досягнуто ріст показника SQI за повний цикл досліджень з індексом 1,428. Напаки, для варіанту без сидерації відмічено зменшення показника з індексом зниження на рівні 0,623.

Обговорення

Вставновлений бажаний рівень біопродуктивності сидеральних культур для гарантування ґрунтореабілітаційних і ґрунтополіпшувальних процесів за літнього строку їх використання (проміжний у сівозміні тип сидерації) становить не менше ніж 2,5 т/га загальної сухої речовини з еквівалентом трансформації до класичних органічних добрив на рівні 9–10 т/га (Creamer & Baldwin, 1997; Israt & Parimal, 2023). За результатами проведеного багаторічного сидерального оцінювання редьки олійної підтверджено її високий агротехнологічний сидеральний потенціал поряд із традиційними хрестоцвітими видами (гірчиця біла, ріпак ярий), які застосовуються в умовах нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу на сірих лісових ґрунтах.

Отримані результати зростання гумусованості ґрунтового профілю позитивно співвідносяться з результатами різнорегіональних оцінювань впливу інших видів хрестоцвітих сидератів на динамічну зміну вмісту гумусу у значенні від 0,014 до 0,054%/рік залежно від оптимальності гідротермічних умов періоду сидерального вирощування відповідного виду сидерату (Stroud et al., 2024). Зважаючи на рівень зміни гумусованості ґрунтового профілю в динаміці років

Таблиця 5

Складники аналізу головних компонент впливу систематичної, з періодичним технологічним характером сидерації за використання редьки олійної на головні параметри якості ґрунту (за сформованим масивом даних у період обліків 2014–2025 рр. за процедури нелінійної нормалізації PCA)*

Облікові параметри ґрунту*	Принципова компонента 1 (PC1)	Принципова компонента 2 (PC2)	Спільність (Communality)	Вагові коефіцієнти параметрів (w_i)	Облікові параметри ґрунту	Принципова компонента 1 (PC1)	Принципова компонента 2 (PC2)	Спільність (Communality)	Вагові коефіцієнти параметрів (w_i)
Г, %	0,900	−0,411	0,979	0,049	pH_{kcl}	−0,720	−0,602	0,880	0,044
$C_{орг}$, %	0,900	−0,411	0,979	0,049	Е, 0,1 см/м	0,278	0,819	0,749	0,038
$C_{гк}$, %	0,981	0,151	0,984	0,050	ЩГ, г/см^3	0,982	−0,025	0,965	0,049
$C_{фк}$, %	0,934	0,077	0,879	0,044	ШСГ, г/см^3	0,981	0,078	0,968	0,049
$C_з$, %	0,814	0,215	0,709	0,036	ТГ, кг/см^2	0,929	−0,257	0,930	0,047
$C_{гк} : C_{фк}$	0,982	0,119	0,978	0,049	$P_к$, %	0,899	0,261	0,876	0,044
$N_{заг}$, %	0,858	-0,323	0,841	0,042	$P_{нк}$, %	−0,976	0,080	0,959	0,048
$C_{орг} : N_{заг}$	0,637	−0,392	0,560	0,028	$P_а$, %	0,909	−0,379	0,969	0,049
N, мг/кг	0,953	−0,176	0,938	0,047	$P_з$, %	0,989	0,090	0,987	0,050
P, мг/кг	0,928	0,230	0,915	0,046	ВЗ, %	0,387	0,886	0,936	0,047
K, мг/кг	0,950	0,036	0,904	0,046	НВГ, %	0,960	−0,047	0,925	0,047
Власне номінальне значення						16,917	2,890		
Частка дисперсії						76,897	13,138	–	
Кумулятивний рівень дисперсії						76,897	90,035		

* *Розшифровка показників представлена в розділі «Матеріал і методи» даної статті.*

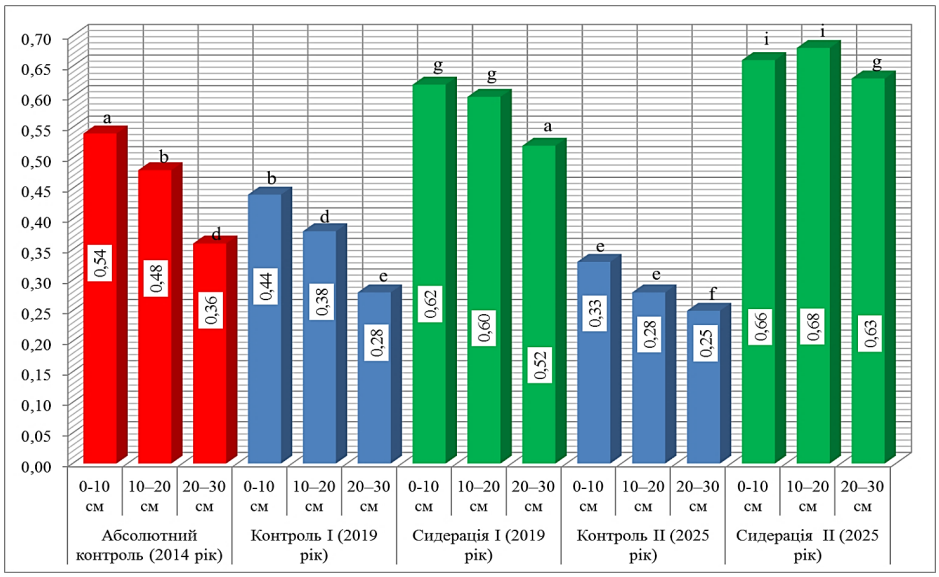


Рис. 1. Індекс якості ґрунту (SQI) за результатами тривалого оцінювання в межах варіантів досліду, 2014–2025 рр. (розшифровка варіантів досліду представлена в таблиці (див. табл. 1). Різні малі літери над колонками графіка вказують на істотні відмінності між варіантами досліду за показником SQI на рівні значущості $p < 0,05$)

оцінювання, редька олійна демонструє істотно високі темпи гумусонакопичення, які не поступаються традиційним і широковживаним хрестоцвітим видам сидератів, зокрема такій поширеній культурі, як гірчиця біла. Це відкриває можливість для ефективного застосування редьки олійної в сидеральних технологіях, з огляду на її потенціал з багатоцільового використання (Tsytsiura, 2024a). Отриманий показник $C_{орг}/N_{заг}$ у сидеральному утриманні ґрунту за участі редьки олійної в кінцевому циклі досліду (на 2025 р.) в інтервалі 9,5–11, а також переважання у співвідношенні $C_{гк}/C_{фк}$ частки гумінових кислот позитивно співвідносяться з висновками щодо позитивно-спрямованих агротехнологічних варіантів сидерації, де оптимальні умови акумуляції гумусових сполук у ґрунтовому профілі були ідентифіковані за поєднання низького значення показника C/N на фоні ґрунтового профілю з високим потенціалом ґрунтовою родючості, або, як допустима альтернатива, за високого показника C/N на фоні низького потенціалу родючості ґрунтів (Zhou et al., 2020). За збереження такого співвідношення спостерігається процес активної іммобілізації продуктів розкладу рослинної та кореневої органіки, створюються умови для нейтральної реакції ґрунтового розчину (Silva et al., 2008) та формування динаміки домінування процесів акумуляції над процесами розпаду. Ці висновки позитивно корелюють з динамікою формування окреслених показників за сидерального використання редьки олійної, що підтверджує її потенціал не лише для загального гумусонакопичення, але й для оптимізації гумусових структур у ґрунтовому профілі у тривалій динаміці. Це позитивно виділяє редьку олійну як рослину з високим адаптивним сидеральним потенціалом, що було підтверджено й показником співвідношення гумінових та фульвокислот, який по своїй суті є індикатором фундаментальних процесів акумуляції органічного вуглецю та його потенціалу з позиції реалізації в рівнях урожайності культур і гарантування стійкості ґрунту до деградації фізичного й агрохімічного характеру (Kucerik et al., 2024). Уважається (Zhang et al., 2025), що для ґрунтів із вищим потенціалом родючості дане співвідношення має бути вищим за 1,5, будь-яке підвищення даного показника за використання агротехнологічних рішень є доцільним. З огляду на багаторічний приріст даного співвідношення за використання редьки олійної на рівні 0,39, доведено цінність редьки олійної як поліпшувача ґрунтових властивостей для ґрунтів із середнім потенціалом природної родючості.

Зазначимо, що різними дослідженнями з питань різновидової сидерації доведено ефективність використання сидеральної маси для поліпшення балансу макро- і мікроелементів із приростом на рівні від 3,5 до 45% залежно від елементу живлення та ґрунтово-кліматичних умов (Hansen et al., 2021; Yadav et al., 2021; Choudhary et al., 2023). Такі узагальнення підтверджено й нашими оцінками як з позиції цінності сидеральної біомаси редьки олійної за біохімічним складом (Tsytsiura, 2024a), так і з позиції цінних середніх темпів іммобілізації основних компонентів ґрунтового живлення завдяки прирістним значенням зростання вмісту основних макроелементів у ґрунтовому профілі на рівні 23–30%.

Різними дослідженнями підтверджено оптимізуючий вплив сидератів на агрофізичні та похідні від них водні властивості як через поліпшення гумусованості профілю, отже, і його агрегатованості, структурності та гідрофобних властивостей щодо росту частки водостійких агрегатів (Abiven et al., 2008; Liu et al., 2020; Edlinger et al., 2023), так і з позиції зростання структурної пористості ґрунту, зокрема й завдяки ґрунтовому розкладу сидеральної маси й активної оструктурювальної діяльності їхніх кореневих систем (Razanov et al., 2021; Dai et al., 2023; Krishnan & Sivakumar, 2024; Park & Lee, 2025). Ці позитиви підтверджено й нашими оцінками, позитивною прирістною динамікою основних агрофізичних параметрів сірого лісового ґрунту в товщі 0–30 см за сидерального застосування редьки олійної під сільськогосподарські культури, різноспрямованого характеру впливу на агрофізику ґрунту.

Позитивні зрушення в агрофізичних параметрах ґрунтового профілю завдяки сидерації здебільшого оптимізують водоутримувальну здатність ґрунту та поліпшують такі гідрологічні константи, як: вологість в'янення, найменша вологоємність та рівень гігроскопічного зволоження, у результуючому підсумку, завдяки саме сидеральному використанню щонайменше на 5–8% (Clark, 2008; Deus et al., 2022).

Відмічено також, що ефективна й правильно сформована технологія сидерації може забезпечити загальне підвищення індексу якості ґрунтів в інтегральній багато-

річній оцінці до варіанту без її застосування з індексом зростання в інтервалі від 1,15 до 2,00 залежно від виду сидерату та ґрунтово-кліматичних ресурсів території (Amacher & Perry, 2007; Askari & Holden, 2015; Deus et al., 2022; Chaudhry et al., 2024). З огляду на отриманий індекс приросту у представлених дослідженнях на рівні, близькому до 1,5, редька олійна може бути рекомендована як надійний і ефективний компонент сидеральної ґрунтореабілітації деградованих земель для зон із достатнім і нестійким зволоженням.

Висновки

Доведено агротехнологічну ефективність систематичної сидерації проміжного літнього строку в системі класичних сівозмін на сірих лісових ґрунтах в умовах нестійкого зволоження, що узгоджується з таким позитивними темпами поліпшення комплексу агрофізичних, агрохімічних і гідрологічних властивостей сірого лісового ґрунту за 12-тирічний цикл досліджень, як: вміст гумусу – +0,0024%/рік, щільність ґрунту – −0,017 г/см^3 на рік, щільність складення ґрунту – −0,14 г/см^3 на рік, твердість ґрунту – −0,296 кг/см^2, загальна пористість – +0,570%/рік, капілярна пористість – +0,252%/рік, некапілярна пористість – +0,319%/рік, пористість аерації ґрунту – +0,393%/рік, водоутримувальна здатність – + 0,422%/рік, pH – +0,021 на рік, органічний вуглець – +0,0024%/рік, загальний азот – +0,001%/рік, співвідношення C/N – 0,008 на рік, легкогідролізований азот – +0,897 мг/кг на рік, рухомий фосфор – +1,092 мг/кг на рік, обмінний калій – +1,242 мг/кг на рік.

Отже, систематичне сидеральне використання редьки олійної за проміжного (літнього) строку на сірих лісових ґрунтах в інтегральній оцінці дозволяє істотно поліпшити якість ґрунту за міжнародним показником оцінки ґрунтових ресурсів SQI та сприяє процесам ґрунтореабілітації з індексним зростанням за 12-тирічний цикл періодичного застосування на рівні до 1,5.

Список використаної літератури

ДСТУ 4115-2002. Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору та калію модифікованим методом Чирикова (Національний стандарт України). Київ : Державне видавництво стандартів України, 2003. 6 с.

ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунтів. Методи визначення органічної речовини (Національний стандарт України). Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 8 с.

ДСТУ 4362:2004. Якість ґрунтів. Показники родючості ґрунтів (Національний стандарт України). Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 33 с.

ДСТУ 4730:2007. Якість ґрунту. Визначення гранулометричного складу методом піпетки (модифікований Н.А. Качинським). Офіційне видання. Київ : Державний комітет з технічного регулювання та споживчої політики України, 2007. 17 с.

ДСТУ 7828:2015. Якість ґрунтів. Визначення групового та фракційного складу гумусу методом Турина в модифікації Пономарьової та Плотнікової. (Національний стандарт України). Київ : Державна служба стандартизації та споживацтва України, , 2016. III. Набуває чинності з 01.07.2016. 11 с.

ДСТУ 7863:2015. Якість ґрунту. Визначення легкогідролізованого азоту методом Корнфілда. (Національний стандарт України). Київ : Державна служба стандартизації та захисту прав споживачів України, 2016. 9 с.

ДСТУ ISO 11277:2005. Якість ґрунту. Визначення розподілу частинок за розмірами в мінеральній частині ґрунту. Метод просіювання та осадження (ISO 11277:1998, IDT). Київ : Державне видавництво стандартів України, 2005. 32 с.

Abdulraheem M.I., Tobe O.K. Green manure for agricultural sustainability and improvement of soil fertility. *Farming & Management.* 2022. Vol. 7. P. 1–8. https://doi.org/10.31830/2456-8724.2022.FM-101

Abiven S., Menasseri-Aubry S., Angers D., Leterme P. A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Science Society of America Journal.* 2008. Vol. 72. № 1. P. 119–125. https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0018

Amacher M.C., Perry C.H. Soil vital signs: a new soil quality index (SQI) for assessing forest soil health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2007. 12 p.

Ansari M.A., Choudhury B.U., Layek J., Das A., Lal R., Mishra V.K. Green manuring and crop residue management: Effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in

the foothills of Eastern Himalaya (India). *Soil Tillage Research.* 2022. Vol. 218. P. 105318. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105318

AOAC. Method 900.02, 934.01, 954.02, 955.04, 960.05. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th Edition, AOAC International, Virginia. 1995. 747 p.

Askari M.S., Holden N.M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research.* 2015. Vol. 150. P. 57–67. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.010

ASTM-D854. Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM. 2010. 19 p.

Borek Ł. The use of different indicators to evaluate chernozems fluvisols physical quality in the Odra River valley: a case study. *Polish Journal of Environmental Studies.* 2019. Vol. 28. № 6. P. 4109–4116.

Brown C. Available Nutrients and Value for Manure from Various Livestock Types. Factsheet № 21077. AGDEX 538. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Queen's Printer for Ontario, 2021. 10 p.

Carter M.R., Gregorich E.G. Soil sampling and methods of analysis. 2nd edition. Edited by MR Carter and EG Gregorich. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis, 2008. 1264 p.

Chaudhry H., Vasava H.B., Chen S., Saurette D., Beri A., Gillespie A., Biswas A. Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility. *Sensors (Basel).* 2024. Vol. 24. № 3. P. 864. https://doi.org/10.3390/s24030864

Choudhary M., Sinha N.K., Mohanty M., Jayaraman S., Kumari N., Jyoti B., Srivastava A., Thakur J.K., Kumar N., Jha P. Response of Contrasting Nutrient Management Regimes on Soil Aggregation, Aggregate-Associated Carbon and Macronutrients in a 43-Year Long-Term Experiment. *Sustainability.* 2023. Vol. 15. P. 2679. https://doi.org/10.3390/su15032679

Clark A. Managing cover crops profitably. DIANE Publishing. 3rd ed. 2008. 248 p.

Composts & Fertilisers. 2023. NPK Nutritional Values of Animal Manures & Compost Etc. [Електронний ресурс]. URL: https://www.allotment-garden.org/composts-fertilisers/npk-nutritional-values-animal-manures-compost/#google_vignette (дата звернення 14.10.2025).

Creamer N.G., Baldwin K.R. Summer Cover Crops. HIL-37. Department of Horticultural Science, Raleigh, NC, 1997. 57 p.

Dai W., Feng G., Huang Y., Adeli A., Jenkins J. N. Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. *Soil & Tillage Research.* 2024. Vol. 244. P. 106197. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106197

Das K., Biswakarma N., Zhiipao R., Kumar A., Ghasal P.C. Pooniya V. Significance and Management of Green Manures. *Soil Health* / B. Giri, A. Varma (eds.). *Soil Biology.* 2020. Vol. 59. P. 197–217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_12

De Willigen P., Janssen B.H., Heesmans H.I.M., Conijn J.G., Velthof G.J., Chardon W.J. Decomposition and accumulation of organic matter in soil. Comparison of some models. Wageningen, Alterra. *Alterra-rapport.* 2008. P. 1726.

Deus T.R.V. de, Giongo V., Salviano A.M., Santana M. da S., Silva V.C., da Santos T.C. dos Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais.* 2022. Vol. 57. № 3. P. 409–421. https://doi.org/10.5327/Z2176-94781268

Dey D., Nath D. Assessment of change in soil properties, nutrient availability and yield of paddy as influenced by cultivation of green manuring crop. *Asian Journal of Soil Science.* 2015. Vol. 10. № 1. P. 158–161. https://doi.org/10.15740/HAS/AJSS/10.1/158-161

Dobriyal P., Qureshi A., Badola R., Hussain S.A. A Review of the Methods Available for Estimating Soil Moisture and Its Implications for Water Resource Management. *Journal of Hydrology.* 2012. Vol. 458. P. 110–117. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021

Edlinger A., Garland G., Banerjee S., Degrune F., García-Palacios P., Herzog C., Pescador D.S., Romdhane S., Ryo M., Saghai A., Hallin S., Maestre F.T., Philippot L., Rillig M.C., van der Heijden M.G.A. The impact of agricultural management on soil aggregation and carbon storage is regulated by climatic thresholds across a 3000 km European gradient. *Global Change Biology.* 2023. Vol. 9. № 11. P. 3177–3192. https://doi.org/10.1111/gcb.16677

Florentín M.A., Peñalva M., Calegari A., Translated R.D., Mcdonald M.J. Green Manure/Cover Crops and Crop Rotation in Conservation Agriculture on Small Farms. *Integrated Crop Management*: 12. 2010. 89 p.

Gould S. A guide to soil moisture. 2024. [Електронний ресурс]. URL: https://connectedcrops.ca/the-ultimate-guide-to-soil-moisture/ (дата звернення 14.10.2025).

Hansen V., Eriksen J., Jensen L.S., Thorup-Kristensen K., Magid J. Towards integrated cover crop management: N, P and S release from aboveground and belowground residues. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2021. P. 313. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107392

Iheshiulo E.M.-A., Larney F.J., Hernandez-Ramirez G., St Luce M., Chau H.W., Liu K. Quantitative evaluation of soil health based on a minimum dataset under various short-term crop rotations on the Canadian prairies. *Science of The Total Environment.* 2024. Vol. 935. P. 173335. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173335

Indoria A.K., Sharma K.L., Srinivas K., Lal M., Prasad J.V.N.S., Gopinath K.A., Sharma S.K., Pratibha G., Kundu S., Singh V.K., Rao K.V. Effect of Long-Term Application of Different Organic Resources on Soil Properties and Soil Quality Index of an Aridisol Under Mustard System. *Acta Scientific Agriculture.* 2025. Vol. 9.2. P. 04–13. https://doi.org/10.31080/ASAG.2025.09.1455

Israt I.J., Parimal B.K. Residual Effect of Green Manure on Soil Properties in Green Manure-Transplant Aman-Mustard Cropping Pattern. *Indian Journal of Agricultural Research.* 2023. Vol. 57. № 1. P. 67–72. https://doi.org/10.18805/IJARe.AF-696

Krishnan R., Sivakumar V L. The Effect of Soil-Structure Interaction (SSI) on Structural Stability and Sustainability of RC Structures. *Civil and Environmental Engineering Reports.* 2024. Vol. 34. № 1. P. 116–136. https://doi.org/10.59440/ceer/184254

Kucerik J., Brtnicky M., Mustafa A., Hammerschmiedt T., Kintl A., Sobotkova J., Alamri S., Baltazar T., Latal O., Naveed M., Malicek O., Holatko J. Utilization of Diversified Cover Crops as Green Manure-Enhanced Soil Organic Carbon, Nutrient Transformation, Microbial Activity, and Maize Growth. *Agronomy.* 2024. Vol. 14. № 9. P. 2001. https://doi.org/10.3390/agronomy14092001

Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture.* 2022. Vol. 12. № 2. P. 223. https://doi.org/10.3390/agriculture12020223

Li W.G., Yang X.X., Huang C.G., Xue N.W., Xia Q., Liu X.L., Zhang X.Q., Yang S., Yang Z.P., Gao Z.Q. Effects of rapeseed green manure on soil fertility and bacterial community in dryland wheat field. *Agricultural Sciences in China.* 2019. Vol. 52. P. 2664–2677.

Lim J.E., Lee S.S., Jeong S.H., Lee B.M., Lee Y.H., Choi Y.B., Ok Y.S. Effects of green manure incorporation method on soil physicochemical properties. *Journal of agricultural, life and environmental sciences.* 2012. Vol. 24. P. 1–7.

Liu X.H., Zhou X., Deng L.C., Fan L.Y., Qu L., Li M. Decomposition characteristics of rapeseed green manure and effect of nutrient release on soil fertility. *Hunan Agricultural Science.* 2020. Vol. 416. P. 39–44.

Naz A., Rebi A., Naz R., Akbar M. U., Aslam A., Kalsom A., Niaz A., Ahmad M. I., Nawaz S., Kausar R., Ali B., Saleem M. H., Zhou J. Impact of Green Manuring on Health of Low Fertility Calcareous Soils. *Land.* 2023. Vol. 12. № 3. P. 546. https://doi.org/10.3390/land12030546

Ma D., Yin L., Ju W., Li X., Liu X., Deng X., Wang S. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crop Research.* 2020. Vol. 266. P. 108146. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108146

Park S., Lee J.-G. Green manure improves humification and aggregate stability in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry.* 2025. Vol. 206. P. 109796. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109796

Rani T.S., Umareddy R., Ramulu C., Kumar T.S. Green Manurs and Grean leaf manures for soil fertility improvement: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry.* 2021. Vol. 10. № 5. P. 190–196.

Razanov S., Ovcharuk V., Krasnyak O., Bakhmat M., Bakhmat O. Agroecological assessment of green manures grown from winter grain harvest lost in the conditions of the right-bank Forest-steppe of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science.* 2021. Vol. 11. № 4. P. 895–902. https://doi.org/10.31407/ijees11.429

Silva G.T.A., Matos L.V., Nóbrega P.de O., Carneiro E.F., Resende A.S. de Resende. Chemical composition and decomposition rate of plants used as green manure. *Scientia Agricola.* 2008. Vol. 65. № 3. P. 298–305. https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000300010

Singh D., Devi K.B., Ashoka P., Bahadur R., Kumar N., Devi O.R., Shahni Y.S. Green Manure: Aspects and its Role in Sustainable Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change.* 2023. Vol. 13. № 11. P. 39–45. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113142

Spasić M., Vaceka O., Vejvodováa K., Tejneckýa V., Poláka F., Borůvkaa L., Drábek O. Determination of physical properties of undisturbed soil samples according to V. Novák. *MethodsX.* 2023. Vol. 10 (2023). P. 102133. https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102133

Stroud J.L., Kemp S.J., Sturrock C.J. The effect of organic matter amendments on soil surface stability in conventionally cultivated arable fields. *Soil Use and Management.* 2024. Vol. 40. P. e12985. https://doi.org/10.1111/sum.12985

Suon M, Tith S., Veu T., Voe P., Ngy S., Hill S., Chheang C. The Effects of Green Manure on Sustainable Agriculture Soil Conservation under Open Field Conditions. *International Journal of Environmental and Rural Development.* 2023. Vol. 14. № 1. P. 147–152. https://doi.org/10.32115/ijerd.14.1_147

Toungos M.D., Bulus Z.W. Cover crops dual roles: Green manure and maintenance of soil fertility, a review. *International Journal of Innovative Agriculture and Biology Research.* 2019. Vol. 7. № 1. P. 47–59.

Tsytsiura Y. Evaluation of Ecological Adaptability of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) Biopotential Realization in the System of Criteria for Multi-Service Cover Crop. *Journal of Ecological Engineering.* 2024a. Vol. 25. № 7. P. 265–285. https://doi.org/10.12911/22998993/188603

Tsytsiura Y. Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* l. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research.* 2024b. Vol. 22. № 2. P. 1026–1070. https://doi.org/10.15159/AR.24.086

Tsytsiura Y. Ecological adaptive tactics of oil radish root formation at different terms of green manure application. *Journal of Ecological Engineering.* 2025. Vol. 26. № 9. P. 420–439. https://doi.org/10.12911/22998993/205413

Uthappa A.R., Devakumar A.S., Das B., Mahajan G.R., Chavan S.B., Jinger D., Jha P.K., Kumar P., Kokila A., Krishnamurthy R., Mounesh N.V., Dhanush C., Ali I., Eldin S.M., Al-Ashkar I., Elshikh M.S., Fahad S. Comparative analysis of soil quality indexing techniques for various tree based land use systems in semi-arid India. *Frontiers in Forests and Global Change.* 2024. Vol. 6. P. 1322660. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1322660

Wang H., Zhong L., Liu J., Liu X., Xue W., Liu X., Yang H., Shen Y., Li J., Sun Z. Systematic Analysis of the Effects of Different Green Manure Crop Rotations on Soil Nutrient Dynamics and Bacterial Community Structure in the Taihu Lake Region, Jiangsu. *Agriculture.* 2024. Vol. 14. № 7. P. 1017. https://doi.org/10.3390/agriculture14071017

Wong J. Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications (Second Edition). Academic Press, 2018. 880 p.

Xu J., Si L., Zhang X., Cao K., Wang J. Various green manure-fertilizer combinations affect the soil microbial community and function in immature red soil. *Frontiers in Microbiology.* 2023. Vol. 14. P. 1255056. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1255056

Yadav D., Kumawat A., Kumar P., Kumar S., Singh D., Kumar D. Chemical Fertilization to Green Manuring: Moving towards Sustained Production. *Farm Information Bureau.* 2021. Vol. 9. № 1. P. 15–19.

Zhang J., He W., Wei Z., Chen Y., Gao W. Integrating green manure and fertilizer reduction strategies to enhance soil carbon sequestration and crop yield: evidence from a two-season pot experiment. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* 2025. Vol. 8. 1514409. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1514409

Zhou M., Liu C., Wang J., Meng Q., Yuan Y., Ma X., Liu X., Zhu Y., Ding G., Zhang J., Zeng X., Du W. Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports.* 2020. Vol. 10. № 1. P. 265. https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1

References

DSTU 4115-2002. (2003). Grunty. Vyznachennia rukhomykh spoluk fosforu ta kaliiu modyfikovanym metodom Chyrykova (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the modified Chirikov method (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhavne vydavnytstvo standartiv Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU 4289:2004. (2005). Yakist gruntiv. Metody vyznachennia orhanichnoi rechovyny (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soil quality. Methods for determining organic matter (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU 4362:2004. (2005). Yakist gruntiv. Pokaznyky rodiuchosti gruntiv. (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soil quality. Soil fertility indicators. (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. Kyiv: Derzhavnyi spozhyvchyi standart Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU 4730:2007. (2007). Yakist gruntu. Vyznachennia hranulometrychnoho skladu metodom pipetky (modyfikovanyi N.A. Kachynskym) [Soil quality. Determination of granulometric composition by the pipette method (modified by N.A. Kachinsky)]. Ofitsiine vydannia. Kyiv: Derzhavnyi komitet z tekhnichnoho rehuliuvannia ta spozhyvchoi polityky Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU 7828:2015. (2016). Yakist gruntiv. Vyznachennia hrupovoho ta fraktsiinoho skladu humusu metodom Turyna v modyfikatsii Ponomarovoi ta Plotnikovoi. (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soil quality. Determination of the group and fractional composition of humus using the Turin method, modified by Ponomariova and Plotnikova. (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhavna sluzhba standartyzatsii ta spozhyvatstva Ukrainy, III. Nabuvaie chynnosti z 01.07.2016 [in Ukrainian].

DSTU 7863:2015. (2016). Yakist gruntu. Vyznachennia lehkohidrolizovanoho azotu metodom Kornfilda. (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soil quality. Determination of easily hydrolyzable nitrogen using the Kornfield method. (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhavna sluzhba standartyzatsii ta zakhystu prav spozhyvachiv Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU ISO 11277:2005. (2005). Yakist gruntu. Vyznachennia rozpodilu chastynok za rozmiramy v mineralnii chastyni gruntu. Metod prosiiuvannia ta osadzhennia (ISO 11277:1998, IDT) [Soil quality. Determination of particle size distribution in the mineral part of soil. Sieving and sedimentation method (ISO 11277:1998, IDT)]. Kyiv: Derzhavne vydavnytstvo standartiv Ukrainy [in Ukrainian].

Abdulraheem, M.I., & Tobe, O.K. (2022). Green manure for agricultural sustainability and improvement of soil fertility. *Farming & Management,* 7, 1–8. https://doi.org/10.31830/2456-8724.2022.FM-101 [in English].

Abiven, S., Menasseri-Aubry, S., Angers, D., & Leterme, P. (2008). A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Science Society of America Journal,* 72(1), 119–125. https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0018 [in English].

Amacher, M.C., & Perry, C.H. (2007). Soil vital signs: a new soil quality index (SQI) for assessing forest soil health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station [in English].

Ansari, M.A., Choudhury, B.U., Layek, J., Das, A., Lal, R., & Mishra, V.K. (2022). Green manuring and crop residue management: Effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India). *Soil Tillage Research.* 218, 105318. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105318 [in English].

AOAC (1995). Method 900.02, 934.01, 954.02, 955.04, 960.05. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th Edition, AOAC International, Virginia [in English].

Askari. M.S., & Holden, N.M. (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research,* 150, 57–67. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.010 [in English].

ASTM-D854 (2010). Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM [in English].

Borek, Ł. (2019). The use of different indicators to evaluate chernozems fluvisols physical quality in the Odra River valley: a case study. *Polish Journal of Environmental Studies,* 28(6), 4109–4116 [in English].

Brown, C. (2021). Available Nutrients and Value for Manure from Various Livestock Types. Factsheet № 21077. AGDEX 538. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Queen's Printer for Ontario [in English].

Carter, M.R., & Gregorich, E.G. (2008). Soil sampling and methods of analysis. 2nd edition. Edited by MR Carter and EG Gregorich. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis [in English].

Chaudhry, H., Vasava, H.B., Chen, S., Saurette, D., Beri, A., Gillespie, A., & Biswas, A. (2024). Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility. *Sensors (Basel),* 24(3), 864. https://doi.org/10.3390/s24030864 [in English].

Choudhary, M., Sinha, N.K., Mohanty, M., Jayaraman, S., Kumari, N., Jyoti, B., Srivastava, A., Thakur, J.K., Kumar, N., & Jha, P. (2023). Response of Contrasting Nutrient Management Regimes on Soil Aggregation, Aggregate-Associated Carbon and Macronutrients in a 43-Year Long-Term Experiment. *Sustainability,* 15, 2679. https://doi.org/10.3390/su15032679 [in English].

Clark, A. (2008). Managing cover crops profitably. DIANE Publishing (3rd ed.) [in English].

Composts & Fertilisers. (2023). NPK Nutritional Values of Animal Manures & Compost Etc. [Electronic resource] URL: https://www.allotment-garden.org/composts-fertilisers/npk-nutritional-values-animal-manures-compost/#google_vignette (access date 14.10.2025) [in English].

Creamer, N.G., & Baldwin, K.R. (1997). Summer Cover Crops. HIL-37. Department of Horticultural Science, Raleigh, NC [in English].

Dai, W., Feng, G., Huang, Y., Adeli, A., & Jenkins, J.N. (2024). Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. *Soil & Tillage Research,* 244, 106197. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106197 [in English].

Das, K., Biswakarma, N., Zhiipao, R., Kumar, A., Ghasal, P.C., & Pooniya, V. (2020). Significance and Management of Green Manures. In: Giri, B., Varma, A. (eds) Soil Health. *Soil Biology*, 59, 197–217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_12 [in English].

De Willigen, P., Janssen, B.H., Heesmans, H.I.M., Conijn, J.G., Velthof, G.J., & Chardon, W.J. (2008). Decomposition and accumulation of organic matter in soil. Comparison of some models. Wageningen, Alterra, *Alterra-rapport,* 1726 [in English].

Deus, T.R.V. de, Giongo, V., Salviano, A. M., Santana, M. da S., Silva, V.C., & da Santos, T.C. dos (2022). Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais,* 57(3), 409–421. https://doi.org/10.5327/Z2176-94781268 [in English].

Dey, D., & Nath, D. (2015). Assessment of change in soil properties, nutrient availability and yield of paddy as influenced by cultivation of green manuring crop. *Asian Journal of Soil Science,* 10(1), 158–161. https://doi.org/10.15740/HAS/AJSS/10.1/158-161 [in English].

Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S.A. (2012). A Review of the Methods Available for Estimating Soil Moisture and Its Implications for Water Resource Management. *Journal of Hydrology,* 458, 110–117. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021 [in English].

Edlinger, A., Garland, G., Banerjee, S., Degrune, F., García-Palacios, P., Herzog, C., Pescador, D.S., Romdhane, S., Ryo, M., Saghai, A., Hallin, S., Maestre, F.T., Philippot, L., Rillig, M.C., & van der Heijden, M.G.A. (2023). The impact of agricultural management on soil aggregation and carbon storage is regulated by climatic thresholds across a 3000 km European gradient. *Global Change Biology,* 9(11), 3177–3192. https://doi.org/10.1111/gcb.16677 [in English].

Florentín, M.A., Peñalva, M., Calegari, A., Translated, R.D., & Mcdonald, M.J. (2010). Green Manure/Cover Crops and Crop Rotation in Conservation Agriculture on Small Farms. *Integrated Crop Management*: Rome, Italy 12 [in English].

Gould, S. (2024). A guide to soil moisture. [Electronic resource] URL: https://connectedcrops.ca/the-ultimate-guide-to-soil-moisture/ (access date 14.10.2025) [in English].

Hansen, V., Eriksen, J., Jensen, L.S., Thorup-Kristensen, K., & Magid, J. (2021). Towards integrated cover crop management: N, P and S release from aboveground and belowground residues. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 313. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107392 [in English].

Iheshiulo, E.M.-A., Larney, F.J., Hernandez-Ramirez, G., St Luce, M., Chau, H.W., & Liu, K. (2024). Quantitative evaluation of soil health based on a minimum dataset under various short-term crop rotations on the Canadian prairies. *Science of the Total Environment*, 935, 173335. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173335 [in English].

Indoria, A.K., Sharma, K.L., Srinivas, K., Lal, M., Prasad, J.V.N.S., Gopinath, K.A., Sharma, S.K., Pratibha, G., Kundu, S., Singh, V.K., & Rao, K.V. (2025). Effect of Long-Term Application of Different Organic Resources on Soil Properties and Soil Quality Index of an Aridisol Under Mustard System. *Acta Scientific Agriculture,* 9.2, 04–13. https://doi.org/10.31080/ASAG.2025.09.1455 [in English].

Israt, I.J., & Parimal, B.K. (2023). Residual Effect of Green Manure on Soil Properties in Green Manure-Transplant Aman-Mustard Cropping Pattern. *Indian Journal of Agricultural Research,* 57(1), 67–72. https://doi.org/10.18805/IJARe.AF-696 [in English].

Krishnan, R., & Sivakumar, V.L. (2024). The Effect of Soil-Structure Interaction (SSI) on Structural Stability and Sustainability of RC Structures. *Civil and Environmental Engineering Reports,* 34(1), 116–136. https://doi.org/10.59440/ceer/184254 [in English].

Kucerik, J., Brtnicky, M., Mustafa, A., Hammerschmiedt, T., Kintl, A., Sobotkova, J., Alamri, S., Baltazar, T., Latal, O., Naveed, M., Malicek, O., & Holatko, J. (2024). Utilization of Diversified Cover Crops as Green Manure-Enhanced Soil Organic Carbon, Nutrient Transformation, Microbial Activity, and Maize Growth. *Agronomy,* 14(9), 2001. https://doi.org/10.3390/agronomy14092001 [in English].

Lei, B., Wang, J., & Yao, H. (2022). Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*, 12(2), 223. https://doi.org/10.3390/agriculture12020223 [in English].

Li, W.G., Yang, X.X., Huang, C.G., Xue, N.W., Xia, Q., Liu, X.L., Zhang, X.Q., Yang, S., Yang, Z.P., & Gao, Z.Q. (2019). Effects of rapeseed green manure on soil fertility and bacterial community in dryland wheat field. *Agricultural Sciences in China,* 52, 2664–2677 [in English].

Lim, J.E., Lee, S.S., Jeong, S.H., Lee, B.M., Lee, Y.H., Choi, Y.B., & Ok, Y.S. (2012). Effects of green manure incorporation method on soil physicochemical properties. *Journal of agricultural, life and environmental sciences,* 24, 1–7 [in English].

Liu, X.H., Zhou, X., Deng, L.C., Fan, L.Y., Qu, L., & Li, M. (2020). Decomposition characteristics of rapeseed green manure and effect of nutrient release on soil fertility. *Hunan Agricultural Science,* 416, 39–44 [in English].

Naz, A., Rebi, A., Naz, R., Akbar, M. U., Aslam, A., Kalsom, A., Niaz, A., Ahmad, M.I., Nawaz, S., Kausar, R., Ali, B., Saleem, M.H., & Zhou, J. (2023). Impact of Green Manuring on Health of Low Fertility Calcareous Soils. *Land,* 12(3), 546. https://doi.org/10.3390/land12030546 [in English].

Ma, D., Yin, L., Ju, W., Li, X., Liu, X., Deng, X., & Wang, S. (2020). Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crop Research*, 266, 108146. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108146 [in English].

Park, S., & Lee, J.-G. (2025). Green manure improves humification and aggregate stability in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry,* 206, 109796. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109796 [in English].

Rani, T.S., Umareddy, R., Ramulu, C., & Kumar, T.S. (2021). Green Manurs and Grean leaf manures for soil fertility improvement: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry,* 10(5), 190–196 [in English].

Razanov, S., Ovcharuk, V., Krasnyak, O., Bakhmat, M., & Bakhmat, O. (2021). Agroecological assessment of green manures grown from winter grain harvest lost in the conditions of the right-bank Forest-steppe of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science,* 11(4), 895–902. https://doi.org/10.31407/ijees11.429 [in English].

Silva, G.T.A., Matos, L.V., Nóbrega, P. de O., Carneiro, E.F., Resende, A.S., & de Resende. (2008). Chemical composition and decomposition rate of plants used as green manure. *Scientia Agricola,* 65(3), 298–305. https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000300010 [in English].

Singh, D., Devi, K.B., Ashoka, P., Bahadur, R., Kumar, N., Devi, O.R., & Shahni, Y.S. (2023). Green Manure: Aspects and its Role in Sustainable Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change,* 13(11), 39–45. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113142 [in English].

Spasić, M., Vaceka, O., Vejvodováa, K., Tejneckýa, V., Poláka, F., Borůvkaa, L., & Drábek, O. (2023). Determination of physical properties of undisturbed soil samples according to V. Novák. *MethodsX,* 10, 102133. https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102133 [in English].

Stroud, J.L., Kemp, S.J., & Sturrock, C.J. (2024). The effect of organic matter amendments on soil surface stability in conventionally cultivated arable fields. *Soil Use and Management,* 40, e12985. https://doi.org/10.1111/sum.12985 [in English].

Suon, M., Tith, S., Veu, T., Voe, P., Ngy, S., Hill, S., & Chheang, C. (2023). The Effects of Green Manure on Sustainable Agriculture Soil Conservation under Open Field Conditions, *International Journal of Environmental and Rural Development,* 14(1), 147–152. https://doi.org/10.32115/ijerd.14.1_147 [in English].

Toungos, M.D., & Bulus, Z.W. (2019). Cover crops dual roles: Green manure and maintenance of soil fertility, a review. *International Journal of Innovative Agriculture and Biology Research*, 7(1), 47–59 [in English].

Tsytsiura, Y. (2024a). Evaluation of Ecological Adaptability of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) Biopotential Realization in the System of Criteria for Multi-Service Cover Crop. *Journal of Ecological Engineering,* 25(7), 265–285. https://doi.org/10.12911/22998993/188603 [in English].

Tsytsiura, Y. (2024b). Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* l. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research,* 22(2), 1026–1070. https://doi.org/10.15159/AR.24.086 [in English].

Tsytsiura, Y. (2025). Ecological adaptive tactics of oil radish root formation at different terms of green manure application. *Journal of Ecological Engineering,* 26(9), 420–439. https://doi.org/10.12911/22998993/205413 [in English].

Uthappa, A.R., Devakumar, A.S., Das, B., Mahajan, G.R., Chavan, S.B., Jinger, D., Jha, P.K., Kumar, P., Kokila, A., Krishnamurthy, R., Mounesh, N.V., Dhanush, C., Ali, I., Eldin, S.M., Al-Ashkar, I., Elshikh, M.S., & Fahad, S. (2024). Comparative analysis of soil quality indexing techniques for various tree based land use systems in semi-arid India. *Frontiers in Forests and Global Change,* 6, 1322660. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1322660 [in English].

Wang, H., Zhong, L., Liu, J., Liu, X., Xue, W., Liu, X., Yang, H., Shen, Y., Li, J., & Sun, Z. (2024). Systematic Analysis of the Effects of Different Green Manure Crop Rotations on Soil Nutrient Dynamics and Bacterial Community Structure in the Taihu Lake Region, Jiangsu. *Agriculture,* 14(7), 1017. https://doi.org/10.3390/agriculture14071017 [in English].

Wong, J. (2018). Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications (Second Edition). Academic Press [in English].

Xu, J., Si, L., Zhang, X., Cao, K., & Wang, J. (2023). Various green manure-fertilizer combinations affect the soil microbial community and function in immature red soil. *Frontiers in Microbiology,* 14, 1255056. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1255056 [in English].

Yadav, D., Kumawat, A., Kumar, P., Kumar, S., Singh, D., & Kumar, D. 2021). Chemical Fertilization to Green Manuring: Moving towards Sustained Production. *Farm Information Bureau,* 9(1), 15–19 [in English].

Zhang, J., He, W., Wei, Z., Chen, Y., & Gao, W. (2025). Integrating green manure and fertilizer reduction strategies to enhance soil carbon sequestration and crop yield: evidence from a two-season pot experiment. *Frontiers in Sustainable Food Systems,* 8, 1514409. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1514409 [in English].

Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Ma, X., Liu, X., Zhu, Y., Ding, G., Zhang, J., Zeng, X., & Du, W. (2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports,* 10(1), 265. https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1 [in English].

Отримано: 20.10.2025
Прийнято: 18.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

ЕКОЛОГІЯ

UDC 574.5 + 523.3
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.25

PROSPECTS AND RISKS OF USING LUNAR REGOLITH TO FORM ISOLATED ECOSYSTEMS

I. V. Khomiak[1]

The study investigates the potential for cultivating agricultural crops in lunar regolith from the lunar seas. The research utilized the ETL-1 lunar regolith simulant, "Celesta F1" radish seeds, "Gulyaipilsky" garlic cloves, and "Lidiya" peppermint rhizomes. Control experiments were conducted on pure quartz sand and the universal potting soil mix "Eco plus, Peatfield". The aim of the work is to explore the potential of lunar regolith as an edaphic basis for isolated ecosystems within future lunar bases. In line with this aim, the following objectives were set: to study the potential of using the ETL-1 lunar regolith simulant for crop germination; to model the potential for spontaneous ecosystem transformations with the ETL-1 lunar regolith simulant as the edaphic basis; to predict the dynamics of agroecosystem processes using the ETL-1 lunar regolith simulant as the edaphic basis. The ETL-1 lunar regolith simulant is capable of supporting the germination of seeds and the initial development of seedlings (from bulbs or rhizomes) for a short period. A correlation exists between the nutrient reserves in the seeds or seedlings and their growth performance on the ETL-1 lunar regolith simulant. The low albedo and granulometric structure of the lunar regolith result in water loss while simultaneously promoting its retention within the substrate's capillary structure. Untreated regolith, without the addition of mineral nutrients to the irrigation system, is suitable for growing short-season crops primarily for young sprouts (microgreens). Furthermore, regolith is susceptible to colonization by microorganisms, including pathogenic bacteria and fungi. There is also a risk of introducing aggressive weed seeds into the regolith system.

Key words: *invasive species, self-renewal of vegetation, Moon colonization, astroecoogy.*

ПЕРСПЕКТИВИ ТА РИЗИКИ ВИКОРИСТАННЯ МІСЯЧНОГО РЕГОЛІТУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ІЗОЛЬОВАНИХ ЕКОСИСТЕМ

І. В. Хом'як

Робота присвячена дослідженню потенціалу вирощування сільськогосподарських культур на місячному реголіті місячних морів. Для роботи використано симуляцію місячного реголіту ETL-1, насіння редиски «Селеста F1», зубчики часнику сорту «Гуляйпільський» та кореневища м'яти перцевої сорту «Лідія». Контрольний експеримент проводився на чистому кварцовому піску

[1] Doctor of Biological Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Ecology and Geography
(Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr)
e-mail: ecosystem_lab@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0080-0019

й універсальній ґрунтовій суміші "Eco plus, Peatfield". Метою роботи є дослідження потенціалу місячного реголіту як едафічної основи для ізольованих екосистем місячних баз. Відповідно до мети було поставлено такі завдання: провести дослідження потенціалу використання імітації місячного реголіту ETL-1 для пророщування сільськогосподарських культур; змоделювати потенціал спонтанних перетворень екосистем з едафічною основою симуляції місячного реголіту ETL-1; спрогнозувати процеси динаміки агроекосистем з едафічною основою симуляції місячного реголіту ETL-1. Симулятор місячного реголіту ETL-1 здатний забезпечити проростання насіння та саджанців у вигляді цибулини або кореневища та підтримувати їхній розвиток протягом короткого часу. Існує залежність між запасами поживних речовин у насінні чи саджанцях та показниками їхнього росту на симуляторі місячного реголіту ETL-1. Низьке альбедо та гранулометрична структура місячного реголіту призводять до втрати води, її перебування в капілярній структурі субстрату. Реголіт без обробки та додавання в систему зрошення мінеральних елементів живлення придатний для вирощування культур з коротким часом вегетації заради молодих проростків (мікрозелені). Реголіт є вразливим для заселення мікроорганізмами, зокрема й патологічними бактеріями та грибами. Також існує ризик занесення на реголіт насіння злісних бур'янів.

Ключові слова: *інвазійні види, самовідновлення рослинності, колонізація Місяця, астроекологія.*

Introduction

The second decade of the 21st century can be characterized as the beginning of a new race for lunar exploration. The first Moon Race, which spanned from 1957 to 1975, was a political competition between the USA and the USSR. The current competition is economic and strategic in nature.

The Moon is now viewed as a promising industrial base, a source of rare mineral resources, and a reliable monitoring platform for research. It offers far greater potential for these functions than existing orbital stations. This is primarily due to the availability of a large number of materials that can be used for the station's construction and operation, as well as for manufacturing (Хом'як, 2021). Recent successes in thermonuclear energy have generated heightened interest in minerals containing ^{3}He. On Earth, it is present in very small quantities, with only a few grams being extracted annually. The surface layers of the lunar regolith, however, contain significantly higher concentrations. Despite intense debate regarding the practical feasibility and commercial viability of utilizing these minerals, the USA, China, Russia, India, Japan, EU nations, and many others have commenced active preparations for lunar colonization (Khomiak et al., 2024b).

In 2020, the governments of the USA, Australia, Canada, Japan, Luxembourg, Italy, the United Kingdom, the United Arab Emirates, Ukraine, and Brazil signed an agreement on the coordination of efforts in lunar exploration. The accord outlines the principles of cooperation in the civilian research and peaceful use of the Moon, Mars, comets, and asteroids. Current national and international programs driving this effort include the Artemis and CLPS (Commercial Lunar Payload Services) initiatives in the USA, Chang'e in China, Terrae Novae and Lunar Pathfinder in the EU, Chandrayaan and SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) in India, and KPLO (Korea Pathfinder Lunar Orbiter) in South Korea.

The ultimate objective of these programs is the establishment of permanently operating research and production bases on the lunar surface. This goal is not a distant prospect; national schedules project the creation of these bases in the near future. Under the US Artemis program, this is anticipated by 2030, while the Sino-Russian ILRS (International Lunar Research Station) project is targeted for the 2031–2035 timeframe.

The initial, nominally research-oriented bases are projected to be established on the Moon by the end of the next decade. Subsequently, these will evolve into large-scale industrial centers, hosting dozens, potentially hundreds, of personnel. Oxygen and water can be provided to the inhabitants either from lunar minerals and rock processing or through comprehensive recycling systems. However, food will necessitate on-site cultivation or continuous supply from Earth. The latter, shipping food supplies to the Moon, would significantly escalate the overall production cost of all goods manufactured there.

The internal environments of these lunar bases align with Eugene Odum's definition of "Urban-industrial ecosystems". Consequently, all general processes governing the dynamics and functioning of these spaces will adhere to the fundamental principles of ecosystem theory (Бондар і Хом'як, 2021). Spontaneous ecological dynamic pro-

cesses, which will require rigorous monitoring and control, are anticipated. These environments will comprise both residential and production areas conforming to Odum's industrial ecosystem classification, alongside agroecosystems that fall under the category of subsidized man-made ecosystems. The latter are intended to serve as the primary source of food provision for the station's inhabitants (Kozyrovska et al., 2006).

It can be hypothesized that the lunar bases will be situated in the circumpolar region of the near side of the Moon. Mare Frigoris is considered an ideal location by many experts. It is composed of rocks highly analogous to terrestrial basalts. The surface is covered by regolith, and only on very steep crater walls and within lava tubes do native bedrock formations occasionally outcrop.

The regolith formed over 4.6 billion years due to continuous bombardment by micrometeorites, solar radiation, and extreme temperature fluctuations. Impact destruction and subsequent melting, followed by rapid freezing, create sharp-edged, glassy agglutinates, somewhat resembling terrestrial tektites. In the lunar seas, the regolith layer can reach a depth of 4–5 meters. Notably, mare regolith exhibits a higher content of basalt, fully analogous to its terrestrial counterpart.

The regolith is composed of coarse grains, up to 1 cm in diameter, and lunar dust, the majority of which has a diameter less than 1 mm. It is dominated by oxygen and silicon, with a significant presence of iron, calcium, aluminium, and magnesium. Unlike terrestrial sedimentary rocks, iron in the lunar regolith exists in the Fe0 and Fe +2 oxidation states due to the absence of prolonged contact with high concentrations of oxygen and water. This characteristic further links the mare regolith to terrestrial basalt. The primary distinction is the high mass fraction of FeO (ferrous oxide) in lunar regolith, which reaches 17–22% (Gibson, 1977).

Lunar regolith is being considered as a potential construction material and a substrate for cultivating plants (Baur et al., 1974). Preliminary research has demonstrated both the potential for such applications and the inherent challenges. The main difficulties include the separation of regolith components by particle size, the oxidation of iron, and the removal of heavy metals. Furthermore, there is a risk of spontaneous colonization by organisms in such substrates. These include various microorganisms and, in the future, potential pest species for cultivated crops or parasites directly hazardous to human health.

The experimental investigation of processes occurring within ecosystems that utilize lunar regolith as their edaphic foundation is a highly relevant task in modern astroecology. A critical need for conclusions based on this research may arise within the next decade (Wamelink et al., 2014).

Currently, lunar regolith simulants are employed for these experiments. One of the most popular simulants today is JSC-1 (Johnson Space Center Number One) (Rickman et al., 2007). Regolith simulants are typically identified by three-letter acronyms indicating the organization that developed or distributes them. Many of these simulants face criticism for their low fidelity to the original material. For instance, Larry Taylor has highlighted issues concerning the lack of quality control and inflated pricing (Taylor et al., 2016).

This study aims to investigate the potential of lunar regolith as an edaphic basis for isolated ecosystems within future lunar bases.

In accordance with this aim, the following objectives were established:

– To research the potential of utilizing the ETL-1 lunar regolith simulant for the germination of crops.

– To model the potential for spontaneous transformations of ecosystems utilizing the ETL-1 lunar regolith simulant as the edaphic basis.

– To forecast the processes of agroecosystem dynamics with the ETL-1 lunar regolith simulant serving as the edaphic basis.

Material and methods

The ETL-1 lunar regolith simulant was employed for the experimental phase of this study. This simulant comprised five distinct mass fractions of crushed tholeiitic basalt and quartz sand (Table 1). Each fraction constituted 20% of the mixture by mass. The quartz sand component accounted for 50% of the fifth fraction's mass, translating to 10% of the total simulant mass (Fackrell et al., 2024).

The basalt was pulverized using a mechanical impact method (with a force range of 200–500 N), which yielded sharp-edged fragments of varying sizes. The granulometric composition of the substrate was determined using a KP-131 sieve set. Control experiments were executed using pure quartz sand and the universal soil mixture "Eco plus, Peatfield".

Three species of cultivated plants were utilized for the experiment: "Gulyaipilsky" garlic, "Lidiya" peppermint, and "Celesta F1" radish.

Table 1

Composition of the ETL-1 lunar regolith simulator

Rock	Fragment diameter (mm)	Mass fraction (%)
Tholeiitic basalt	15–25	5
Tholeiitic basalt	5–15	5
Tholeiitic basalt	2–5	25
Tholeiitic basalt	1–2	25
Tholeiitic basalt	<1	25
Quartz sand	0,2–1	10

"The "Gulyaipilsky" garlic (alternatively known as Ukrainian White Gulyaipilsky) is a versatile, high-yielding spring variety of Ukrainian selection, distinguished by its excellent long-term storage capacity and non-bolting characteristic. Although typically considered a spring variety, it tolerates autumn planting well and produces satisfactory yields. It is a mid-season variety with a vegetation period of 100–120 days. This garlic variety demonstrates high productivity, yielding up to 5–5,5 tonnes per hectare (or 0,34–1,2 kg/m^2). The bulb is flattened-round and dense, with an average weight of 20–37 g, though larger specimens can reach 140 g. Each bulb contains 6–10 cloves in smaller examples and 12–16 cloves in larger ones, with individual cloves weighing 8–15 g. A key feature is its non-bolting nature, which significantly simplifies cultivation as scapes do not require removal. It exhibits excellent dormancy; well-cured bulbs can be stored for 10–11 months (until the new harvest) with minimal loss of quality. The variety shows good resistance to some common diseases, such as nematodes and Fusarium wilt, making it a viable candidate for planting in the isolated agroecosystems of lunar space stations.

The «Lidiya» peppermint variety is a hybrid distinguished by a pronounced citrus note in its flavor and aroma. This perennial, spicy-aromatic herbaceous plant is widely utilized in culinary applications, beverages, and for medicinal purposes. The shrub is branched and upright, frequently forming dense clumps, reaching a height of 40–50 to 80 cm. Stems are quadrangular, greenish with a slight violet tint along the edges. The leaves are large, ovate or oval-lanceolate with serrated margins, and a rich dark-green color. The horizontally oriented rhizome ensures rapid spreading and the formation of dense stands. The period until the first harvest is approximately 25–30 days after emergence. The plant prefers partial shade but can tolerate full sun provided there is adequate irrigation. In intense sunlight, the leaves may become less succulent, whereas in deep shade, the plant tends to become etiolated. It thrives in fertile, moist, and well-drained soils, necessitating regular and ample watering, particularly during hot periods. The species is prone to aggressive proliferation via its rhizomes. To control its spread in a garden setting, the use of root barriers or container cultivation is recommended. Conversely, its propagation capability via the rhizome makes it a promising candidate species for the terraforming of colonized planetary bodies (Khomiak et al., 2024a).

The "Celesta F1" radish variety is an extra-early and highly adaptable hybrid of Dutch breeding (Enza Zaden), recognized as one of the most reliable varieties for all-season cultivation. It is valued for its rapid maturation and high resistance to adverse conditions. This hybrid (F1), which is of the round or Sora type, is very early-maturing, with harvests achievable 20–25 days after mass emergence. It can be cultivated successfully across any season, from early spring through autumn. Yields typically range from 30–40 t/ha (or 3–4 kg/m^2). The root shape is round or oblate-spherical, with a diameter of 3–4 cm. The average root weight is 20–25 g, reaching a maximum of 30–35 g. The root is bright, saturated red with thin, smooth skin; the color remains stable after washing. Internally, the structure features a snow-white, crisp, and succulent flesh. The root does not coarsen or develop pithiness or internal fissures, even when overgrown or subjected to stress. The cultivation of radishes and other cultivated cruciferous species has a long history of research under microgravity conditions. The primary advantages of the "Celesta F1" hybrid lie in its high plasticity and resistance to external stressors. The species exhibits strong resistance to bolting (stem formation) and cracking. It possesses high field resistance to downy mildew (Peronospora) and slimy bacteriosis. This species is well-studied, having been investigated both aboard the Mir Space Station and the International Space Station (ISS).

For the experimental procedure, garlic was planted in the experimental and control substrates using one clove per replicate. Peppermint was planted using rhizome fragments 2–3 cm in length, each containing a single bud. Radish was sown using one seed per replicate. The substrates were placed in 100 ml conical polyethylene cells at a depth of 1 cm. Until the emergence of the first shoots, the cells were covered with a thin polyethylene film to maintain humidity. After emergence, the plants were transferred to a lighted location. Illumination levels fluctuated between 2,000 and 5,000 lux over a 12-hour photoperiod, with an increase to 30,000 lux for a 2-hour interval each day. The temperature was maintained within a range of 18 ℃ (dark period) to 23 ℃ (light period). The substrate was heavily irrigated with distilled water twice daily at 9-hour intervals.

During the observation period, plant growth metrics (such as height) and the number of leaves were recorded. The resulting data underwent statistical analysis using Microsoft Math Solver, with graphical growth models constructed in Microsoft Excel.

Results

The study's findings demonstrated variations in both the timing of initial emergence and the rates of subsequent development and senescence (die-off). Significant differences were also observed between the experimental group and the first and second control groups.

The initial sprouts of *Raphanus sativus* variety "Celesta F1" emerged five days post-planting in both the soil and quartz sand substrates. This is consistent with the varietal characteristics, which specify an emergence period of 3–7 days, typically occurring within 3−5 days at temperatures ranging from +15 to +20 ℃. Conversely, the regolith simulant exhibited a delay in germination, with emergence occurring only after eight days. This delay can be attributed to differences in the capillary and gravitational water cycling mechanisms across the substrates. Soil possesses multiple components, including appropriately sized particles and polymers like humic acids, that enhance moisture retention. While quartz sand lacks these retention mechanisms and functions as a well-drained substrate, it benefits from a high albedo (0,45), resulting in less intensive solar heating.

The regolith simulant, despite its finer particles, exhibits a tendency for its smallest fraction (mean size 27 μm) to cement together. This characteristic, while potentially beneficial for the future construction of lunar bases, presents a challenge for the use of unprocessed regolith in plant cultivation. The low albedo of basalt (ranging from 0,11 to 0,12) promotes its exacerbated heating. This combination of fragment cementation and strong solar heating contributes to moisture loss under the chosen irrigation regime.

The initial sprouts of *Allium sativum* variety "Gulyaipilsky" emerged on the 16th day. Emergence was observed across both control and experimental plots. The primary difference was in the germination rate (quantity of plants that sprouted): 100% success in the soil substrate, 30% in the sand, and 50% in the regolith simulant. In this particular scenario, moisture was not the governing factor, as the cloves possessed sufficient internal reserves. The key variables were the interaction between heat and humidity. Although the moisture content of the sand decreased to levels comparable to the regolith, the sand's temperature was also lower.

A similar trend was observed in the *Mentha piperita* experiment. Initial emergence occurred on the sixth day. However, the percentage of successful sprouting was 80% in the soil, 60% in the sand, and only 50% in the regolith simulant. Two weeks later, this distribution shifted to 90, 70, and 50%, respectively. All plants experienced significant overgrowth (senescence onset) in the soil only after 21 days. Conversely, sprouts in both the sand and regolith simulant began to die off. Only 20% of the living individuals remained in the sand, while all individuals in the regolith simulant perished.

Regarding the change in sprout dimensions, several non-linear patterns were observed. In the sand substrate, 100% of *Raphanus sativus* seeds germinated, with the mean sprout height on the first day of observation being 6,55 cm. Conversely, in the soil, only 80% of seeds had germinated by that day, with a mean height of 7,88 cm. Thus, the variety exhibited different germination rates in soil (80%) and sand (100%).

By the third week, the number of live individuals in the sand had decreased to 30%. Mean sprout size increased to 9,5 cm, with some individuals reaching 11,6 cm. By the fourth week, all individuals in both the sand and regolith simulant substrates had perished. In the regolith simulant, 80% of individuals had germinated by the third week, with a mean height of 1,1 cm. The highest germination success in the regolith was recorded on

Day 21 at 90% of individuals, with an average height of 1,5 cm.

The mean height of *Allium sativum* on the first day of emergence was 8,43 cm for 100% of seedlings in the soil, compared to 6,04 cm for 50% of seedlings in the regolith. By the experiment's conclusion (45 days), 40% of individuals remained viable in the sand (mean height 6,88 cm), 100% survived in the soil (mean height 16,64 cm), and 60% survived in the regolith simulant (mean height 9,8 cm).

For *Mentha piperita*, the mean size of new shoots at the onset of sprouting was 2,46 mm (soil), 1,45 mm (sand), and 7,8 mm (regolith simulant). At the point of maximum sprouting in the regolith simulant (Day 12), the soil maintained 100% viability (mean new shoot height 5,01 mm), the sand had 70% viability (mean height 3,72 mm), and the regolith simulant had 50% viability (mean height 9,12 mm). By Day 22, live individuals remained only in the soil substrate, where their height ranged from 6,5 to 13,5 cm until the end of the experiment. No live individual was recorded in the regolith simulant from Day 21 onwards.

This suggests that the regolith simulant is initially more conducive to the rapid development of *Mentha piperita* seedlings than either sand or soil, but it is incapable of providing sufficient essential nutrients for sustained growth.

Despite measures implemented to prevent the introduction of other species, a crust of cyanobacteria was observed on the regolith surface in some instances, alongside the germination of several weed species. These included *Galinsoga parviflora* Cav., *Portulaca oleracea* L., and *Sonchus arvensis* L.

Discussion

Experiments utilizing lunar regolith simulants, conducted by researchers since the original Moon Race, primarily sought to establish the absence of toxic effects on plant growth. Standard model organisms, such as *Arabidopsis thaliana* and *Tagetes patula*, were frequently employed (Paul et al., 2022). These early experiments indicated no significant negative impacts on the model organisms (Ferl & Paul, 2010).

In 2022, Bill Keeter reported on the germination of *Arabidopsis thaliana* using original lunar soil retrieved by the Apollo missions (Keeter, 2022). Although the plants successfully sprouted and developed into seedlings, they were not as robust as control samples grown in volcanic ash. Furthermore, the experiments revealed variations in plants grown in regolith based on the sample collection site: *Arabidopsis thaliana* grown in regolith from the Apollo 12 and Apollo 17 missions were more vigorous than those grown in samples from Apollo 11 (Baur et al., 1974).

Beyond hypothetical toxicity, other factors influence the potential of lunar regolith for crop cultivation. It is crucial to select only the regolith components that promote optimal capillary moisture formation. These particles should be analogous to terrestrial loess, yielding a mixture composed of particles sized 0,05 to 0,005 mm (up to 60%), less than 0,005 mm (up to 10–20%), and 0,1–0,25 mm (up to 7%). Coarser and finer particles could be repurposed for construction needs.

The irrigation system for the regolith substrate must account for its heating properties and granulometric composition. Watering should be more frequent, and water temperature should be adjusted based on the light regime. During periods of maximum insolation, the moisture volume should be higher and its temperature lower. Drip irrigation is recommended for operational agroecosystems.

A critical factor for growing crops in lunar regolith is the reserve of nutrients and moisture within the seeds and seedlings (Zaets et al., 2011). This reserve enables better tolerance of unfavorable environmental conditions. Nutrient stores are typically higher in bulbs and tubers than in rhizomes, simplifying their initial germination (Ellery, 2021). However, rhizomatous species hold significant promise for future terraforming efforts (Черняєва і Хом'як, 2021).

Even without supplementing the regolith with additional mineral substances, it is suitable for growing microgreens (Duri et al., 2022), primarily those that possess sufficient nutrient reserves in their seeds or vegetative propagules (bulbs, tubers, etc.). For cultivated plants with fine seeds, the use of classical hydroponic solutions is necessary.

The ability of regolith to temporarily support the function and development of higher vascular plants indicates its potential as a substrate for numerous lower organisms (Castro et al., 2004), notably algae, bacteria, and fungi. Among these, there may be species that pose a risk to cultivated plants and the health and life of human inhabitants (Kral et al., 2004).

Conclusions

The ETL-1 lunar regolith simulant is capable of supporting the germination of seeds and seedlings (from bulbs or rhizomes) and sus-

taining their initial development for a short duration.

A correlation exists between the internal nutrient reserves present in the seeds or seedlings and their subsequent growth metrics on the ETL-1 lunar regolith simulant.

The low albedo and specific granulometric structure of the lunar regolith lead to water loss while simultaneously promoting its retention within the substrate's capillary structure.

Unprocessed regolith, without the addition of mineral nutrients to the irrigation system, is suitable for cultivating short-season crops primarily for young sprouts, or microgreens.

The regolith is vulnerable to colonization by microorganisms, including pathogenic bacteria and fungi. Furthermore, a risk exists regarding the inadvertent introduction of aggressive weed seeds into the regolith substrate.

Bibliography

Бондар С.С., Хом'як І.В. Тератрансформаційні стратегії освоєння незаселених субстратів. *Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції :* тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир : ЖДТУ, 2021. С. 16.

Хом'як І.В. Глобальні екологічні проблеми з точки зору астроекології. *Екологічні науки.* 2021. № 6(39). С. 154–157. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.26

Черняєва О.П., Хом'як І.В. Тератрансформаційний потенціал *Elymus repens* (L.) Gould. *Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції :* тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир : ЖДТУ, 2021. С. 18.

Baur P.S., Clark R.S., Walkinshaw C.H., Scholes V. E. Uptake and translocation of elements from Apollo 11 lunar material by lettuce seedlings. *Phyton.* 1974. Vol. 32. P. 133–142.

Castro V.A., Thrasher A.N., Healy M., Ott C.M., Pierson D.L. Microbial characterization during the early habitation of the International Space Station. *Microbial ecology*. 2004. Vol. 47. № 2. P. 119–126. https://doi.org/10.1007/s00248-003-1030-y

Duri L.G., Caporale A.G., Rouphael Y., Vingiani S., Palladino M., De Pascale S., Adamo, P. The potential for lunar and martian regolith simulants to sustain plant growth: a multidisciplinary overview. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences.* 2022. Vol. 8. P. 747821. https://doi.org/10.3389/fspas.2021.747821

Ellery A. Supplementing closed ecological life support systems with in-situ resources on the moon. *Life*. 2021. Vol. 11. № 8. P. 770. https://doi.org/10.3390/life11080770

Fackrell L. E. Humphrey S., Loureiro R., Palmer A.G., Long-Fox J. Overview and recommendations for research on plants and microbes in regolith-based agriculture. *npj Sustainable Agriculture*. 2024. Vol. 2. № 1. P. 15. https://doi.org/10.1038/s44204-024-00109-7

Ferl R.J., Paul A.L. Lunar Plant Biology : A Review of the Apollo Era. *Astrobiology*. 2010. Vol. 10. P. 261–274. https://doi.org/10.1089/ast.2009.0416

Gibson E.K. Volatile elements, carbon, nitrogen, sulfur, sodium, potassium and rubidium in the lunar regolith. *Phys Chem Earth.* 1977. Vol. X. P. 57–62.

Keeter B. Scientists grow plants in lunar soil. Ed. Bill Keeter. NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) 2025 [Електронний ресурс]. URL: https://www.nasa.gov/feature/biological-physical/scientists-grow-plants-in-soil-from-the-moon (дата звернення 15.07.2025).

Khomiak I.V., Onyshchuk I.P., Vasylenko O.M. Theoretical basis of classification of terraforming methods. *Екологічні науки.* 2024a. № 4(55). С. 234–237. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.38

Khomiak I., Onyschuk I., Khomiak O. Analysis of the relevance of astroecological research. *Екологічні науки.* 2024b. № 2. С. 35–38. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.5

Kozyrovska N.O., Lutvynenko T.L., Korniichuk O.S., Kovalchuk M.V., Voznyuk T.M., et al. Growing pioneer plants for a lunar base. *Advances in Space Research.* 2006. Vol. 37. P. 93–99. https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.07.085

Kral T.A., Bekkum C.R., McKay C.P. Growth of methanogens on a mars soil simulant. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. 2004. Vol. 34. P. 615–626. https://doi.org/10.1023/B:ORIG.0000043135.25309.43

Paul A.L., Smith D.P., Gigis P.J., Ferl J.B., Ferl R.L. Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration. *Communications Biology*. 2022. https://doi.org/10.1038/s42003-022-03513-z

Rickman D., McLemore C.A., Fikes J. *Characterization summary of JSC-1A bulk lunar mare regolith simulant.* 2007 [Електронний ресурс]. URL: http://www.orbitec.com/store/JSC-1A_Bulk_

Data_Characterization.pdf; http://www.orbitec.com/store/JSC-1AF_Characterization.pdf (дата звернення 28.08.2025).

Taylor L., Pieters C., Britt D. Evaluations of lunar regolith simulants. *Planetary and Space Science*. 2016. Vol. 126. P. 1–7. https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.03.015.

Wamelink G.W., Frissel J.Y., Krijnen W.H.J., Verwoert M.R. Can Plants Grow on Mars and the Moon: A Growth Experiment on Mars and Moon Soil Simulants. *PLOS One*. 2014. Vol. 9. № 8. P e103138. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103138

Zaets I., Burlak O., Rogutskyy I., Vasilenkoa A., Mytrokhyn O., et al. Bioaugmentation in growing plants for lunar bases. *Advances in Space Research*. 2011. Vol. 47. P. 1071–1078. https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.011

References

Bondar, S.S., & Khomyak, I.V. (2021). Teratransformatsiyni stratehii osvoyennya nezaselenykh substrativ [Terratransformational strategies for the development of uninhabited substrates]. *Stalyy rozvytok krayiny v ramkakh Yevropeyskoyi intehratsiyi [Sustainable development of the country within the framework of European integration].* Zhytomyr State Technological University, 16 [in Ukrainian].

Khomyak, I.V. (2021). Hlobalni ekolohichni problemy z tochky zoru astroekolohiyi [Global environmental problems from the perspective of astroecology]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences],* 6(39), 154–157. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.26 [in Ukrainian].

Chernyayeva, O.P., & Khomyak, I.V. (2021). Teratransformatsiynyy potentsial Elymus repens (L.) Gould [Terratransformational potential of *Elymus repens* (L.) Gould]. *Stalyy rozvytok krayiny v ramkakh Yevropeyskoyi intehratsiyi [Sustainable development of the country within the framework of European integration].* Zhytomyr State Technological University, 18 [in Ukrainian].

Baur, P.S., Clark, R.S., Walkinshaw, C.H., & Scholes, V.E. (1974). Uptake and translocation of elements from Apollo 11 lunar material by lettuce seedlings. *Phyton*, *32*, 133–142 [in English].

Castro, V.A., Thrasher, A.N., Healy, M., Ott, C.M., & Pierson, D.L. (2004). Microbial characterization during the early habitation of the International Space Station. *Microbial Ecology*, *47*(2), 119–126. https://doi.org/10.1007/s00248-003-1030-y [in English].

Duri, L.G., Caporale, A.G., Rouphael, Y., Vingiani, S., Palladino, M., De Pascale, S., & Adamo, P. (2022). The potential for lunar and martian regolith simulants to sustain plant growth: a multidisciplinary overview. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, *8*, Article 747821. https://doi.org/10.3389/fspas.2021.747821 [in English].

Ellery, A. (2021). Supplementing closed ecological life support systems with in-situ resources on the moon. *Life*, *11*(8), Article 770. https://doi.org/10.3390/life11080770 [in English].

Fackrell, L.E., Humphrey, S., Loureiro, R., Palmer, A.G., & Long-Fox, J. (2024). Overview and recommendations for research on plants and microbes in regolith-based agriculture. *npj Sustainable Agriculture*, *2*(1), Article 15. https://doi.org/10.1038/s44204-024-00109-7 [in English].

Ferl, R.J., & Paul, A.L. (2010). Lunar Plant Biology – A Review of the Apollo Era. *Astrobiology*, *10*(2), 261–274. https://doi.org/10.1089/ast.2009.0416 [in English].

Gibson, E.K. (1977). Volatile elements, carbon, nitrogen, sulfur, sodium, potassium and rubidium in the lunar regolith. *Physics and Chemistry of the Earth*, *10*, 57–62 [in English].

Keeter, B. (2025, May 12). Scientists grow plants in lunar soil. NASA (National Aeronautics and Space Administration) [Electronic resource] URL: https://www.nasa.gov/feature/biological-physical/scientists-grow-plants-in-soil-from-the-moon (access date 15.07.2025) [in English].

Khomyak, I.V., Onyshchuk, I.P., & Vasylenko, O.M. (2024a). Theoretical basis of classification of terraforming methods. *Ekolohichni nauky [Ecological sciences],* 4(55), 234–237. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.38 [in English].

Khomyak, I., Onyschuk, I., & Khomyak, O. (2024b). Analisys aktual'nosti astroekolohichnykh doslidzhen [Analysis of the relevance of astroecological research]. *Ekolohichni nauky [Ecological sciences],* 2, 35–38. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.5 [in English].

Kozyrovska, N.O., Lutvynenko, T.L., Korniichuk, O.S., Kovalchuk, M.V., Voznyuk, T.M., & Kordium, V.A. (2006). Growing pioneer plants for a lunar base. *Advances in Space Research*, *37*(1), 93–99. https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.07.085 [in English].

Kral, T.A., Bekkum, C.R., & McKay, C.P. (2004). Growth of methanogens on a mars soil simulant. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, *34*, 615–626. https://doi.org/10.1023/B:ORIG.0000043135.25309.43 [in English].

Paul, A.L., Smith, D.P., Gigis, P.J., Ferl, J.B., & Ferl, R.L. (2022). Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration. *Communications Biology*, *5*(1), Article 869. https://doi.org/10.1038/s42003-022-03513-z [in English].

Rickman, D., McLemore, C.A., & Fikes, J. (2007). *Characterization summary of JSC-1A bulk lunar mare regolith simulant*. ORBITEC. [Electronic resource] URL: http://www.orbitec.com/store/JSC-1A_Bulk_Data_Characterization.pdf; http://www.orbitec.com/store/JSC-1AF_Characterization.pdf (access date 28.08.2025) [in English].

Taylor, L., Pieters, C., & Britt, D. (2016). Evaluations of lunar regolith simulants. *Planetary and Space Science*, *126*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.03.015 [in English].

Wamelink, G.W.W., Frissel, J.Y., Krijnen, W.H.J., & Verwoert, M.R. (2014). Can plants grow on Mars and the Moon: A growth experiment on Mars and Moon soil simulants. *PLOS One*, *9*(8), e103138. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103138 [in English].

Zaets, I., Burlak, O., Rogutskyy, I., Vasilenkoa, A., Mytrokhyn, O., & Kozyrovska, N. (2011). Bioaugmentation in growing plants for lunar bases. *Advances in Space Research*, *47*(6), 1071–1078. https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.011 [in English].

Отримано: 30.10.2025
Прийнято: 09.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 556.114(477.52)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.26

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РІЧКИ СУМКА В МЕЖАХ СУМСЬКОГО РЕГІОНУ

Ю. С. Вакал[1], С. В. Мацак[2], Є. І. Безбородова[3]

У статті представлено результати комплексного дослідження гідрохімічних показників річки Сумка в межах Сумського регіону, а також здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів з чинними нормативами гранично допустимих концентрацій (ГДК). Актуальність дослідження зумовлена тим, що річка Сумка зазнає сильного антропогенного навантаження, унаслідок чого якість поверхневих вод з кожним роком зменшується. Стан водного об'єкта можна охарактеризувати як критичний: річка зазнає надмірного забруднення внаслідок потрапляння до неї стічних вод промислових підприємств, комунальних і приватних господарств, а також через діяльність сільськогосподарських підприємств. Це спричиняє заростання русла, обміління річки й надмірну евтрофікацію, яка спостерігається навіть неозброєним оком. Саме тому річка потребує постійного екологічного моніторингу та контролю за її станом. Упродовж 2025 року нами було проаналізовано низку гідрохімічних показників річки Сумка в межах Сумського району, зокрема водневий показник (pH), а також уміст таких йонів – нітритів, нітратів, фосфатів, хлоридів, сульфатів, флуоридів, йонів амонію та йонів феруму. За результатами дослідження встановлено перевищення вмісту флуоридів по всіх сезонах. Зафіксовано багаторазові перевищення вмісту нітрат-йонів, йонів феруму. В окремих пробах були перевищені допустимі кількості сульфатів, фосфатів та йонів амонію, але переважно ці показники перебували в межах норми протягом року. Усі інші показники стабільно були нижчими за ГДК. Також нами проаналізовано динаміку змін упродовж року показників, що багаторазово перевищували норми ГДК, а саме вмісту нітратів, флуоридів і йонів феруму. На нашу думку, фактором, що призвів до перевищення деяких показників, є антропогенна діяльність, а саме вплив сільськогосподарської діяльності, викиди комунальних і приватних підприємств. Отримані дані можна використати для розробки рекомендацій щодо охорони водного об'єкта й покращення стану якості вод річки Сумки.

Ключові слова: *річка Сумка, гідрохімічні показники води, гранично допустимі концентрації, антропогене навантаження, хімічне забруднення.*

[1] доктор філософії за спеціальністю «Професійна освіта (Комп'ютерні технології)»,
доцент кафедри біології людини, хімії та методики навчання хімії
(Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка, м. Суми)
ORCID: 0000-0002-8722-7683
[2] викладач кафедри біології людини, хімії та методики навчання хімії
(Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка, м. Суми)
ORCID: 0000-0002-5658-0433
[3] здобувач вищої освіти спеціальності 014 «Середня освіта (Хімія)»
кафедри біології людини, хімії та методики навчання хімії
(Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка, м. Суми)
ORCID: 0000-0002-5658-0433

COMPREHENSIVE STUDY OF THE HYDROCHEMICAL INDICATORS OF THE SUMKA RIVER WITHIN THE SUMY REGION

Yu. S. Vakal, S. V. Matsak, Ye. I. Bezborodova

The article presents the results of a comprehensive study of the hydrochemical indicators of the Sumka River within the Sumy region, as well as a comparative analysis of the obtained results with the current maximum permissible concentration (MPC) standards. The relevance of the research is due to the fact that the Sumka River is subject to strong anthropogenic pressure, which causes the quality of surface waters to deteriorate each year. The condition of the water body can be described as critical: the river experiences excessive pollution due to the discharge of wastewater from industrial enterprises, municipal and private households, as well as from agricultural activities. This leads to riverbed overgrowth, shallowing, and excessive eutrophication, which is visible even to the naked eye. Therefore, the river requires continuous environmental monitoring and control of its condition.

During 2025, we analyzed a number of hydrochemical indicators of the Sumka River within the Sumy district, including: the hydrogen index (pH), and the content of such ions as nitrites, nitrates, phosphates, chlorides, sulfates, fluorides, ammonium ions, and iron ions. The study revealed that the fluoride content exceeded the permissible limits in all seasons. Multiple exceedances of nitrate and iron ion concentrations were recorded. In some samples, the permissible levels of sulfates, phosphates, and ammonium ions were exceeded, but overall these indicators mostly remained within normal limits throughout the year. All other parameters consistently remained below the MPC standards.

We also analyzed the annual dynamics of those parameters that repeatedly exceeded MPC limits, namely the concentrations of nitrates, fluorides, and iron ions. In our opinion, the factors that led to the exceedance of certain indicators are anthropogenic activities, specifically the influence of agricultural practices and discharges from municipal and private enterprises. The obtained data can be used to develop recommendations for the protection of the water body and for improving the water quality of the Sumka River.

Key words: *Sumka River, hydrochemical water indicators, maximum permissible concentrations, anthropogenic load, chemical pollution.*

Вступ

Потужне антропогенне навантаження на водні ресурси зумовило глобальну проблему раціонального використання та якості природних вод. Вивчення малих водотоків, зокрема гідрохімічного складу природних вод, є надзвичайно важливим для діагностики екологічного стану річкових систем, передбачення потенційних загроз забруднення й формування природоохоронних стратегій щодо водних об'єктів (Akhtar et al., 2021).

Проблема збереження малих річок має загальнодержавне значення, оскільки саме вони формують основу гідрографічної мережі, забезпечують живлення більших водотоків, беруть участь у процесах водообміну, регулюють мікроклімат територій і підтримують екологічну рівновагу регіонів. Утрата або деградація малих водотоків призводить до порушення природних ландшафтних структур, зниження біорізноманіття й погіршення якості життя населення (Gopchak et al., 2021).

Однією з найгостріших проблем Сумської області є погіршення якості води в річці Сумка (Безбородова і Вакал, 2025). Це зумовлене низкою антропогенних факторів, серед яких – інтенсивна забудова прибережних зон, скидання неочищених або недостатньо очищених стічних вод, забруднення побутовими відходами, а також деградація прибережної рослинності. Унаслідок таких процесів відбувається зниження самоочисної здатності водотоку, порушення гідрологічного режиму та зменшення біологічного різноманіття (Ставицька, 2025). Саме тому дослідження гідрохімічних показників річки Сумка, визначення основних джерел її забруднення й пошук ефективних шляхів поліпшення цієї ситуації є надзвичайно актуальним завданням сьогодення. Якщо не запровадити своєчасні заходи, екологічний стан річки може погіршитися настільки, що її природна екосистема зазнає незворотних змін або буде повністю зруйнована (Schumm, 2022).

Річка Сумка є правою притокою першого порядку річки Псел і притокою другого порядку річки Дніпро. Вона належить до класу поверхневих природних вод. Басейн річки Сумки розташований у центральній частині Сумської області, а саме в межах Сумського району та міста Суми.

Річка бере свій початок поблизу населених пунктів Новосуханівка, Миловидівка та Степанівка, упадає в річку Псел у центральній частині міста Суми. Довжина річки становить 37,7 км, площа водозбору – 385 км^2, довжина басейну – 21 км, максимальна ширина – 36,6 км, середня ширина – 18,3 км (Водний і меліоративний фонди Сумської області, 2006).

Річка Сумка відіграє важливу господарську, екологічну й соціальну роль для міста Суми та прилеглих територій. Її водні ресурси використовуються для побутових і господарських потреб населення, а також у сільському господарстві, зокрема для зрошення й водопостачання присадибних ділянок. У межах міста річка виконує рекреаційну функцію, оскільки вздовж її берегів розташовані зелені зони, парки та місця відпочинку мешканців.

Результати багаторічних спостережень засвідчують тенденцію до погіршення екологічного стану водної екосистеми. Основними чинниками деградації є інтенсивне антропогенне навантаження, спричинене урбанізацією, промисловою діяльністю, побутовим забрудненням і несанкціонованими викидами стічних вод.

Гідрологічні й гідрохімічні характеристики річки вивчали науковці СумДПУ імені А.С. Макаренка – О.С. Данильченко, М.М. Більченко й Г.Я. Касьяненко (Більченко та ін., 2002; Данильченко і Рибальченко, 2017); екологічний стан річки у межах міста досліджувала А.В. Гончарова, Т.М. Кузьміна й інші (Гончарова, 2020).

Значний негативний вплив на якість вод річки Сумка завдає Косівщинське водосховище, яке є джерелом низки екологічних проблем. Серед основних наслідків його функціонування – підвищення рівня ґрунтових вод і підтоплення окремих районів міста, значні втрати води через випаровування, а також хронічна нестача води в самій р. Сумка. Відомо, що водосховища характеризуються низькою здатністю до самоочищення, у зв'язку з чим у них поступово накопичуються донні відклади, активізуються процеси «цвітіння» води та надмірно розростається водна рослинність. Це, у свою чергу, спричиняє вторинне забруднення та погіршення якості води в річці Сумка (Кузьміна та ін., 2017).

Додатковими чинниками деградації водойми є накопичення побутових відходів уздовж берегів річки, руйнування прибережної рослинності й заростання мілководних ділянок водоростями. Вагомий вплив має також сільськогосподарська діяльність на прилеглих територіях, зокрема внесення мінеральних добрив і змиви їх з полів під час опадів і поливу, що призводить до накопичення нітратів і фосфатів у ґрунтовому розчині та їх потрапляння в прилеглі водойми. Поверхневий стік, ерозія ґрунту з прилеглих ділянок, а також стоки з водосховищ і малих водотоків переносять азотні сполуки у річку, підсилюючи рівень антропогенного забруднення (Більченко і Козацький, 2020). Це призводить до того, що в літній та осінній період нерідко фіксується надмірна євтрофікація, так зване явище «цвітіння води», спричинене масовим розвитком синьо-зелених водоростей (рис. 1).

Рис. 1. Надмірна евтрофікація р. Сумки (осінь 2025 року)

Русло річки Сумка в межах Сум також зазнало істотних антропогенних змін: його майже повністю перекопано, знищено природні вигини, плеса та перекати. Ці морфологічні зміни спричинили суттєве зниження самоочисної здатності водотоку й деградацію природної річкової екосистеми. Утрата біотопного різноманіття призвела до зникнення більшості водних організмів і, як наслідок, до зниження рибопродуктивності. Сукупність цих чинників спричинили інтенсивне замулення русла, погіршення фізико-хімічних і мікробіологічних показників якості води та порушення природного гідроекологічного балансу водного об'єкта. Зафіксовано, що в межах міста та прилеглих територій вода в річці Сумка не відповідає чинним санітарно-гігієнічним нормам через високий рівень забруднення (Данильченко і Рибальченко, 2015).

Забруднення річки Сумка фіксується не лише в межах міста, а й у верхній і нижній

течії, що свідчить про комплексний характер антропогенного впливу. Основними його чинниками є сільськогосподарські стоки та господарська діяльність на прилеглих територіях, зокрема надмірне внесення фосфатних і нітратних добрив.

Територія басейну річки Сумка характеризується природно підвищеним умістом феруму в ґрунтовому покриві, що пов'язано з її географічним розташуванням у безпосередній близькості до зони Курської магнітної аномалії – одного з найбільших родовищ залізних руд у світі. Ця геологічна особливість регіону зумовлює природно високий фоновий вміст феруму в ґрунтах, що, своєю чергою, позначається на гідрохімічному складі поверхневих вод через процеси природного вилуговування та міграції йонів феруму з ґрунтово-геологічного середовища у водні об'єкти.

Річка Сумка перебуває під суттєвим антропогенним навантаженням, що проявляється в погіршенні її гідрохімічних та екологічних характеристик. Перевищення гранично допустимих концентацій (далі – ГДК) окремих гідрохімічних показників води становить потенційну загрозу для здоров'я населення в разі використання води для питних і побутових потреб.

Мета дослідження – визначити сучасний стан річки Сумка шляхом комплексного аналізу основних гідрохімічних показників води, виявити ймовірні чинники антропогенного впливу на водний об'єкт і встановити відповідність отриманих результатів чинними нормативам гранично допустимих концетрацій.

Матеріал і методи

Одним із найважливіших етапів дослідження є підбір відповідних методик і відбір проб, оскільки якраз він визначає подальші дії дослідження. Підбір методик для аналізу показників якості води здійснено, передусім спираючись на точність визначення показників складу води конкретними методами, а також з урахуванням швидкості й оптимальності аналізу (Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення, 2022).

У дослідженні застосовано методи кількісного аналізу, а саме: фотоколориметричний (для визначення фосфат-йонів, нітрит-йонів, йонів Феруму та нітрат-йонів), метод прямої потенціометрії (для визначення водневого показника, флуорид-йонів, хлорид-йонів, нітрат-йонів, йонів амонію) та турбідиметричний метод (для визначення сульфат-йонів).

Результати та їх обговорення

У межах наукових досліджень, що здійснювалися на кафедрі біології людини, хімії та методики навчання хімії СумДПУ імені А.С. Макаренка, колективом науковців у складі Ю. Вакал, С. Мацака та магістрантки Є. Безбородової проведено комплексне дослідження гідрохімічних показників річки Сумка.

З метою оцінки динаміки хімічного складу водних об'єктів проведено комплексне дослідження протягом 2025 року. Для досягнення поставленої мети нами було здійснено пробовідбір за течією річки Сумка в межах міста Суми (5 проб) і в Сумському районі (5 проб), точки відбору були підібрані таким чином, щоб мати можливість відслідкувати основні джерела забруднення. Ділянки русла річки, на яких здійснено відбір, відповідні номери (шифри) проб, а також їх географічні координати наведено в таблиці 1.

Дослідження проводилося з січня 2025 по вересень 2025 року. У ході дослідження відібрано 4 серії обраних нами проб (у лютому, березні, червні та вересні відповідно). У пробах води виміряно такі гідрохімічні показники: уміст нітритів, нітратів, фосфатів, флуоридів, йонів амонію, сульфатів, хлоридів, йонів феруму та водневий показник. Аналіз гідрохімічного складу води річки Сумки показує чіткі сезонні коливання, зумовлені дією природних і антропогенних факторів.

Результати вимірювання зазначених вище показників по кожному сезону (зима-весна-літо-осінь) представлено у відповідних таблицях (таблиці 2–5).

У таблиці 2 ми бачимо, що водневий показник знаходиться в слабколужному діапазоні. У межах ГДК перебувають фосфати, нітрити, хлориди та йон амонію. Перевищення вмісту нітратів зафіксовано а пробах № 7–9, інші проби перебувають у межах норми. У всіх пробах зафіксоване перевищення вмісту флуоридів у діапазоні від 1,8 до 2,6 раза від ГДК. Надмірна кількість йонів феруму зафіксована в пробах № 1, 7, 8, 9 у діапазоні від 1,03 до 1,36 раза. Також зафіксовано перевищення вмісту сульфатів у пробах № 2, 3, 6 і 7 у проміжку 1,15–1,28 ГДК.

У таблиці 3 ми бачимо, що показник pH залишається в слабколужному діапазоні. Уміст хлоридів, фосфатів, нітритів та йонів

Таблиця 1

Характеристика проб річкової води

Номер проби	Опис місця відбору	Географічні координати
1	Початок річки біля н.п. Новосуханівка	50°54'41"N 34°30'43"E
2	Далі за течією біля н.п. Червоний кут	50°56'42"N 34°32'41"E
3	Після впадіння у р.Сумка річок Гуска та Степанівка	50°56'43"N 34°36'11"E
4	Біля ставка Заводський (н.п. Степанівка)	50°56'01"N 34°38'08"E
5	Далі по течії річки, біля н.п Кононенкове	50°55'45"N 34°40'29"E
6	Вихід з Косівщинського водосховища (м. Суми)	50°55'07"N 34°45'08"E
7	Біля тяглового моста (Білорусівський проїзд)	50°55'12"N 34°46'52"E
8	Біля пішохідного мосту після впадіння р.Стрілки у р. Сумка (м. Суми вул. Британська)	50°54'49"N 34°47'57"E
9	На місці впадіння річки Сумки в річку Псел (м. Суми)	50°54'32"N 34°48'29"E

Таблиця 2

Гідрохімічні показники проб річки Сумка (зима 2025 року)

Показник	Одиниці виміру	ГДК	Номер проби								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
NH_4^+	мг/л	2,6	2,18	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8
Cl^-	мг/л	350	56,41	71,3	74,14	71,30	80,16	54,25	90,12	90,12	83,35
F^-	мг/л	1,2	2,84	2,21	2,62	2,73	2,97	3,09	3,09	2,73	2,73
NO_2^-	мг/л	3,3	0,01	<0,01	0,04	0,07	0,02	0,05	0,07	0,07	0,073
NO_3^-	мг/л	45	20,73	19,8	33,90	31,00	37,08	42,40	46,36	46,36	53,02
SO_4^{2-}	мг/л	500	449,49	637,82	576,13	413,77	449,49	637,82	576,13	413,77	449,49
PO_4^{3-}	мг/л	3,5	0,59	0,36	0,70	0,83	0,66	0,84	0,92	0,89	1,03
pH	---	---	8,05	7,91	8,5	8,53	8,56	8,88	8,94	8,93	8,89
Fe	мл/л	0,3	0,38	0,17	0,17	0,22	0,09	0,17	0,31	0,41	0,37

Таблиця 3

Гідрохімічні показники проб річки Сумка (весна 2025 року)

Показник	Одиниці виміру	ГДК	Номер проби								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
NH_4^+	мг/л	2,6	2,34	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8
Cl^-	мг/л	350	64,17	92,3	88,61	100,01	108,41	92,26	112,88	104,13	117,52
F^-	мг/л	1,2	2,94	2,94	3,20	3,34	3,48	3,20	3,63	3,07	2,94
NO_2^-	мг/л	3,3	0,00	<0,01	0,01	0,17	0,11	0,05	0,03	0,12	0,16
NO_3^-	мг/л	45	116,53	74,7	84,36	95,23	87,84	91,46	107,49	95,23	91,46
SO_4^{2-}	мг/л	500	136,06	163,9	150,8	104,94	26,33	59,09	164,72	157,76	227,77
PO_4^{3-}	мг/л	3,5	0,48	0,48	0,72	0,84	1,09	1,04	0,40	0,83	0,57
pH	---	---	8,05	7,75	7,7	7,93	7,89	7,9	8,07	7,83	7,7
Fe	мл/л	0,3	0,01	0,15	0,02	0,26	0,10	0,37	0,00	0,80	0,18

амонію перебуває в межах норми ГДК, не перевищуючи її. Порівняно із зимою зменшився вміст сульфатів, усі проби знаходяться в межах норми. Перевищення допустимих кількостей нітратів весною зафіксовано в усіх десяти пробах у діапазоні 1,5–2,3 ГДК з найбільшим умістом у пробі № 1. Уміст флуоридів перевищений у всіх пробах у діапазоні 2,45–3 ГДК, спостерігається зростання їх умісту у воді порівняно із зимою. Найбільшою концентрація флуоридів є в пробі № 7, вона перевищує норму в 3 рази. Порівняно із зимою зменшився вміст йонів феруму, більшість проб перебувають у межах норми ГДК, проте в пробах № 6, 8 уміст заліза перевищено в 1,24 та 2,7 раза відповідно.

Таблиця 4

Гідрохімічні показники проб річки Сумка (літо 2025 року)

Показник	Одиниці виміру	ГДК	Номер проби								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
NH_4^+	мг/л	2,6	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	1,85	<1,8
Cl^-	мг/л	350	51,55	57,8	57,79	75,44	87,85	106,27	102,30	114,68	69,91
F^-	мг/л	1,2	1,80	2,21	2,70	2,70	2,49	2,49	2,49	2,70	2,70
NO_2^-	мг/л	3,3	<0,01	0,06	0,18	0,02	0,09	<0,02	0,30	0,50	0,155
NO_3^-	мг/л	45	2,64	0,99	5,35	0,87	1,10	0,04	14,92	32,62	2,88
SO_4^{2-}	мг/л	500	211,05	158,01	91,07	189,31	154,54	185,83	158,88	151,06	109,33
PO_4^{3-}	мг/л	3,5	0,70	1,03	2,66	0,95	0,17	0,17	0,86	0,821	0,891
pH	---	---	8,12	7,95	8,04	8,25	8,13	8,49	8,32	8,39	8,48
Fe	мл/л	0,3	0,18	0,49	0,33	0,43	0,38	0,16	0,35	0,43	0,17

У таблиці 4 ми бачимо, що хлориди, нітрити, йон амонію, сульфати й фосфати перебувають у межах норм ГДК. Значення показника pH проб є слабколужним. На відміну від попередніх сезонів, улітку перевищення вмісту нітратів у водоймі не зафіксовано, усі проби знаходяться в межах норми. Показник вмісту флуоридів залишається високим у всіх пробах у межах 1,5–2,25 ГДК, з найбільшим умістом у пробах № 3, 4, 8, 9, проте є дещо нижчим, ніж у весняний період. Уміст заліза в більшості проб збільшився, порівняно з весною, перевищення фіксуються в діапазоні 1,1–1,6 раза, лише в пробах № 1, 6 і 9 значення в межах норми.

У таблиці 5 ми бачимо, що всі проби є слабколужними за середовищем. Уміст нітритів, хлоридів і сульфатів знаходиться в межах норми ГДК. Є незначне перевищення вмісту фосфатів у пробі № 5 у 1,07 раза. Також у більшості проб уміст йонів амонію знаходиться в межах ГДК, окрім проби № 1, де зафіксовано перевищення в 1,26 раза. Показник вмісту нітратів, аналогічно до літнього сезону, перебуває в межах норми. Концентрація флуоридів у воді, як і в попередні сезони, є стабільно високою та фіксується в діапазоні 1,5–2,8 ГДК. Перевищення вмісту заліза зафіксовано в проміжку 1,1–1,6 ГДК у всіх пробах, окрім № 4 та 6, із найбільшим умістом у пробі № 1.

Оскільки в ході дослідження ми виявили багаторазові значні перевищення ГДК одразу за декількома показниками (уміст нітратів, флуоридів, йонів феруму), далі наводимо динаміку змін кожного з означених вище параметрів впродовж усього періоду дослідження (зима-весна-літо-осінь).

На рисунку 2 наведено динаміку змін умісту нітрат-йонів у досліджуваних зразках води впродовж року.

З графіка бачимо, що навесні спостерігаються найбільші перевищення вмісту нітратів у проміжку 1,5–2,3 ГДК в усіх пробах, при цьому кількість нітратів у воді є найменшою влітку та восени й знаходяться в межах норми в усіх досліджуваних пробах. На нашу думку, це пов'язано з антропогенним навантаженням, а саме впливом

Таблиця 5

Гідрохімічні показники проб річки Сумка (осінь 2025 року)

Показник	Одиниці виміру	ГДК [9]	Номер проби								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
NH_4^+	мг/л	2,6	3,37	1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8
Cl^-	мг/л	350	61,56	52,7	74,80	90,90	98,27	114,86	102,18	110,46	119,42
F^-	мг/л	1,2	1,79	2,12	3,09	3,36	2,84	2,72	2,40	2,30	2,50
NO_2^-	мг/л	3,3	0,05	0,04	0,28	0,05	0,28	0,03	0,10	0,09	0,085
NO_3^-	мг/л	45	7,27	8,14	2,09	8,14	4,68	8,14	5,11	2,96	1,23
SO_4^{2-}	мг/л	500	162,97	32,78	54,22	20,55	16,16	16,16	55,58	27,03	46,07
PO_4^{3-}	мг/л	3,5	0,87	2,49	2,34	2,11	3,74	2,29	1,27	0,64	1,27
pH	---	---	7,11	7,05	7,64	7,91	7,26	7,93	7,68	7,63	7,62
Fe	мл/л	0,3	0,49	0,41	0,33	0,30	0,33	0,28	0,35	0,37	0,34

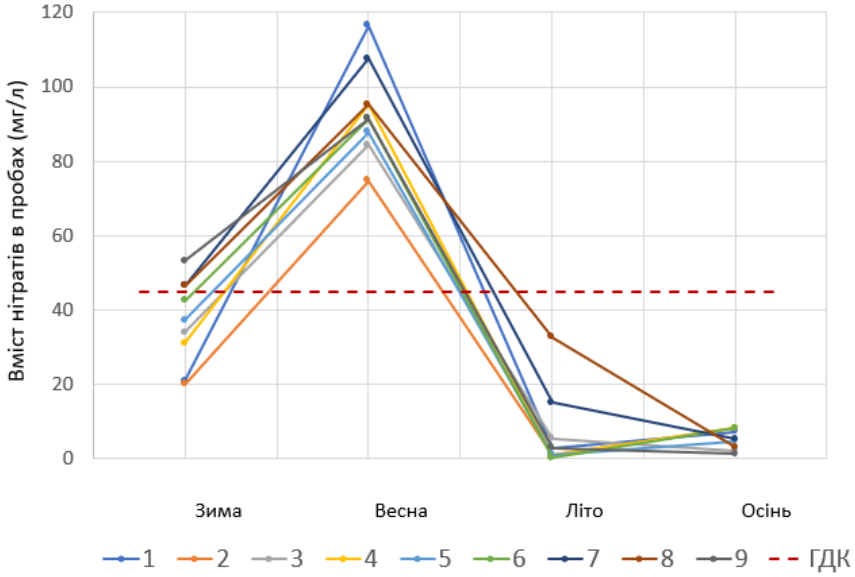


Рис. 2. Річна динаміка змін умісту нітратів у досліджуваних зразках поверхневих вод річки Сумка впродовж 2025 року

аграрної та побутово-господарської діяльності, комунальними стоками. Водночас ми вважаємо, що зниження вмісту нітратів у воді в літній та осінній періоди пов'язано не безпосередньо зі зниженням рівня надходження забрудників до водойми, а переважно з поглинанням значної частини нітратів мікроорганізмами, що, у свою чергу, призводить до активної евтрофікації водойми (див. рис. 1).

Також упродовж року нами фіксувалися перевищення вмісту йонів феруму в досліджуваних пробах річна динаміка за цим показником наведена на рисунку 3.

Найбільший уміст йонів феруму ми бачимо восени (8 із 9 проб у діапазоні 1,1–1,6 ГДК). Найменше перевищень фіксувалося навесні (2 з 9 проб). Протягом року бачимо, що показники зменшилися навесні, але влітку й восени знову зросли. На нашу думку, основною причиною підвищеного вмісту феруму у водоймі є його природно високий уміст у ґрунтах, що, зокрема, зумовлено географічним розта-

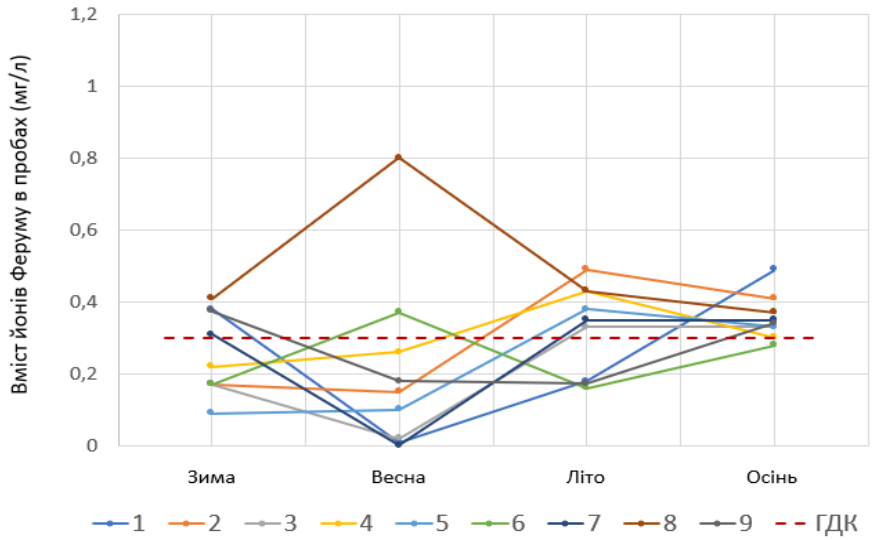


Рис. 3. Річна динаміка змін умісту йонів феруму в досліджуваних зразках поверхневих вод річки Сумка впродовж 2025 року

шуванням досліджуваної річки (наближеність до зони Курської магнітної аномалії). Основними факторами, що вплинули на коливання концентрації йонів феруму у воді впродовж року, на нашу думку, є сезонна зміна погодних умов і водного режиму річки Сумка.

Також упродовж року нами фіксувалися перевищення вмісту йонів флуоридів у досліджуваних пробах, річна динаміка за цим показником наведена нижче на рисунку 4.

Також ми зафіксували значне перевищення ГДК флуоридів у всіх пробах протягом усього року. З рисунку 4 бачимо, що найбільшими перевищення були навесні та фіксувалися в проміжку 2,45–3 ГДК, водночас найменші їх кількості спостерігалися влітку у діапазоні від 1,5 до 2,25. На нашу думку, перевищення ГДК

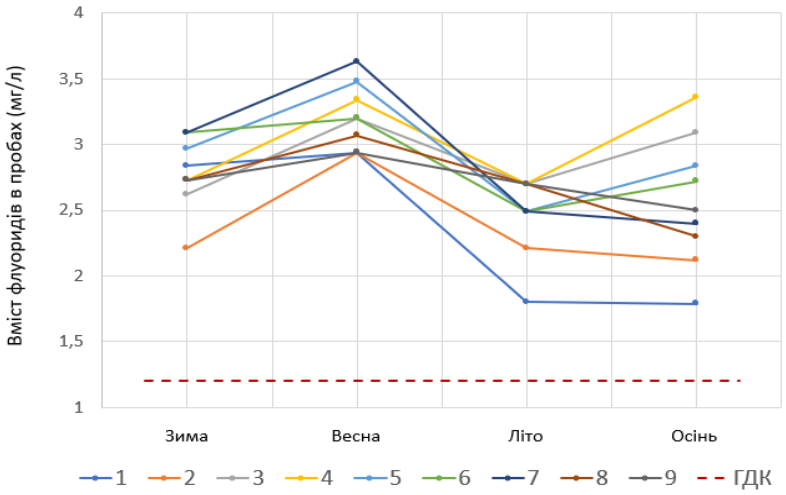


Рис. 4. Річна динаміка змін умісту флуоридів у досліджуваних зразках поверхневих вод річки Сумка впродовж 2025 року

флуоридів пов'язане з впливом антропогенного фактору, а саме внесенням фосфатних добрив (із домішками флуору) та пестицидів у прилеглі ґрунти, які з часом вимиваються та зі стоками потрапляють до водойми.

Висновки

У ході дослідження гідрохімічного складу поверхневих вод річки Сумка протягом 2025 року нами проаналізовано низку важливих показників: водневий показник (pH), уміст нітратів, нітритів, хлоридів, фосфатів, флуоридів, сульфатів, йонів амонію та вміст йонів феруму. За результатами аналізу, не виявлено перевищень ГДК хлорид- і нітрит-йонів. Водневий показник у всіх пробах протягом року зберігався в слабколужному діапазоні. Взимку зафіксовано перевищення сульфат-йонів у пробах № 6 і 7. Восени також фіксувалися надмірні кількості фостат-йонів у пробі № 5, а також йонів амонію в пробі № 1. Упродовж усіх сезонів фіксувалися перевищення ГДК нітратів, флуоридів і йонів феруму.

На нашу думку, це пов'язано з надмірним негативним антропогенним впливом. Одним з основних факторів впливу є стоки з територій, де ведеться активна сільськогосподарська діяльність. Вони є забрудненими через надмірне внесення пестицидів і добрив у ґрунт, зокрема фосфатних, відходи тваринництва та приватних домогосподарств, які знаходяться поряд. Також суттєвий вплив на рівень забруднення чинять відходи промислових і комунальних підприємств. Водночас перевищення деяких показників, зокрема вмісту сульфатів і йонів феруму, на нашу думку, пов'язані з природними особливостями місцевості.

Отже, сучасний екологічний стан річки Сумка можна охарактеризувати як незадовільний. Для його поліпшення необхідно впроваджувати систему регулярного моніторингу якості води, здійснювати очищення прибережних територій, обмежити скидання забруднених стічних вод, а також проводити природоохоронні просвітницькі заходи серед населення.

Список використаної літератури

Безбородова Є.І., Вакал Ю.С. Сучасний стан річки Сумка. *Десяті сумські наукові географічні читання :* матеріали Всеукраїнської наукової конференції. Суми, 2025. С. 10–11.

Більченко М.М., Горбусенко В.А., Касьяненко Г.Я. Хімічний склад поверхневих вод басейну р. Сумка. *Екологічні дослідження річкових басейнів Лівобережної України* : збірник наук. праць за матеріалами Всеукр. наук.-практ. конф. Суми, 2002. С. 63–69.

Більченко М.М., Козацький Б.І. Хімічний склад поверхневих вод річки Сумка : Біогенні компоненти. *Освітні та наукові виміри природничих наук* : збірник матеріали І Всеукраїнської заочної наукової конференції. Суми, 2020. С. 41.

Водний і меліоративний фонди Сумської області : довідник / за заг. ред. В. Федченка. Суми : Сумське обласне виробниче управління водного господарства, 2006. 128 с.

Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення : Наказ МОЗ України від 02 трав. 2022 р. № 721. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text (дата звернення 20.10.2025).

Гончарова А.В. Екологічний стан річки Сумка в межах м. Суми : магістерська робота. Суми : Сумський державний університет, 2020. 78 с. [Електронний ресурс]. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/82943/1/Goncharova_mag_2020.pdf (дата звернення 20.10.2025).

Данильченко О.М., Рибальченко Л.П. Гідрологічна характеристика річки Сумки та її басейну. *Наукові записки з географії.* 2015. № 6. С. 45–52.

Данильченко О.С., Рибальченко А.С. Оцінка геоекологічного стану річки Сумки в межах міста Суми. *Наукові записки СумДПУ імені А.С. Макаренка. Серія «Географічні науки».* 2017. № 8. С. 25–30.

Козацький Б. І. Хіміко-екологічна характеристика стану річки Сумка та Косівщинського водосховища в умовах антропогенного навантаження : магістерська робота. Суми : СумДПУ ім. А.С. Макаренка, 2020. 60 с. [Електронний ресурс]. URL: https://repository.sspu.edu.ua/items/835267ee-f0ff-4713-ba00-325ad401aa7f (дата звернення 20.10.2025).

Кузьміна Т.М., Спориш О.О., Лагуд Г., Бабко Р.В. Фактори впливу на стан річки Сумки на території міста Суми. *Сучасні технології у промисловому виробництві :* матеріали науково-технічної конференції. Суми, 2017. С. 148–149.

Ставицька Є.О. Сучасний стан річкових вод в межах Сумської області: магістерська робота. Одеса : Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, 2025. 90 с. [Електронний ресурс]. URL: https://dspace.onu.edu.ua/bitstreams/45255d9b-7698-4995-b8e9-80bfc393e342/download (дата звернення 20.10.2025).

Akhtar N., Syakir Ishak M.I., Bhawani S.A., Umar K. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water.* 2021. Vol. 13. № 19. P. 2660. https://doi.org/10.3390/w13192660.

Gopchak I., Basiuk T., Yatsyk A., Yaromenko O. Surface water quality of small rivers in the Ukrainian regions of right-bank Polissia. *E3S Conferences.* 2021. Vol. 280. 10005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128010005.

Luetkemeier R., Söller L., Frick-Trzebitzky F. Anthropogenic pressures on groundwater. *Encyclopedia of Inland Waters, Second edition.* 2022. Vol. 3. P. 548–559. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00183-3.

Schumm S.A. Rivers and humans – unintended consequences. *Large Rivers: Geomorphology and Management, Second Edition.* 2022. Chapter 24. P. 776–795. https://doi.org/10.1002/9780470723722.ch24.

References

Bezborodova, Ye.I., & Vakal, Yu. S. (2025). Suchasnyi stan richky Sumka. [Current state of the Sumka River]. *Desiati Sumski naukovi heohrafichni chytannia : materialy Vseukrainskoi naukovoi konferentsii [Tenth Sumy Scientific Geographical Readings: Materials of the All-Ukrainian Scientific Conference].* Sumy, pp. 10–11 [in Ukrainian].

Bilchenko, M.M., Horbusenko, V.A., & Kasianenko, H.Ya. (2002). *Khimichnyi sklad poverkhnevykh vod baseinu r. Sumka* [Chemical composition of surface waters of the Sumka River basin]. *Ekologichni doslidzhennia richkovykh baseiniv Livoberezhnoi Ukrainy: Zbirnyk naukovykh prats' za materialamy Vseukrains'koi naukovo-praktychnoi konferentsii [Ecological studies of river basins of Left-bank Ukraine: collection of scientific works based on materials of the All-Ukrainian Scientific-Practical Conference].* Sumy, pp. 63–69 [in Ukrainian].

Bilchenko, M.M., Kozatskyi, B.I. (2020). Khimichnyi sklad poverkhnevykh vod richky Sumka: Biohenni komponenty [Chemical composition of surface waters of the Sumka River: Biogenic components].

Osvitni ta naukovi vymiry pryrodnychykh nauk: zbirnyk materialiv I Vseukrainskoi zaochnoi naukovoi konferentsii [Educational and scientific dimensions of natural sciences: Proceedings of the 1st All-Ukrainian correspondence scientific conference]. Sumy, p. 41 [in Ukrainian].

Fedchenko V. (2006). Vodnyi i melioratyvnyi fondy Sumskoi oblasti: dovidnyk – Sumy: Sumske oblasne vyrobnyche upravlinnia vodnoho hospodarstva [Water and reclamation resources of Sumy region: Handbook. Sumy: Sumy Regional Production Department of Water Management] [in Ukrainian].

Hihiienichni normatyvy yakosti vody vodnykh obiektiv dlia zadovolennia pytnykh, hospodars'ko-pobutovykh ta inshykh potreb naselennia [Hygienic standards of water quality for drinking, domestic, and other population needs]. (2022). Nakaz MOZ Ukrainy № 721 vid 02 travnia 2022 r. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Honcharova, A.V. (2020). Ekolohichnyi stan richky Sumka v mezhakh m. Sumy : mahisterska robota [Ecological state of the Sumka River within the city of Sumy: Master's thesis]. Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet. [Electronic resource] URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/82943/1/Goncharova_mag_2020.pdf (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Danylchenko, O.M., & Rybalchenko, L.P. (2015). Hidrologichna kharakterystyka richky Sumky ta yii baseinu [Hydrological characteristics of the Sumka River and its basin]. *Naukovi zapysky z heohrafii [Scientific Notes in Geography],* 6, 45–52 [in Ukrainian].

Danylchenko, O.S., & Rybalchenko, A.S. (2017). Otsinka heoekolohichnoho stanu richky Sumky v mezhakh mista Sumy [Assessment of the geoecological state of the Sumka River within the city of Sumy] *Naukovi zapysky SumDPU imeni A S. Makarenka. Heohrafichni nauky [Scientific Notes of Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko. Geographical Sciences].* Sumy, pp. 45–52 [in Ukrainian].

Kozatskyi, B.I. (2020). Khimiko-ekolohichna kharakterystyka stanu richky Sumka ta Kosivshchyns'koho vodoskhovyshcha v umovakh antropohennoho navantazhennia: mahisterska robota [Chemical and ecological characteristics of the Sumka River and the Kosivshchynske Reservoir under anthropogenic pressure : Master's thesis]. Sumy: Sumy State Pedagogical University. [Electronic resource] URL: https://repository.sspu.edu.ua/items/835267ee-f0ff-4713-ba00-325ad401aa7f (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Kuzmina, T.M., Sporysh, O.O., Lahud, H., & Babko, R.V. (2017). Faktory vplyvu na stan richky Sumky na terytorii mista Sumy [Factors influencing the state of the Sumka River within the city of Sumy]. *Suchasni tekhnolohii u promyslovomu vyrobnytstvi: materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii [Modern Technologies in Industrial Production: Proceedings of the Scientific and Technical Conference].* Sumy, pp. 148–149 [in Ukrainian].

Stavytska, Ye.O. (2025). Suchasnyi stan richkovykh vod v mezhakh Sums'koi oblasti: mahisterska robota [The current state of river waters within the Sumy region: Master's thesis]. Odesa: Odesa National University named after I.I. Mechnikov [Electronic resource] URL: https://dspace.onu.edu.ua/bitstreams/45255d9b-7698-4995-b8e9-80bfc393e342/download (access date 20.10.2025) [in Ukrainian].

Akhtar, N., Syakir Ishak, M.I., Bhawani, S.A., & Umar, K. (2021). Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water, 13*(19), 2660. https://doi.org/10.3390/w13192660 [in English].

Hopchak, I., Basiuk, T., Yatsyk, A., Yaromenko, O. (2021). Surface water quality of small rivers in the Ukrainian regions of right-bank Polissia. *E3S Conferences,* 280. 10005 https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128010005 [in English].

Luetkemeier, R., Söller, L., & Frick-Trzebitzky, F. (2022). Anthropogenic pressures on groundwater. In T. Mehner & K. Tockner, *Encyclopedia of Inland Waters, Second Edition* (pp. 548–559). Amsterdam: Elsevier https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00183-3 [in English].

Schumm S.A. (2022). Rivers and humans – unintended consequences. In A. Gupta, *Large Rivers: Geomorphology and Management, Second Edition.* (pp. 776–795). https://doi.org/10.1002/9780470723722.ch24 [in English].

Отримано: 27.10.2025
Прийнято: 16.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 628.477:504.06
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.27

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ У ХМЕЛЬНИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ ЯК ЧИННИКА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ З УРАХУВАННЯМ ДОСВІДУ ПІВНІЧНОГО РЕЙНУ-ВЕСТФАЛІЇ (НІМЕЧЧИНА)

О. О. Єфремова[1], Н. Г. Міронова[2], А. О. Дячук[3], О. П. Матеюк[4], С. М. Шевченко[5]

У статті досліджено сучасний стан системи управління твердими побутовими відходами (ТПВ) у Хмельницькій області й здійснено порівняльний аналіз із практиками землі Північний Рейн-Вестфалія (NRW), Німеччина. Визначено, що домінування захоронення відходів, низький рівень переробки, фрагментарність інфраструктури й обмеженість фінансування формують комплексні екологічні й техногенні ризики, що зумовлюють необхідність системної модернізації. На основі статистичних даних і регіональних звітів ідентифіковано ключові проблеми: перевантаження полігонів, відсутність ефективної дегазації та компостування, низьке охоплення населення прак-

[1] кандидатка технічних наук, доцентка,
завідувачка кафедри екології та біологічної освіти
(Хмельницький національний університет, м. Хмельницький)
e-mail: yefremovaoo@khmnu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8153-1150
[2] докторка сільськогосподарських наук, професорка,
професорка кафедри екології та біологічної освіти
(Хмельницький національний університет, м. Хмельницький)
e-mail: mironovana@khmnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6214-0805
[3] кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та біологічної освіти
(Хмельницький національний університет, м. Хмельницький)
e-mail: diachukan@khmnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5974-7286
[4] кандидатка педагогічних наук, доцентка,
доцентка кафедри екології та біологічної освіти
(Хмельницький національний університет, м. Хмельницький)
e-mail: mateiukol@khmnu.edu.ua
ORCID: 0000-00002-0523-7854
[5] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології та біологічної освіти
(Хмельницький національний університет, м. Хмельницький)
e-mail: shevchenkos@khmnu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7558-255X

тиками роздільного збору, тарифні дисбаланси та слабкий соціальний компонент екологічної культури.
Європейський досвід, зокрема модель управління відходами у NRW, продемонстрував ефективність поєднання інституційних інструментів (федеральний рамковий закон «Про сприяння циркулярній економіці та забезпечення екологічно безпечного управління відходами», KrWG; розширена відповідальність виробника, EPR; депозитна система, Pfandsystem), техноекологічної інфраструктури (механіко-біологічна обробка, біогазові установки, RDF, компостування) та прозорого моніторингу (LANUV). Це забезпечує високий рівень переробки (>65%) і мінімізацію захоронення (<5%).
У статті проведено SWOT-аналіз регіональної системи управління ТПВ у Хмельницькій області, який засвідчив наявність як інституційних передумов розвитку (стратегічні документи, активні громади), так і суттєвих бар'єрів (зношена інфраструктура, недостатня нормативно-правова база, фінансові обмеження).
На підставі аналізу запропоновано практичні рекомендації для адаптації досвіду NRW до регіональних умов: кластеризація громад, упровадження EPR і Pfandsystem, створення мережі МБО- й компостувальних комплексів, розширення системи роздільного збирання, удосконалення тарифної політики та цифровізація управлінських процесів. Особлива увага приділена інтеграції інституційних, технологічних та економічних інструментів, що уможливлює підвищення рівня екологічної й техногенної безпеки, скорочення ризиків для довкілля й населення та формування умов для розвитку циркулярної економіки в регіоні.

Ключові слова: *тверді побутові відходи, система управління відходами, екологічна безпека, Хмельницька область, Північний Рейн-Вестфалія, SWOT-аналіз, розширена відповідальність виробника, депозитна система.*

IMPROVEMENT OF THE SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEM IN THE KHMELNYTSKYI REGION AS A FACTOR OF ENVIRONMENTAL SAFETY, TAKING INTO ACCOUNT THE EXPERIENCE OF NORTH RHINE-WESTPHALIA (GERMANY)

O. O. Yefremova, N. G. Mironova, A. O. Dyachuk, O. P. Mateyuk, S. M. Shevchenko

The article examines the current state of the solid waste management system in the Khmelnytskyi region and provides a comparative analysis with practices in North Rhine-Westphalia (NRW), Germany. It has been determined that the dominance of waste disposal, low recycling rates, fragmented infrastructure, and limited funding create complex environmental and technogenic risks, necessitating systematic modernization. Based on statistical data and regional reports, key problems have been identified: landfill overload, lack of effective degassing and composting, low coverage of the population by separate collection practices, tariff imbalances, and a weak social component of environmental culture.
European experience, in particular the waste management model in NRW, has demonstrated the effectiveness of combining institutional instruments (Federal Framework "Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen", KrWG; extended producer responsibility, EPR; deposit system, Pfandsystem), techno-ecological infrastructure (mechanical-biological treatment, biogas plants, RDF, composting) and transparent monitoring (LANUV). This ensures a high level of recycling (>65%) and minimizes landfilling (<5%).
The article presents a SWOT analysis of the regional solid waste management system in the Khmelnytskyi region, which revealed both institutional prerequisites for development (strategic documents, active communities) and significant barriers (worn-out infrastructure, insufficient regulatory framework, financial constraints).
Based on the analysis, practical recommendations are proposed for adapting the NRW experience to regional conditions: clustering of communities, introduction of EPR and Pfandsystem, creation of a network of MBO and composting complexes, expansion of the separate collection system, improvement of tariff policy, and digitization of management processes. Particular attention is paid to the integration of institutional, technological, and economic instruments, which makes it possible to increase the level of environmental and technogenic safety, reduce risks to the environment and the population, and create conditions for the development of a circular economy in the region.

Key words: *solid waste, waste management system, environmental safety, Khmelnytskyi region, North Rhine-Westphalia, SWOT analysis, extended producer responsibility, deposit system.*

Вступ

Управління твердими побутовими відходами (далі – ТПВ) в Україні необхідно розглядати в площині питань екологічної та техногенної безпеки, оскільки значні обсяги утворення ТПВ, низький показник їх відновлення й переважання захоронення формують комплексні ризики для довкілля та здоров'я населення (Municipal ..., 2015). Це зумовлено збільшенням щорічного обсягу їх утворення, низьким ступенем відновлення й екологічною небезпекою експлуатації полігонів і сміттєзвалищ. Така ситуація формує високі ризики забруднення довкілля, загострення санітарно-епідеміологічної ситуації та виникнення техногенних загроз, що потребує системних управлінських і технологічних рішень відповідно до сучасних європейських стандартів у сфері управління відходами. Це також актуалізує запит на технологічну модернізацію, інституційні зміни й узгодження з європейськими вимогами; водночас імплементація ієрархії поводження з відходами, інструментів розширеної відповідальності виробника, депозитних систем потребують адаптації до регіональних умов.

Постановка проблеми. Щорічно у Хмельницькій області утворюється в середньому близько 380 тис. тонн ТПВ, основна частка яких підлягає захороненню (Звіт..., 2020; Регіональний..., 2021). Інфраструктура для роздільного збирання залишається недостатньою, що підтверджується низьким рівнем охоплення населення первинним сортуванням і суттєвими втратами вторинної сировини. Водночас стан полігонів і сміттєзвалищ, куди видаляються основні обсяги відходів, є незадовільним і зумовлює формування в регіоні системних екологічних і техногенних ризиків і загроз: емісія метану в складі звалищного газу, що, у свою чергу, створює пожежну небезпеку; забруднення підземних і поверхневих вод фільтратом; накопичення токсичних речовин у ґрунті й біоті; значні площі об'єктів захоронення ТПВ, відповідно, і широка зона екологічного впливу (746 полігонів/сміттєзвалищ, 565,19 га) (Регіональний..., 2021). Таким чином, проблема управління відходами в Хмельницькій області має комплексний характер: одночасно погіршується екологічний стан (якість повітря та підземних вод, природних ландшафтів), зростають техногенні загрози (пожежі/вибухи звалищного газу), втрачається економічний потенціал вторинних ресурсів. Вирішення цієї проблеми прямо пов'язано з важливими науковими та практичними завданнями формування ефективної моделі регіональної системи управління відходами, що забезпечує екологічну й техногенну безпеку, а також інтегрує європейські інструменти й сталі рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нормативно-правові засади реформи в Україні у сфері управління відходами окреслено в Законі України «Про управління відходами» (Про управління..., 2023) та Національній стратегії управління відходами до 2030 року (Про схвалення..., 2017). На рівні області розроблено проєкт Регіонального плану управління відходами у Хмельницькій області до 2030 року (Регіональний..., 2021), що визначає вектори розвитку системи управління відходами.

Сьогодні вагома частка іноземних публікацій присвячена технологіям і методам контролю у сфері управління відходами, ризик-менеджменту (Hariyani et al., 2025), де автори систематизують сучасні підходи до відновлення відходів, приділяючи особливу увагу питанням техногенної безпеки полігонів та іншим складовим системи управління відходами. Важливий акцент робиться на оцінку життєвого циклу й ризики для довкілля (Khan et al., 2025), а також на впровадження нових технологій і сучасних рішень (Drozdowski et al., 2023).

Вітчизняні вчені активно досліджують ці питання, зокрема здійснено аналіз просторово-часових закономірностей формування ТПВ у регіонах України (Приходько і Сафранов, 2025), оцінено екологічні ризики від функціонування полігонів ТПВ (Корбут та ін., 2024), розроблено багатокритеріальний експертно-аналітичний апарат для оцінювання екологічних небезпек кожного з етапів поводження з ТПВ (Honcharenko et al., 2020a; Honcharenko et al., 2020b). Проаналізовано технології обробки відходів: пироліз, механіко-біологічна обробка (МБО), RDF/біогаз з оцінкою потенціалу зниження екологічних ризиків, а також бар'єри впровадження (вартість, відсутність інфраструктури, регулювання) і можливі шляхи стимулювання інвестицій (Сатін та ін., 2022; Луців і Капраль, 2024). Автори (Височанська і Мішенін, 2024) проаналізували досвід європейських країн

(Польщі, Німеччини, Швеції), зокрема розглянуто загальні підходи щодо організації системи управління відходами. Водночас залишаються актуальними питання впровадження ефективних європейських інструментів і технологій у сфері управління ТПВ, зокрема на регіональному рівні, для зменшення екологічних ризиків і підвищення економічного потенціалу територій.

Метою статті є обґрунтування вдосконалення системи управління ТПВ у Хмельницькій області з урахуванням досвіду Північного Рейну-Вестфалії (Німеччина) для підвищення рівня екологічної безпеки Хмельницького регіону.

Для досягнення мети визначено такі завдання: проаналізувати поточний стан та ідентифікувати інфраструктурні, фінансові й соціальні бар'єри для формування ефективної системи управління ТПВ у Хмельницькій області; узагальнити релевантні практики Північного Рейну-Вестфалії; виконати SWOT-аналіз та обґрунтувати імплементацію цих практик у систему управління ТПВ в Хмельницькій області з урахуванням регіональних обмежень.

Матеріал і методи

У дослідженні використано матеріали Департаменту природних ресурсів та екології Хмельницької обласної державної адміністрації, Державної служби статистики України, регіональних доповідей про стан навколишнього природного середовища у Хмельницькій області (2020–2024 рр.), а також проєкту Регіонального плану управління відходами до 2030 року.

Нормативно-правову основу становили Закони України «Про управління відходами», «Про охорону навколишнього природного середовища», а також положення Директив ЄС 2008/98/ЕС і федерального закону Німеччини «Про сприяння циркулярній економіці та забезпечення екологічно сумісного поводження з відходами» (скорочено «Про циркулярну економіку), Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Для порівняння використано аналітичні звіти Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) та матеріали OECD.

Для досягнення мети дослідження застосовано такі методи: аналіз, синтез, порівняльно-аналітичний, систематизації та узагальнення. За допомогою SWOT-аналізу виявлено сильні та слабкі сторони, можливості й загрози розвитку регіональної системи управління ТПВ.

Методика дослідження ґрунтувалася на комплексному використанні статистичних та аналітичних матеріалів для оцінювання поточного стану управління відходами, визначення рівня інфраструктурного забезпечення, а також зіставлення української практики з моделлю землі Північний Рейн-Вестфалія.

Як референтну модель обрано землю Північний Рейн-Вестфалія, оскільки вона має ефективно організовану й технологічно розвинену систему управління відходами, основану на принципах циркулярної економіки, регіональної самодостатності й сталого розвитку, а також має спільномірний адміністративний рівень і високу частку органічної фракції в потоці ТПВ, що робить її методологічно сумірною й практично релевантною для Хмельниччини.

Результати та їх обговорення

Відходи комунального сектору становлять значну частку в структурі загального обсягу відходів, що генеруються на території Хмельницької області. Відповідно до даних (Стан ..., 2025), упродовж останніх п'яти років питома вага ТПВ коливалася в межах від 30% (у 2022 році) до 70% (у 2020 році), демонструючи чітку тенденцію вагомого внеску ТПВ у формування регіонального балансу відходів. Зменшення в структурі відходів частки ТПВ пояснюється суттєвим збільшенням загального обсягу відходів за рахунок інших видів, насамперед промислових, агропромислових і рослинного походження. Водночас також можна констатувати й зростання обсягів ТПВ, адже щорічне їх утворення однією особою збільшилося майже втричі порівняно з 2020 роком і у 2024 році становило 0,87 т.

Основним способом оброблення відходів у Хмельницькій області на сучасному етапі залишається їх видалення, передусім шляхом захоронення на полігонах і сміттєзвалищах. Згідно з Регіональною доповіддю про стан навколишнього природного середовища Хмельницької області у 2024 році, захороненню підлягає близько 99,9% ТПВ. Місця видалення відходів в області часто експлуатуються понаднормово, з порушенням технологічних регламентів і за відсутності проєктної документації; без виконання геологічних і гідрогеологічних вишукувань, інженерних, екологічних

і санітарно-гігієнічних досліджень. Понад 40% наявних полігонів не відповідають екологічним вимогам, значна їх частка вичерпує свій ресурс (наприклад, полігон м. Хмельницького заповнений на 90%); для більшості полігонів області не вирішеним залишається питання збору й очистки фільтрату (за винятком полігону м. Хмельницького), не здійснюється моніторинг їх впливу на підземні водоносні горизонти (Стан ..., 2025).

Тверді побутові відходи області містять значну кількість вторинних матеріальних ресурсів. Морфологічна структура ТПВ, що генерується жителями міст Хмельницького, Старокостянтинова та Славути (міста Хмельницької області, де проведені роботи з визначення морфологічного складу побутових відходів), демонструє їх значний ресурсний потенціал: органічні відходи (відходи, що біологічно розкладаються) становлять близько 30,8–47,0%, ресурсоцінні компоненти ТПВ – 20,9–43,8 %, а саме: скло – 3,0–14,2 %, папір і картон – 9,6–18,0%, пластик і ПЕТ-пляшки – 7,2–10,4%, метали – 1,1–1,2% (Регіональний ..., 2021). Таким чином, близько 76–166 тис. тонн відходів, що утворюються в регіоні щорічно, являють собою матеріали з високим потенціалом для переробки та повторного використання. Переробка таких матеріалів могла б забезпечити зменшення потреби в первинних (необроблених) матеріалах, зниження навантаження на полігони і зменшення забруднення довкілля, економічну вигоду для підприємств, що займаються збором, сортуванням і переробкою, а також сприяти формуванню циркулярної економіки на рівні області. Водночас реальне відновлення відходів є мінімальним, оскільки переважає їх захоронення.

Розглядаючи інфраструктурну спроможність системи управління відходами в Хмельницькій області, зауважимо, що саме вона визначає, наскільки теоретичний потенціал переробки перетворюється на реальний результат. Усього в області послугу зі збирання та вивезення ТПВ отримують 78,0% населення й лише 7,5% населення області охоплені послугою роздільного збору відходів (сортування відходів на місці їх збору); для цього задіяно близько 10% від загальної кількості контейнерів; у сільських громадах часто спостерігається повна відсутність контейнерних майданчиків (контейнерів), що закономірно провокує появу стихійних звалищ. Додатковим обмеженням є незадовільний стан спеціалізованої техніки, нині автопарк має ступінь фізичного зносу близько 60%, що погіршує регулярність і якість надання послуг з вивезення ТПВ (Регіональний ..., 2021).

Фінансові показники галузі також свідчать про дисбаланс у тарифній політиці, адже він ураховує переважно операції з вивезення й захоронення ТПВ, що не сприяє інвестиціям у сортування та відновлення, відповідно, не стимулює циркулярні рішення. Нормативно-правові акти виконавчих органів місцевого самоврядування часто спрямовані на регулювання питань соціальної доступності тарифів, що зумовлює існування низьких тарифних ставок у громадах (25–35 грн на особу), але при цьому вони не корелюють із реальними витратами, не містять достатньої інвестиційної складової й не стимулюють модернізацію. Нині в територіальних громадах Хмельницької області тарифна політика залишається неоднорідною, з помітною варіативністю в рівнях платежів, механізмах розрахунку та способах формування витрат.

Соціальний вимір проблеми відображає низьку екологічну культуру населення: попри задекларовану в більш ніж 40% респондентів готовність підтримувати практики сортування, фактична участь залишається вкрай обмеженою через недовіру до результатів сортування, незручність інфраструктури та недостатню інформаційну підтримку з боку органів влади й операторів послуг (Андрейшина, 2021).

Таким чином, наявні дисбаланси – від морфологічно зумовленого потенціалу переробки до інфраструктурних, фінансових і соціальних обмежень – взаємно підсилюють одне одного, що й зумовлює необхідність комплексних перетворень у системі управління відходами Хмельницької області.

Європейський досвід поводження з відходами, зокрема практика землі Північний Рейн-Вестфалія, демонструє цілісну модель, що включає інституційно-правові механізми, технологічні рішення й прозорий моніторинг. На федеральному рівні рамковий закон «Про сприяння циркулярній економіці та забезпечення екологічно безпечного управління відходами» (Про циркулярну економіку) Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) (Kreislaufwirtschaftsgesetz..., 2012)

закріплює ієрархію управління відходами – від запобігання і їх повторного використання до переробки, енергетичного відновлення та, як останньої опції, захоронення. У межах цієї рамки діють економічні інструменти, ключовими серед яких є розширена відповідальність виробника (EPR) і депозитна система (Pfandsystem) для тари. Саме вони забезпечують фінансування збирання й відновлення відходів, а також стимулюють масове повернення багатооборотної й одноразової тари. На території NRW імплементація KrWG доповнюється настановами та методичною підтримкою з боку Державного управління з питань природи, довкілля та захисту прав споживачів землі Північний Рейн-Вестфалія (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, LANUV) разом із регулярними технічними звітами, інспектуванням об'єктів і веденням уніфікованих масивів даних, що дає змогу здійснювати порівняльний аналіз муніципалітетів і коригувати політику на основі доказів (LANUV NRW…, 2021).

Технологічна конфігурація регіону відповідає цим інституційним рамкам і забезпечує перетворення нормативних цілей на вимірюваний результат. Отже, на першому побутовому рівні функціонує стандартизована система роздільного збору основних фракцій (папір/картон, упаковка з пластику/металу, біовідходи, скло, залишкової), що формує «чисті» потоки на етапі їх утворення. Система PAYT (Pay-As-You-Throw, «плати за послугу») забезпечує економічне стимулювання сортування відходів. У межах цієї системи тарифи на послуги з управління відходами диференціюються залежно від обсягу (м³, кількість контейнерів) або маси (кг, т) фактично зібраних відходів. Тобто кінцевий споживач сплачує не фіксовану ставку, а вартість, пропорційну його внеску в загальний потік відходів, що має стимулювальний ефект для зменшення кількості змішаних відходів.

Далі працює ланцюг високотехнологічних сортувальних ліній і комплексів МБО з оптичною сепарацією, магнітними відокремлювачами, анаеробним зброджуванням і компостуванням; залишки спрямовуються на виробництво RDF для енергетичного відновлення.

Операційна модель спирається на державно-приватне партнерство: концесійні договори та прозорі правила тарифоутворення, що дає змогу залучати інвестиції й підвищувати довіру споживачів. У ширшому європейському контексті таке поєднання інституційної та технологічної складових відповідає практикам, узагальненим Організацією економічного співробітництва та розвитку (OECD) (OECD…, 2019).

Результативність інтегрованої моделі віддзеркалюється в стабільно високих показниках, зокрема рівень відновлення відходів на землях NRW перевищує 65%, тоді як частка захоронення становить менше ніж 5%. Суттєвий внесок у ці результати забезпечує Pfandsystem, що підтримує повернення понад 90% пляшок і банок і зменшує навантаження на змішаний потік ТПВ, а також EPR, що фінансує цикл «збір → сортування → переробка» (OECD…, 2019). У підсумку саме зв'язок інституційних (KrWG, EPR, Pfandsystem), технологічних (МБО, біогаз, RDF) та аналітико-наглядових (LANUV) рішень формує ефективну модель, елементи якої доцільно адаптувати до регіональних умов як України, так і Хмельницької області.

Порівняння ключових індикаторів NRW та Хмельницької області вказує на суттєвий розрив між наявним станом системи в Хмельницькій області та практиками землі Північний Рейн-Вестфалія. Показник переробки ТПВ у регіоні становить 0,01%, тоді як у NRW він стабільно перевищує 65%. Отже, різниця сягає приблизно стократного рівня й безпосередньо відображає ефективність інституційно-технічної системи «EPR/Pfandsystem → роздільний збір → МБО/переробка» у німецькій моделі.

Охоплення первинним сортуванням і роздільним збиранням населення Хмельницької області оцінюється на рівні близько 7,5%, тоді як в NRW цей показник становить 80–85%, що формує «чистіші» матеріальні потоки на вході до сортувальних ліній і зменшує питомі втрати на етапі МБО (LANUV NRW…, 2021).

Найбільш контрастним залишається індикатор захоронення: близько 99,9% ТПВ у Хмельницькій області потрапляє на полігони та сміттєзвалища проти орієнтовно 5% у NRW, де захоронення фактично виконує роль «резервуара для залишків» після переробки й енергетичного використання.

Німецька модель системи управління ТПВ забезпечує фінансування, мотивацію домогосподарств і бізнесу та передбачува-

ність інвестиційних циклів. У Хмельницькій області за відсутності діючих механізмів EPR/Pfandsystem, щільної мережі контейнерів для роздільного збирання відходів основний тягар лягає на полігони, чим і пояснюється висока частка захоронення відходів і низька ефективність вилучення ресурсів.

Техніко-технологічний зріз також демонструє системні відмінності, зокрема інфраструктура для формування системи управління відходами в Хмельницькій області є фрагментарною: спостерігається відсутність потужностей комплексної МБО, дефіцит систем дегазації полігонів і компостувальних потужностей для біофракції, тоді як у NRW функціонує розвинена мережа МБО-комплексів, біогазових установок і виробництв RDF, що реалізується муніципально-приватними операторами та підкріплюється прозорими тарифними підходами. У підсумку німецька модель забезпечує високий вихід придатних до переробки фракцій і мінімізує «хвіст» захоронення, тоді як у Хмельницькі області значна частка потенційно корисних матеріалів розсіюється в змішаному потоці й утрачає товарні властивості.

Нарешті, порівняльні наслідки відображаються в екологічних та економічних ефектах. Для Хмельницької області поєднання низької переробки, високого ступеня захоронення та недостатньої дегазації означає підвищені викиди звалищного газу, ризики пожеж/самозаймання й недоотримані доходи від вторсировини; для NRW – навпаки, зменшення екологічних ризиків і стабільні матеріальні й енергетичні потоки, що знижують питомі витрати системи. Порівняльний аналіз систем наведено в таблиці 1.

Таким чином, можна констатувати, що Хмельницька область має інфраструктурні й інституційні вузькі місця – це низький ступінь відновлення відходів, високий показник видалення/захоронення, зношений транспорт, дефіцит МБО/компостування, слабка дегазація. Водночас існують передумови для прогресу, а саме: розроблено проєкт Регіонального плану управління відходами у Хмельницькій області до 2030 року, в області наявні активні громади та євроінтеграційні «вікна можливостей» (EPR, Pfandsystem, гранти ЄС/МФО тощо).

Для систематизації сильних і слабких сторін регіональної системи управління відходами Хмельницької області, виявлення можливостей і загроз для подальшої пріоритизації інвестиційних та управлінських рішень проведено SWOT-аналіз, результати якого наведено в таблиці 2.

Сильні сторони. В області розроблено проєкт «Регіональний план управління відходами у Хмельницькій області до 2030 року», що задає стратегічні орієнтири, систему цілей і базові індикатори моніторингу. Окремі територіальні громади демонструють проактивну позицію, розширюючи наявну мережу контейнерів і пілотні ініціативи щодо сортування й роздільного збирання відходів. Така інституційна «рамка» створює передумови для координації дій між органами місцевого самоврядування, операторами та громадськістю, а також полегшує подальшу інтеграцію зовнішнього фінансування й технічної допомоги (Drozdowski et al., 2023).

Слабкі сторони. Відсутність національної нормативно-правової бази для впровадження механізмів EPR і Pfandsystem є значущою перешкодою для розвитку системи управління відходами у Хмельницькій області. Без чітко визначених законодавчих норм відповідальність виробників за збір, сортування й обробку відходів на вторинні ресурси залишається формальною або добровільною. Це обмежує мотивацію бізнесу інвестувати у відповідні технології та логістичні рішення. Ключовим

Таблиця 1

Порівняльний аналіз: Хмельницька область ↔ NRW, %

Показник	**Хмельницька область**	**NRW**
Частка переробки ТПВ	~0,01	>65
Охоплення первинним сортуванням	~7,5	80–85
Частка захоронення	~99,9	<5 %
Інфраструктура	Фрагментарна, дефіцит МБО, компостування, дегазації	Розвинена мережа МБО, біогазові установки, RDF

Таблиця 2

SWOT-аналіз регіональної системи управління відходами в Хмельницькій області

Сильні сторони	**Слабкі сторони**
• Наявність базової інфраструктури. • Розроблено проєкт Регіонального плану управління відходами у Хмельницькій області до 2030 року. • Активні територіальні громади (локальні ініціативи, пілоти щодо сортування/роздільного збору відходів тощо).	• Відсутність нормативно-правової бази для EPR і Pfandsystem на національному рівні. • Фінансові обмеження. • Низький рівень відновлення відходів, домінування захоронення. • Значна зношеність інфраструктури (контейнери, спецавтотранспорт, місця видалення відходів) і технічна відсталість (відсутність/дефіцит дегазації, компостування, МБО, виробництва RDF).
Можливості	**Загрози**
• Упровадження механізмів EPR, Pfandsystem після прийняття відповідних профільних законів. • Кластеризація громад для спільної інфраструктури (МБО, компостування). • Гранти ЄС і МФО, державно-приватні партнерства, цільові інвестиції в переробку. • Будівництво/модернізація МБО й компостувальних станцій. • Адаптація досвіду землі Північної Рейн-Вестфалії й інших земель Німеччини та країн ЄС	• Зростання екологічних ризиків (викиди звалищного газу, забруднення вод/повітря/грунту). • Соціальне напруження. • Фінансові втрати через недоотриману вартість втор сировини. • Інвестиційні втрати (утрачені грантові можливості тощо).

обмеженням також є низький рівень переробки за одночасно високої частки захоронення ТПВ, що зумовлено фрагментарністю інфраструктури: зношеним автопарком, дефіцитом сортувальних/МБО-потужностей і компостування, відсутністю або недостатньою ефективністю дегазації на більшості полігонів. Тарифна модель не містить достатньої інвестиційної складової, через що оновлення інфраструктури відкладається, а операційна надійність системи знижується (збої в логістиці, перевантаження полігонів).

Можливості. Євроінтеграційний вектор відкриває доступ до відпрацьованих та апробованих інструментів EPR і Pfandsystem, що дадуть змогу зменшити навантаження на місцеві бюджети та спрямувати кошти виробників, для яких національним законодавством буде визначена розширена відповідальність. Консолідація громад у кластерні моделі дає змогу досягти економії для МБО-комплексів і компостувальних станцій, а також ефективніше планувати логістику. Додаткові канали – гранти ЄС, механізми державно-приватного партнерства, «зелені» фінансові інструменти – можуть прискорити модернізацію й запустити технологічні апгрейди, синхронізовані з європейськими вимогами якості вторинної сировини.

Загрози. Збереження інерційної моделі може посилити екологічні ризики, формує соціальне напруження через погіршення сервісу й відсутність видимого прогресу та призводить до інвестиційних утрат: утрачаються можливості залучити грантові й пільгові ресурси, а також доходи від вторинної сировини. У підсумку зростає ймовірність локальних криз (перевантаження полігонів, стихійні звалища) з відповідними бюджетними витратами на ліквідацію наслідків.

Отже, за результатами проведеного SWOT-аналізу можна прогнозувати такі сценарії розвитку системи управління ТПВ Хмельницької області – від інерційного збереження статус-кво до повномасштабної євроінтеграції з техноекологічною модернізацією, відповідними орієнтовними KPI (показниками ефективності), ризиками й інструментами впровадження EPR, Pfandsystem, МБО, компостування, дегазації полігонів, гармонізацією показників із практиками NRW.

У розрізі екологічної та техногенної безпеки, а також довгострокової економіки цільовим для Хмельницької області є сценарій «європейської інтеграції» з можливим переходом до оптимістичної траєкторії за умов доступу до пільгового фінансування

й проєктної готовності. Саме поєднання EPR/Pfandsystem з МБЛ/компостуванням і дегазацією формує сталу основу системи, яка довела ефективність у NRW, забезпечить швидке зниження обсягів захоронення, викидів метану й бюджетних утрат у Хмельницькій області.

З огляду на висновки SWOT-аналізу й опрацьованих сценаріїв розвитку, розроблено практичні рекомендації щодо поетапної адаптації моделі NRW до умов Хмельницької області за напрямами.

Нормативи й управління:

– затвердження Регіонального плану управління відходами у Хмельницькій області та місцевих планів управління відходами, що дасть стратегічний орієнтир побудови й розвитку системи управління відходами в громадах та області загалом;

– підготовка до EPR і Pfandsystem: створити регіональний координаційний офіс (угоди з операторами EPR, маршрутизація потоків пакування, пілоти з депозитної тари);

– кластеризація громад: міжмуніципальні угоди на спільні об'єкти (МБЛ/компостування), спільні закупівлі й логістика;

– KPI-управління: щоквартальні звіти громад (охоплення сортуванням, переробка тощо), публічний дашборд.

Інфраструктура:

– опорні МБО-хаби (2–3) із лініями оптичного сортування й відбору RDF; компостувальні/анаеробні станції для біофракції (мінімум 1 на кластер);

– розширення контейнерної мережі для роздільного збирання відходів;

– дегазація полігонів, вузли збору фільтрату, вагові комплекси;

– цифровізація: RFID-контейнери для обліку відходів (дають змогу автоматично відстежувати їх місцезнаходження, рух і стан без прямого контакту або візуального сканування), GPS-маршрути, онлайн-заявки на великовагові відходи (за зразком муніципалітетів NRW).

Економіка:

– перегляд тарифів з інвестиційною складовою та індексацією; пілоти PAYT («плати за послугу» за обсяг/вагу);

– цільове спрямування коштів EPR на інфраструктуру збору/сортування; комбінування з грантами ЄС; пакетні проєктні документи для МБО/компостування;

– фінансові стимули: знижки для домогосподарств з високим рівнем сортування; штрафи за забруднення фракцій (стандарти якості вторинної сировини).

Комунікація та робота з населенням:

– просвітницькі кампанії (заклади освіти, ОСББ, територіальні громади): сценарії сортування «step-by-step», тури на об'єкти, гаряча лінія;

– прозорість даних: публічний лічильник переробки, карта контейнерів, кабінет споживача (рахунок, історія вивезення тощо).

Контроль та інспектування (за зразком LANUV NRW):

– річні плани інспектування полігонів/ліній; аудит дегазації, фільтрату, температурних полів;

– єдиний реєстр даних (аналог GISA): квартальні звіти громад, автоматичний збір показників з об'єктів; публічні витяги для громадян.

Таким чином, рекомендації включають складові «пакету» NRW, що можуть бути зреалізовані в умовах Хмельницької області: поєднання інституційних інструментів (KrWG-логіка, EPR, Pfandsystem), техноекологічної інфраструктури (МБО/компостування/біогаз, дегазація полігонів) і прозорого моніторингу.

Висновки

Дослідження підтвердило системний характер проблеми управління побутовими відходами в Хмельницькій області та її прямий зв'язок із показниками екологічної й техногенної безпеки регіону. Поточна конфігурація – високі обсяги утворення, низький рівень переробки, домінування захоронення, значні втрати вторсировини, підвищені ризики звалищного газу – формує сукупність екологічних, соціальних та економічних викликів.

Порівняльний аналіз із практиками землі Північний Рейн-Вестфалія виявив суттєві відмінності в інституційних, технологічних і фінансових параметрах функціонування системи й засвідчив, що поєднання інституційних інструментів (ієрархія KrWG, EPR, Pfandsystem), техноекологічної інфраструктури (МБЛ/компостування/біогаз, RDF, дегазація полігонів) та прозорого моніторингу/інспектування (LANUV, єдині масиви даних) забезпечує переробку >65% і захоронення <5%, тобто якісно інший рівень безпеки й ефективності.

SWOT-аналіз показав, що Хмельницька область має інституційні передумови, проте обмежена фрагментарною інфраструктурою, зношеним транспортом

і дефіцитом інвестицій. Сценарне бачення підтвердило пріоритетність траєкторії «європейської інтеграції»: упровадження EPR і Pfandsystem, будівництво кластерних МБО- та компостувальних потужностей, дегазація полігонів, розширення мережі роздільного збору й цифровий моніторинг здатні підвищити переробку ТПВ, зменшити захоронення, скоротити викиди метану й істотно знизити бюджетні й соціальні ризики. Запропонований пакет практичних рішень (нормативно-управлінські, інфраструктурні, економічні, комунікаційні заходи) утворює цілісну «дорожню карту» на 2025–2035 рр., синхронізовану з європейськими орієнтирами та національною правовою базою.

Перспективи подальших досліджень доцільно окреслити як розвиток узагальненого методичного інструментарію: удосконалення кількісних моделей утворення й оброблення відходів і побудова прогнозів з урахуванням невизначеності; комплексні економічні оцінки сценаріїв із порівнянням витрат, вигод і соціальних ефектів; вивчення поведінкових чинників участі населення та їхнього впливу на результативність системи; застосування просторово-аналітичних підходів для планування інфраструктури та пріоритизації заходів безпеки; створення єдиної системи даних із прозорими стандартами обліку, моніторингу й аудиту; оцінювання екологічного впливу реформ на якість повітря й води та потенціалу кліматичної користі; а також напрацювання правових та інституційних механізмів координації між громадами й залучення інвестицій.

Список використаної літератури

Андрейшина Н. Скільки українців готові сортувати сміття? *Active Group.* 15.11.2021. [Електронний ресурс]. URL: https://activegroup.com.ua/2021/11/15/skilki-ukraynciv-gotovi-sortuvati-smittya/ (дата звернення: 05.07.2025).

Височанська М., Мішенін Є. Системи управління твердими побутовими відходами України з урахуванням європейського досвіду. *Агроекологічний журнал.* 2024. № 1. С. 38–43. https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299932.

Звіт про стратегічну екологічну оцінку Регіонального плану управління відходами у Хмельницькій області до 2030 року. [Електронний ресурс]. URL: https://www.adm-km.gov.ua/wp-content/uploads/2020/12/Звіт-СЕО-Рег-план-Хмельницька.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 03.07.2025).

Корбут М., Сафранов Т., Мальований М. Методичні підходи до оцінки екологічних ризиків від полігонів твердих побутових відходів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences.* 2024. Т. 337. № 3 (2). С. 187–196. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-28.

Луців Н.Г., Капраль А.Р. Впровадження інноваційних технологій переробки твердих побутових відходів в Україні. *Ефективна економіка.* 2024. № 12. https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.12.64.

Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 № 820-р : станом на 17 верес. 2020 р. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-р#Text (дата звернення: 03.07.2025).

Приходько В.Ю., Сафранов Т.А. Дослідження просторово-часових особливостей утворення твердих побутових відходів в регіонах України. *Екологічна безпека та природокористування.* 2025. Вип. 1(53). С. 69–81. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.69-81.

Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-IX. *Відомості Верховної Ради України.* 2023. № 17. Ст. 75. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#n802 (дата звернення: 03.07.2025).

Регіональний план управління відходами у Хмельницькій області до 2030 року : проєкт фінального варіанта / Хмельницька обласна рада. Хмельницький, 2021. 400 с. [Електронний ресурс]. URL: https://km-oblrada.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/regionalnyj-plan.pdf (дата звернення: 03.07.2025).

Сатін І., Романова Т., Панченко О. Огляд технологій збирання, перевезення, відновлення та видалення твердих побутових відходів. *Екологічна безпека та природокористування.* 2022. Вип. 44. № 4. С. 53–71. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.4.53-71.

Стан навколишнього природного середовища Хмельницької області у 2024 році : регіональна доповідь / Хмельницька облдержадміністрація, Департамент природ-

них ресурсів та екології. Хмельницький, серпень 2025. [Електронний ресурс]. URL: https://www.adm-km.gov.ua/wp-content/uploads/2025/08/Регіональна-доповідь-Стан-навколишнього-природного-середовища-Хмельницької-області-у-2024-пдф.pdf (дата звернення: 06.07.2025).

Drozdowski J., Labiak P., Czekala W. Modern technologies for waste management: a review. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. № 15. [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/372775647_Modern_Technologies_for_Waste_Management_A_Review (дата звернення 04.07.2025).

Honcharenko I., Anishchenko L., Pisnia L. Development of priority measures (solutions) for the environmentally safe management of municipal waste at the community level. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020a. Vol. 2. № 3(52). P. 17–25. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.203687.

Honcharenko I., Anishchenko L., Pisnia L. Expert-analytical assessment of environmental safety of solid household waste management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020b. № 1(103). P. 63–76. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.197007.

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) : Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Berlin : Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2012. [Електронний ресурс]. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html (дата звернення: 27.05.2025).

LANUV NRW. Fachbericht 158 : Abfallwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf : LANUV NRW, 2021. [Електронний ресурс]. URL: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/LANUV-Fachbericht_158.pdf (дата звернення: 27.05.2025).

Municipal Solid Waste in Ukraine: Development Potential. IFC, World Bank Group, 2015. 100 p. [Електронний ресурс]. URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/839801556599035128/pdf/Municipal-Solid-Waste-in-Ukraine-Development-Potential.pdf (дата звернення: 02.07.2025).

OECD. Waste Management and the Circular Economy in Selected OECD Countries: Evidence from Environmental Performance Reviews, OECD Environmental Performance Reviews. Paris : OECD Publishing, 2019. https://doi.org/10.1787/9789264309395-en.

Khan I., Haq F., Kiran Mehwish, Aziz T. Circular economy and waste management: transforming waste into resources for a sustainable future. *International journal of Environmental Science and Technology*. 2025. № 22(16). https://doi.org/10.1007/s13762-025-06750-5.

Hariyani D., Hariyani P., Mishra S., Sharma M.K. A literature review on waste management treatment and control techniques. *Sustain. Futur.* 2025. № 9. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100728.

References

Andreishyna, N. (2021, November 15). Skilky ukraintsiv hotovi sortuvaty smittia? [How many Ukrainians are ready to sort garbage?]. *Active Group.* [Electronic resource] URL: https://activegroup.com.ua/2021/11/15/skilki-ukraynciv-gotovi-sortuvati-smittya/ (access date 05.07.2025) [in Ukrainian].

Vysochanska, M., Mishenin, Ye. (2024). Systemy upravlinnia tverdymy pobutovymy vidkhodamy Ukrainy z urakhuvanniam yevropeiskoho dosvidu [Solid waste management systems of Ukraine considering European experience]. *Ahroekolohichnyi zhurnal [Agroecological Journal]*, 1, 38–43. https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299932 [in Ukrainian].

Khmelnytskyi Regional State Administration (2020). Zvit pro stratehichnu ekolohichnu otsinku Rehionalnoho planu upravlinnia vidkhodamy u Khmelnytskii oblasti do 2030 roku [Report on the strategic environmental assessment of the Regional Waste Management Plan in Khmelnytskyi region until 2030]. [Electronic resource] URL: https://www.adm-km.gov.ua/wp-content/uploads/2020/12/Звіт-СЕО-Рег-план-Хмельницька.pdf?utm_source=chatgpt.com (access date 03.07.2025) [in Ukrainian].

Korbut, M., Safranov, T., Malovanyi, M. (2024). Metodychni pidkhody do otsinky ekolohichnykh ryzykiv vid polihoniv tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Methodical approaches to the assessment of environmental risks from municipal solid waste landfills]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337 (3(2)), 187–196. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-28 [in Ukrainian].

Lutsiv, N.H., Kapral, A.R. (2024). Vprovadzhennia innovatsiinykh tekhnolohii pererobky TPV v Ukraini [Implementation of innovative technologies for MSW processing in Ukraine]. *Elektronnyy zhurnal "Efektyvna ekonomika" [Electronic magazine "Effective Economy"]*, 12. https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.12.64 [in Ukrainian].

Kabinet Ministriv Ukrainy (2017, November 8). Pro skhvalennja Nacionaljnoji strateghiji upravlinnja vidkhodamy v Ukrajini do 2030 roku: Rozporiadzhennia № 820-r (stanom na 17 veresnia 2020 r.) [On the Approval of the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030: Order № 820-r (as of September 17, 2020)]. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p#Text (access date 03.07.2025) [in Ukrainian].

Prykhodko, V.Yu., Safranov, T.A. (2025). Doslidzhennia prostorovo-chasovykh osoblyvostei utvorennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv v rehionakh Ukrainy [Study of spatio-temporal features of municipal solid waste generation in the regions of Ukraine]. *Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia [Environmental safety and environmental management]*, 1 (53), 69–81. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.69-81 [in Ukrainian].

Zakon Ukrainy "Pro upravlinnia vidkhodamy" vid 20 chervnia 2022 r. № 2320-IX. [Law of Ukraine "On waste management" activity no. 2320-IX] (2022, June 20). Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. 2023. № 17. St. 75. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#n802 (access date 03.07.2025) [in Ukrainian].

Khmelnytskyi Regional Council (2021, July). *Rehionalnyi plan upravlinnia vidkhodamy u Khmelnytskii oblasti do 2030 roku: proiekt finalnoho variantu* [Regional waste management plan in Khmelnytskyi region until 2030: Final draft]. Khmelnytskyi. [Electronic resource] URL: https://km-oblrada.gov.ua/wp-content/uploads/2021/07/regionalnyj-plan.pdf (access date 03.07.2025) [in Ukrainian].

Satin, I., Romanova, T., Panchenko, O. (2022). Ohliad tekhnolohii zbyrannia, perevezennia, vidnovlennia ta vydalennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Overview of technologies for collection, transportation, recovery, and disposal of municipal solid waste]. *Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia [Environmental safety and environmental management]*, 44(4), 53–71. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.4.53-71 [in Ukrainian].

Khmelnytska Oblasna Derzhavna Administratsiia, Departament Pryrodnykh Resursiv ta Ekolohii (2025, August). Stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Khmelnytskoi oblasti u 2024 rotsi: rehionalna dopovid [State of the Environment of Khmelnytskyi Region in 2024: Regional Report]. Khmelnytskyi: Khmelnytska Oblasna Derzhadministratsiia, Departament Pryrodnykh Resursiv ta Ekolohii. [Electronic resource] URL: https://www.adm-km.gov.ua/wp-content/uploads/2025/08/Регіональна-доповідь-Стан-навколишнього-природного-середовища-Хмельницької-області-у-2024-пдф.pdf (access date 05.07.2025) [in Ukrainian].

Drozdowski, J., Łabiak, P., Czekala, W. (2023) Modern Technologies for Waste Management: areview. *Applied Sciences*, 13(15). [Electronic resource] URL: https://www.researchgate.net/publication/372775647_Modern_Technologies_for_Waste_Management_A_Review (access date 04.07.2025) [in English].

Honcharenko, I., Anishchenko, L., Pisnia, L. (2020a). Development of priority measures (solutions) for the environmentally safe management of municipal waste at the community level. *Technology Audit and Production Reserves*, 2/3(52), 17–25. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.203687 [in English].

Honcharenko, I., Anishchenko, L., Pisnia, L. (2020b). Expert-analytical estimation of environmental safety of solid household waste handling processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(103)), 63–76. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.197007 [in English].

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2012). Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Berlin. [Electronic resource] URL: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html (access date 27.05.2025) [in German].

LANUV NRW (2021). Fachbericht 158: Abfallwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: LANUV NRW. [Electronic resource] URL: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/LANUV-Fachbericht_158.pdf (access date 27.05.2025) [in German].

IFC, World Bank Group (2015). *Municipal solid waste in Ukraine: Development potential.* World Bank Group. [Electronic resource] URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/839801556599035128/pdf/Municipal-Solid-Waste-in-Ukraine-Development-Potential.pdf (access date 02.07.2025) [in English].

OECD (2019). Waste Management and the Circular Economy in Selected OECD Countries: Evidence from Environmental Performance Reviews, OECD Environmental Performance Reviews, OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/9789264309395-en [in English].

Khan, I., Haq, F., Kiran, Mehwish, Aziz, T. (2025). Circular economy and waste management: transforming waste into resources for a sustainable future. *International journal of Environmental Science and Technology,* 22(16). https://doi.org/10.1007/s13762-025-06750-5 [in English].

Hariyani, D., Hariyani, P., Mishra, S., Sharma, M.K. (2025). A literature review on waste management treatment and control techniques. *Sustain. Futur.*, 9. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100728 [in English].

Отримано: 27.10.2025
Прийнято: 28.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 712.253:581.9(477.63-25)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.28

ОСОБЛИВОСТІ ЛАНДШАФТНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ВИДОВЕ РІЗНОМАНІТТЯ ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ ПАРКУ ВОЇНАМ АТО М. П'ЯТИХАТКИ ДНІПРОПЕТРОВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

О. Є. Іванченко[1], Ю. Л. Рибак[2], А. М. Пугач[3], Г. Є. Токарчук[4]

У статті здійснено аналіз ландшафтної структури парку Воїнам АТО м. П'ятихатки. Проведено інвентаризацію деревних насаджень паркової території, зазначено типи садово-паркових композицій з деревної й кущової рослинності. Досліджено окремі таксаційні показники та віталітетний стан деревних рослин. Опорним композиційним планом рекреаційного об'єкта є зірчастий, проте чіткої структури не спостерігається. У місці перетину планувальних осей розташовано тимчасово непрацюючий фонтан. Згідно з отриманими результатами, у парку зростає 849 екз. деревних рослин, які репрезентовані 41 видом із 17 родин. Більша частка з них належить до листяних порід (близько 85,0%). За життєвою формою це переважно дерева, декоративні кущі в насадженнях майже відсутні, зустрічається один вид ліан – Parthenocissus quinquefolia (L.) Planch. Домінують у парковому фітоценозі за кількістю екземплярів Robinia pseudoacacia L. і Tilia platyphyllos Scop. Найчисельнішими за кількістю екземплярів родинами виявилися Aceraceae й Tiliaceae, за видовим різноманіттям – Aceraceae й Ulmaceae. Близько 75,0% усіх деревних насаджень парку є інтродуцентами, батьківщиною яких є переважно Північна Америка, територія країн Балканського півострова, Північний Китай, далекий Схід тощо. Найчисельнішою є група дерев з діаметром штамбу від 30,0 до 39,9 см, а саме 34,0% від усіх насаджень паркового фітоценозу. Висота чверті рослин у насадженнях парку коливається від 9,1 до

[1] кандидат біологічних наук, доцент,
завідувач кафедри садово-паркового мистецтва та ландшафтного дизайну
(Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро)
e-mail: ivanchenko.o.ye@dsau.dp.ua
ORCID: 0000-0002-8338-8543
[2] кандидат біологічних наук,
старший викладач кафедри лісового та садово-паркового господарства
(Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк)
e-mail: rybak.julua@vnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6132-1743
[3] доктор наук з державного управління, професор,
декан інженерно-технологічного факультету
(Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро)
e-mail: anpugach13@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5586-424X
[4] магістр садово-паркового господарства
(Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро)
ORCID: 0009-0002-2189-9361

13,0 м. У середньому діаметр дерев дорівнює 32 см, висота – близько 10 м. За віталітетним станом найрепрезентованішою за кількістю особин виявилася група рослин без ознак ослаблення, їх у насадженнях 41,7% щодо всієї кількості. Сумарна кількість рослин, які мають помірні й середні ознаки пошкодження, становить біля 51,1%, 5,9% усіх насаджень є сильно ослабленими. Наявна невелика частка свіжого сухостою та сухостою минулих років, 0,6 і 0,2% відповідно.

Ключові слова: *м. П'ятихатки, центральний парк, просторова структура, дендрофлора, життєвий стан, таксаційні показники.*

FEATURES OF LANDSCAPE ORGANIZATION AND SPECIES DIVERSITY OF TREE PLANTINGS IN THE ATO SOLDIERS' PARK, PIATYKHATKY, DNIPROPETROVSK REGION

O. E. Ivanchenko, Yu. L. Rybak, A. M. Pugach, G. E. Tokarchuk

An analysis of the landscape structure of the ATO Soldiers' Park in the city of Piatykhatky was carried out. An inventory of the park's woody plantings was conducted, the types of garden and park compositions formed by tree and shrub vegetation were identified. Certain dendrometric parameters and the vital condition of the woody plants were examined. The dominant compositional plan of the park area is star-shaped, although a clearly defined structure is not observed. At the intersection of the planning axes, there is a temporarily non-functioning fountain. According to the results obtained, the park contains 849 specimens of woody plants, representing 41 species from 17 families. Most of them belong to deciduous species (about 85.0%). In terms of life form, these are trees; ornamental shrubs are almost absent in the plantings, and only one species of liana is found – Parthenocissus quinquefolia (L.) Planch. Phytocenosis, Robinia pseudoacacia L. and Tilia platyphyllos Scop dominate in the park in terms of the number of specimens. Aceraceae and Tiliaceae were found to be the most numerous families in terms of the number of specimens, while the highest species diversity was observed in Aceraceae and Ulmaceae. About 75.0% of all woody plantings in the park are introduced species, whose native regions are mainly North America, the Balkan Peninsula, Northern China, the Far East, and others. The most numerous group consists of trees with trunk diameters ranging from 30.0 to 39.9 cm, accounting for 34.0% of all plantings in the park phytocoenosis. The height of a quarter of the plants in the park plantings ranges from 9.1 to 13.0 m. On average, the tree diameter is 32 cm, and the height is approximately 10 m. In terms of vitality, the most represented group in terms of number of plants consists of plants without signs of weakening, this group accounts for 41.7% of the total. The total number of plants showing mild and moderate signs of damage is about 51.1%, while 5.9% of all plantings are severely weakened. A small proportion of fresh deadwood and deadwood from previous years is present in the park, accounting for 0.6% and 0.2%, respectively.

Key words: *Piatykhatky city, central park, spatial structure, dendroflora, vitality, taxonomic indicators.*

Вступ

За умов швидких темпів урбанізації, стрімкого збільшення ступеня забруднення довкілля полютантами та зниження частки зелених насаджень у населених пунктах важлива роль у створенні сприятливого середовища для мешканців належить зеленим насадженням (Кучерявий та ін., 2013). Південь Сходу України належить до індустріально розвинутих регіонів, якому притаманний суттєвий ступінь забруднення повітря, ґрунту й водних об'єктів (Бондаренко та ін., 2019). Окрім цього, варто підкреслити й клімат цієї території, який характеризується значними перепадами температури, низькою вологістю повітря, атмосферними та ґрунтовими посухами, нерівномірними опадами протягом року тощо (Горб і Дук, 2006). Указані причини суттєво впливають на декоративність зелених насаджень і повноцінність виконання ними санітарно-гігієнічних функцій. Проте, незважаючи на такі напружені умови середовища, у містах з розвинутою промисловістю створюється мережа зелених насаджень серед яких невід'ємним компонентом є міські парки (Зібцева, 2018).

Питанням сталого розвитку міст та участі зелених насаджень у покращанні середовища приділяється натепер багато уваги, що висвітлено в наукових публікаціях (Куйбіда і Білоконь, 2009), але дуже часто такі дослідження стосуються великих міст (Іванченко і Бессонова, 2014), утім, як насадження малих міст і селищ досліджені недостатньо, у наукових публікаціях зустрі-

чається обмаль інформації й щодо невеликих населених пунктів (Бідолах та ін., 2012; Зібцева, Півнюк, 2013; Бессонова, Іванченко, 2020; Бессонова, Іванченко, 2021; Пушка, Шлапак, 2024). У нашій країні близько ¾ міст належать до категорії малих (Зібцева, 2021). Отже, згідно з вищезазначеним, тепер актуальною є оцінка стану паркових насаджень як невід'ємних елементів системи озеленення малих міст, планування заходів щодо їх реконструкції, формулювання рекомендацій стосовно підбору асортименту й благоустрою територій.

Метою досліджень було оцінити видовий асортимент деревних насаджень парку Воїнам АТО м. П'ятихатки, основні таксаційні показники та віталітетний стан насаджень.

Матеріал і методи

Оцінку видового складу дендрофлори парку здійснювали інвентаризаційним методом згідно з нормативними документами (Інструкція…, 2001), при цьому вказували видову належність, за наявності декоративну форму, кількість екземплярів, вікові показники, з таксаційних параметрів – діаметр штамбу, висоту рослини, а також віталітетний стан, наявність пошкоджень, шкідників, хвороб тощо. Таксацію теж здійснювали (Гром, 2010). Діаметр стовбура на висоті 1,3 м визначали мірною дюралевою вилкою (1000 мм ВВЛ-100), висоту дерев – за допомогою висотоміра-кліонометра РМ-5 Suunto. Видовий спектр деревних насаджень оцінювали за посібниками (Калініченко, 2003; Дендрофлора України, 2005; Заячук, 2008).

Підставою для визначення вікових характеристик був загальний стан рослин, таксаційні показники, оцінка екологічних чинників довкілля, а також історичні відомості стосовно часу створення парку й термінів проведення часткової реконструкції. Визначали тип садово-паркових композицій (далі – ТСПК) – група (моно- та полівидова, чиста, змішана), рядові й алейні посадки, живі огорожі, солітери тощо. Ландшафтну структуру парку оцінювали згідно з методикою, наведеною в підручнику (Кучерявий, 2017), акцентували на стані елементів благоустрою, наявності МАФів, садово-паркового обладнання та меблів тощо.

Оцінку віталітетного стану проводили за шкалою Х.Г. Якубова, наведеною в навчальному посібнику (Бессонова, 2019). За отриманими даними щодо частки участі в насадженнях дерев різних категорій віталітетного стану розраховували індекс життєвого стану паркових насаджень. Результати інтерпретували таким чином: за значення цього показника від 100 до 80 у. о. деревостан уважається здоровим, від 79 до 50 – пошкодженим, 19 і нижче – зруйнованим.

Результати та їх обговорення

Загальна площа парку Воїнам АТО у м. П'ятихатки становить близько 6,2 га. Садово-парковий об'єкт є єдиним місцем відпочинку мешканців міста й знаходиться в самому його центрі. Інших рекреаційних об'єктів подібного характеру в місті немає. Створення парку припадає на 60-ті роки ХХ ст. У різних локаціях парку знаходяться пам'ятники та місця пошани, серед яких варто виділити «Меморіал Синам України, які загинули на війні з російськими окупантами», «Героям Небесної Сотні», «Загиблим землякам, ліквідаторам аварії на ЧАЕС», пам'ятник Т. Шевченку. Серед сакральних об'єктів у парку побудовано Храм Воздвиження Чесного і Животворчого Христа Господнього ПЦУ, а з північно-східного боку до парку прилягає Свято-Благовіщенський храм.

Парк розташований на рівнинній ділянці, без наявних перепадів рельєфу. Базовою ландшафтною композицією об'єкта рекреації є зірчаста. Пейзажні картини розкриваються рухом алеями-променями, від периферії до центру. За наявності такої ландшафтної композиції доречним буде створення кільцевих зв'язків між цими алеями, які будуть об'єднувати їх між собою. Натепер їх функцію виконують стихійні стежки, «протоптані» відвідувачами та транзитними пішоходами. У кінці однієї з алей розташований напівзруйнований танцювальний майданчик, перед ним – невеличкий фонтан, тимчасово непрацюючий (рис. 1).

До парку можна потрапити через чотири входи: головний – розташований біля будівлі ЦНАПу, три другорядних – з боку храму, вул. Олександрійської та приватної житлової забудови.

На час досліджень у парку проводилися роботи з благоустрою: зруйноване асфальтне покриття на центральних алеях замінено на мощення, оновлено садово-паркові меблі, з'явилися урни-смітники, ліхтарі тощо. Парк по периметру не огорожений парканом, з двох сторін він прилягає до приватної житлової забудови, з іншої – до ЦНАПу П'ятихатської РДА.

Паркова територія розділена на притаманні такому типу рекреаційних об'єктів

Рис. 1. Центральна ділянка парку Воїнам АТО м. П'ятихатки
Джерело: сформовано автором.

функціональні зони: зона тихого відпочинку; дитяча зона; зона для заняття спортом. Перша зона обладнана садовими лавами, альтанками для відпочину. Територія дитячої зони представлена майданчиком, огородженим парканом, який обладнаний сучасними гойдалками та має штучне гумове покриття. На ділянці парку, яка дотична до приватної житлової забудови, знаходиться напівзруйнована дитяча фортеця. Зона для заняття спортом складається з найпростіших спортивних знарядь, проте доглянута.

Варто зазначити, що потужних промислових підприємств поблизу парку, які б впливали через викиди на стан зелених насаджень паркового фітоценозу, немає. Так, П'ятихатський завод металургійних сумішей знаходиться на відстані 1,4 км від рекреаційного об'єкта, його діяльність не шкодить довкіллю. Проте на відстані біля 25 км розташоване м. Вільногірськ, яке має потужну металургійну та гірничо-збагачувальну промисловість, а західніше на 15 км – м. Жовті Води, біля якого розташовані підприємства з виробництва природного урану.

За даними проведеної інвентаризації насаджень, у парку Воїнам АТО м. П'ятихатки зростає 41 вид дерев у кількість 849 екземплярів. Це як листяні, так і хвойні деревні рослин, причому частка участі перших набагато вища (табл. 1). Кількість представників відділу *Gymnospermae* становить 15,3% (усього 130 особин), переважно це види родини *Pinaceae*, а саме: *Picea pungens* Engelm та її форма '*Glauca*', *Picea abies* L., *Pinus pallasiana* D. Don, а також *Picea glauca* (Moench) Voss, яка не дуже поширена в міських насадженнях. З родини *Cupressaceae* в парку виявлено лише *Juniperus communis* L. Середній вік насаджень – близько 50 років.

Варто зазначити, що в насадженнях парку майже зовсім відсутні декоративні кущі, що негативно відбивається на естетичному вигляді паркових композицій і повинно бути врахованим під час розробки проєкту часткової реконструкції. У кількості 30 шт. зростає *J. communis*, а такі види, як *Sambucus nigra* L., *Rosa canina* L. і *Rosa* × *hybrida sp.*, презентовані поодинокими екземплярами. Зустрічається один вид ліан – *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch, який обвиває зруйнований парках як штучна опора. Усі інші представники дендрофлори рекреаційного об'єкта належать до життєвої форми дерева.

Усі презентовані в парку види дерев належать до 17 родин: 2 – з родини *Gymnospermae*, 15 – *Magnoliophyta*. Найчисленнішими родинами за часткою участі в насадженнях є *Fabaceae* й *Tiliaceae*. Загалом родина *Fabaceae* представлена 147 екз. дерев, це становить 17,3% усієї дендрофлори парку, для родини *Tiliaceae* ці цифри становлять 136 екз. та 16,0% відповідно. Меншою часткою представлені *Pinaceae*, *Ulmaceae*, *Aceraceae* та *Hippocastanaceae*, а саме 11,8; 10,1; 12,1 та 9,4% усіх рослин. Нечасто в насадженнях трапляються особини, що належать до родин *Juglandaceae*, *Elaeagnaceae*, *Simaroubaceae*, *Viburnaceae*. Кількість видів, якими представлені родини,

Таблиця 1

Видове різноманіття деревних насаджень парку Воїнам АТО м. П'ятихатки (джерело: сформовано автором)

Українська назва	**Латинська назва**	**Кількість, шт.**	**% від загальної кількості особин**	**Абориген/ інтродуцент**
Голонасінні (*Gymnospermae*)				
Родина Соснові (*Pinaceae*)				
Ялина колюча	*Picea pungens* Engelm	32	3,8	ін.
Ялина колюча ф. 'Глаука'	*Picea pungens* Engelm f. '*Glauca*'	35	4,1	ін.
Ялина звичайна	*Picea abies* L.	18	2,1	ін.
Ялина канадська	*Picea glauca* (Moench) Voss	14	1,7	ін.
Сосна Палласа	*Pinus pallasiana* D. Don	1	0,1	ін.
Кипарисові (*Cupressaceae*)				
Ялівець звичайний	*Juniperus communis L.*	30	3,5	ін.*
Усього хвойних		130	**15,3**	
Покритонасінні (*Magnoliophyta*)				
Родина Бобові (*Fabaceae*)				
Робінія звичайна	*Robinia pseudoacacia* L.	107	12,6	ін.
Гледичія триколючкова	*Gleditsia triacanthos* L.	40	4,7	ін.
Родина Кленові (*Aceraceae*)				
Клен гостролистий	*Acer platanoides* L.	63	7,4	аб.
Клен польовий	*Acer campestre* L.	20	2,4	аб.
Клен-явір	*Acer pseudoplatanus* L.	7	0,8	ін.*
Клен ясенелистий	*Acer negundo* L.	9	1,0	ін.
Клен сріблястий	*Acer saccharum* Marsh.	3	0,4	ін.
Клен татарський	*Acer tataricum* L.	1	0,1	аб.
Родина Липові (*Tiliaceae*)				
Липа широколиста	*Tilia platyphyllos* Scop.	102	12,0	ін.*
Липа серцелиста	*Tilia cordata* Mill.	34	4,0	аб.
Родина Гіркокаштанові (*Hippocastanaceae*)				
Гіркокаштан звичайний	*Aesculus hippocastanum* L.	80	9,4	ін.
Родина В'язові (*Ulmaceae*)				
В'яз низький	*Ulmus pumila* L.	65	7,7	ін.
В'яз граболистий	*Ulmus carpinifolia* Gilib.	13	1,5	аб.
В'яз гладкий	*Ulmus laevis* Pall.	5	0,6	аб.
В'яз шорсткий	*Ulmus glabra* Huds.	1	0,1	аб.
В'яз дрібнолистий	*Ulmus parvifolia* Jacq.	2	0,2	ін.
Родина Розові (*Rosaceae*)				
Горобина звичайна	*Sorbus aucuparia* L.	32	3,8	аб.
Троянда садова	*Rosa × hybrida sp.*	4	0,5	ін.
Абрикос звичайний	*Armeniaca vulgaris* Lam.	3	0,4	ін.
Шипшина собача	*Rosa canina* L.	1	0,1	аб.
Яблуня домашня	*Malus domestica* Borkh.	1	0,1	аб.
Вишня звичайна	*Cerasus vulgaris* Mill.	1	0,1	ін.
Родина Вербові (*Salicaceae*)				
Тополя чорна	*Populus nigra* L.	19	2,2	аб.
Тополя Сімона	*Populus simoni* Carr.	1	0,1	ін.

Продовження таблиці 1

Родина Березові (*Betulaceae*)				
Береза повисла	*Betula pendula* Roth.	17	2,0	аб.
Родина Симарубові (*Simaroubaceae*)				
Айлант найвищий	*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle	1	0,1	ін.
Родина Шовковицеві (*Moraceae*)				
Шовковиця біла	*Morus alba* L.	41	4,8	ін.
Маклюра яблуконосна	*Maclura pomifera* (Raf.) Schneid.	11	1,3	ін.
Родина Букові (*Fagaceae*)				
Дуб звичайний	*Quercus robur* L.	2	0,2	аб.
Дуб червоний	*Quercus rubra* Du Rei	17	2,0	ін.
Родина Калинові (*Viburnaceae*)				
Бузина чорна	*Sambucus nigra* L.	1	0,1	аб.
Родина Горіхові (*Juglandaceae*)				
Горіх грецький	*Juglans regia* L.	12	1,4	ін.
Родина Маслинові (*Elaeagnaceae*)				
Ясен звичайний	*Fraxinus excelsior* L.	1	0,1	аб.
Ясен ланцетолистий	*Fraxinus lanceolata* Borkh.	1	0,1	ін.
Родина Виноградові (*Vitaceae*)				
Виноград дівочій п'ятилисточковий	*Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch.	1	0,1	ін.
Усього листяних		719	84,7	
Усього рослин у насадженні		849	100,0	

*Примітка: * – автохтонна рослина для лісової зони України, для Степу аллохтонна.*

варіює від 6 для *Aceraceae* та *Rosaceae*, 5 – для *Pinaceae* та *Ulmaceae*, до 1–2 види – для інших родин.

До видів-домінантів у паркових насадженнях належать *Robinia pseudoacacia* L. і *Tilia platyphyllos* Scop. Їх внесок у складі насаджень дорівнює 12,6 та 12,0% відповідно. У меншій, але вагомій кількості зустрічаються *Acer platanoides* L. (7,42%), *Aesculus hippocastanum* L. (9,42%) та *Ulmus pumila* L. (7,66%). Дещо менше на дослідній ділянці трапляються *Gleditsia triacanthos* L., *Tilia cordata* Mill.і *Morus alba* L. (4,7%; 4,0% та 4,8%). Інші види дерев мають меншу частку участі в насадженнях. Поодиноко зустрічаються *P. pallasiana*, *Acer tataricum* L., *Ulmus glabra* Huds. та *Ulmus carpinifolia* L., *Populus simonii* Carrière, *Fraxinus excelsior* L. і *Fraxinus lanceolata* Borkh тощо.

Поміж садово-паркових композицій з дерев можна навести алейні посадки *T. platyphyllos* та *A. hippocastanum* (рис. 2), групи з *P. pungens* та *P. glauca* (рис. 3), *J. communis*, рядові посадки *U. pumila*, *T. cordata*, *P. pungens*. Усі екземпляри *A. hippocastanum* добре відновилися після омолоджуючої обрізки.

До північної частини парку прилягає дитячий садок, до західної – автошкола, які не входять до території парку, проте вони мають своє озеленення, яке складається переважно з *Acer platanoides* L., *Betula pendula* Roth., *Sorbus aucuparia* L., *A. hippocastanum*, *T. cordata*. У парку наявні пні від загиблих або видалених екземплярів *R. pseudoacacia*, *M. alba*, *U. pumila* з утворенням рясної прикореневої порослі. Під пологом дерев зустрічається самосів *Ailanthus altissima* L., проте в парку виявлено лише одна особина цього таксону.

Найбільше число екземплярів деревної рослинності в насадженнях парку є алохтонними видами, а саме 75,1% щодо кількості всіх рослин (див. табл. 1). Це *R. pseudoacacia*, *A. hippocastanum*, *U. pumila*, які мають значну частку участі в парковому фітоценозі. Такий вид, як *T. Platyphyllos*, є аборигенним для зони широколистих і мішаних лісів України, проте інтродуцентом для степової зони нашої країни. З природних ареалів походження інтродуцентів превалює Північна Америка, Балканський півострів, країни далекого Сходу, Північний Китай, Корея. Автохтонних видів за кількі-

Рис. 2. Алея з A. *hippocastanum* у парку Воїнам АТО
Джерело: сформовано автором.

Рис. 3. Групові посадки P. *pungens* на території рекреаційного об'єкта
Джерело: сформовано автором.

стю екземплярів нараховується 24,9%, серед яких більшість становлять *A. platanoides* і *T. cordata*, у меншій кількості – *A. tataricum*, *S. aucuparia* тощо.

З деревних рослин, які нечасто трапляються в насадженнях загального призначення в Дніпропетровській області, варто виділити 11 екз. *Maclura pomifera* (Raf.) Schneid., а також насадження *Quercus rubra* Du Rei (17 екз.). Усі особини перебувають у відмінному життєвому стані, але потрібно зазначити, що стовбури окремих екземплярів *Q. rubra* дещо витягнуті через нестачу інсоляції.

За таким таксаційним показником, як діаметр штамбу, найчисленнішими є рослини з діаметром від 30,0 до 39,9 см (рис. 4). Таких у парковому фітоценозі зростає 276 шт., або близько 34,0% від усієї кількості дерев. До цієї групи належить близько ½ особин *G. triacanthos*, *Q. rubra*, *T. platyphyllos* (57,5; 58,8 та 48,0% відносно їх чисельності в насадженнях парку). До цієї категорії потрапили 82,4% екземплярів *B. pendula*, 66,7% – *U. carpinifolia*, а також поодинокі дерева *Armeniaca vulgaris* Lam., *Acer saccharum* Marsh. та *A. tataricum*, *P. simoni* тощо.

У меншій кількості в насадженнях парку презентована категорія дерев з діаметром 20,0–29,9 см – 226 екз. (27,8%). Ця група також має вагому частку в насадженнях

парку й значну кількість у ній становлять екземпляри *T. platyphyllos* як виду-домінанта, *T. Cordata* й *A. hippocastanum* (40,2; 88,2 та 51,3% усіх екземплярів зазначених видів).

Дерев з діаметром штамбу до 9,9 см у насадженнях нараховано 99 екз. Це молоді дерева, посаджені під час часткового відновлення насаджень паркового фітоценозу (*S. aucuparia*, *P. pungens* та *A. platanoides*). До цієї групи ввійшли й дерева, які виникли через природне поновлення – поросль, кореневі відприски, самосів. Частково це інвазійні види – *U. pumila*, *R. pseudoacacia*, поодинокі екземпляри *G. triacanthos*, *Populus nigra* L. та *Ulmus parvifolia* Jacq.

Однаковим числом особин у насадженнях репрезентовані рослини з діаметром стовбура 10–19,9 см і 40–49,9 см – 8,4% і 8,5%. У першій групі домінує *U. pumila* та *P. glauca*, у другій – *A. hippocastanum* і *T. platyphyllos*. З діаметром штамбу від 50,0 до 59,9 см у парку зростають тільки 22 екземпляри: 8 шт. *R. pseudoacacia* , 4 шт. *G. triacanthos*, по 2 шт. *M. alba* й *A. hippocastanum*, по 3 екз. кожного *A. platanoides* та *A. tataricum*. Дерев з діаметром стовбура більшим за 60 см у парку нараховано 52 екз., або 6,40% від усієї їх кількості. Серед них варто виділити старовікові екземпляри *U. pumila* та *R. pseudoacacia*, *P. nigra*, *M. alba*. Усереднений показник діаметра стовбура становить близько 32 см.

За показником висоти дерев найвагомішою за кількістю виявилася категорія рослин зі значеннями цього показника від 9,1 до 13,0 м – 216 шт., або 25,4% усіх дерев (рис. 5). До них належать ½ усіх *A. hippocastanum* і *T. platyphyllos*, численними також є *B. pendula* (82,4%), *Juglans regia* L. (83,3%), *T. cordata* (61,8%), *M. alba* (31,7%) та *P. pungens* (23,9%). Наступними за чисельною перевагою є групи з показниками діаметра стовбура 6,1–9,0 і 13,1–17,0 м. Вони репрезентовані в насадженнях майже однаковими частками – 17,9% та 17,7% щодо всіх дерев парку. У групі з показниками від 6,1 до 9,0 см домінують *A. hippocastanum* (43,8%), *U. pumila* (33,9%), *P. pungens* 'Glauca' (40,0%), *S. aucuparia* (37,5%). Вистотою від 13,1 до 17,0 м характеризуються 82,4% усіх представників *Q. rubra*, 33,3% *A. platanoides*, 14,0% *R. pseudoacacia*, 35,3 % *T. platyphyllos*.

Однаково представлені в насадженнях парку й категорії висот до 3 м, 3,1–6,0 м та 17,1–21,0 м. До них належать 11,3; 11,9 та 11,4% усіх дерев дослідної території відповідно. До 1-ї категорії зараховано всі нечисленні чагарники та молоді посадки або рослини, що утворилися через природне поновлення. Друга має більше видове різноманіття. У ній переважає *R. pseudoacacia*, менше репрезентовані *U. pumila*, *P. pungens* та *S. aucuparia*. Висоту 17–21 м мають старі екземпляри *R. pseudoacacia* й *G. triacanthos* (31 і 28 шт.).

Дерев вищих за 21 м у парку 37 шт. Їх асортимент нерізноманітний і представлений у більшому ступені *U. pumila*

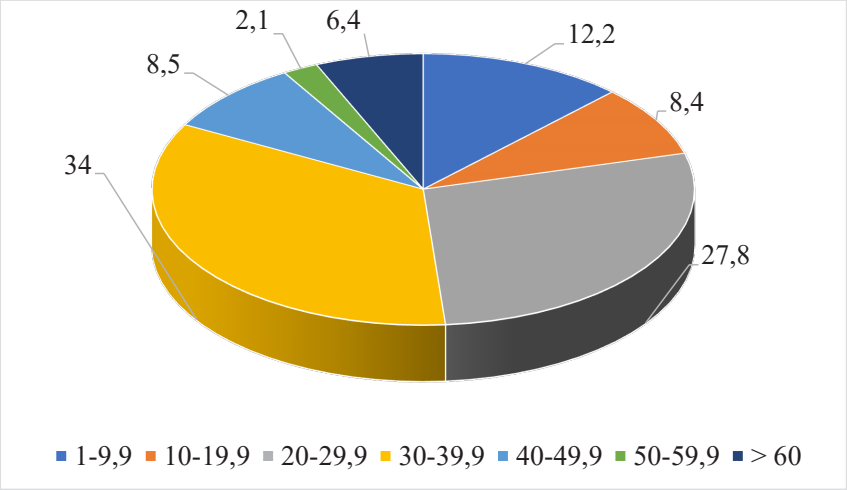


Рис. 4. Частка участі деревних рослин парку Воїнам АТО в категоріях за діаметром стовбура, %

Джерело: сформовано автором.

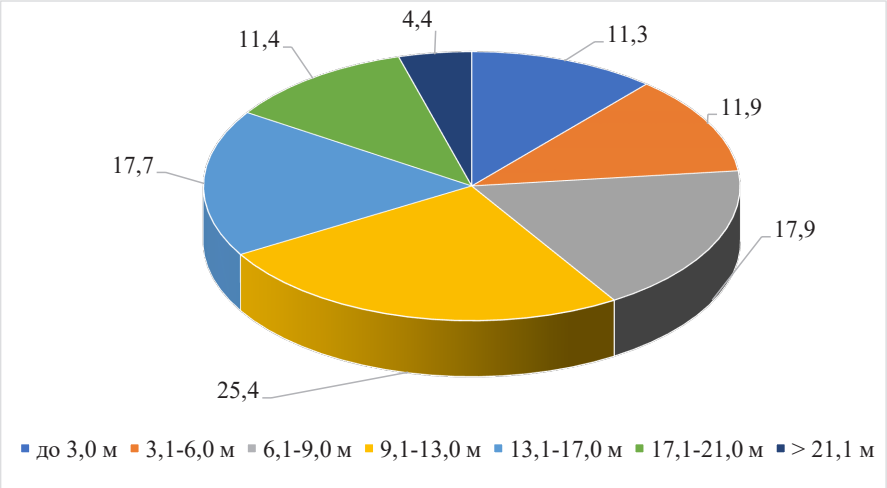


Рис. 5. Розподіл деревних насаджень парку Воїнам АТО за категоріями висот, %
Джерело: сформовано автором.

й *R. pseudoacacia*, поодинокими екземплярами *U. carpinifolia*, *G. triacanthos*, *A. platanoides*, *P. Nigra* й *M. alba*. Середні висотні показники деревостану парку становлять 10 м.

Аналіз деревної рослинності парку Воїнам АТО вказує, що загальна кількість екземплярів, які належать до категорії «здорові» в насадженнях, – 41,7% щодо всіх рослин (таблиця 2). Ця група має найбільшу видову різноманітність. Домінують у цій групі особини *R. pseudoacacia* й *T. platyphyllos* як найрозповсюдженіші деревні породи в парковому насадженні, також численними є екземпляри *U. pumila* й *A. platanoides*. Ці рослини за візуальною оцінкою характеризуються зеленими листками, які за формою та типом листкової поверхні відповідають видовим особливостям, мають щільну крону, оптимальні розміри приросту пагонів тощо.

Майже в половину меншою, але вагомою є частка рослин у насадженнях з ознаками помірних і середніх пошкоджень, яка становть 23,9% та 27,2% від загальної кількості рослин. У групі «помірно ослаблені» в найбільшому ступені презентовані такі види, як *U. pumila*, *G. triacanthos*, *A. platanoides*, *T. platyphyllos* та *T. cordata*, а також *R. pseudoacacia*. Згідно зі шкалою, за якою проводилася оцінка віталітетного стану насаджень парку, у цих екземплярів у кроні відмічено незначну кількість сухих гілок (до ¼), характерний для виду колір листків, крона слабкоажурна, приріст дещо ослаблений щодо фонових показників. Під час подеревної оцінки насаджень виявлено пошкодження окремих гілок крони без таких ознак на скелетних, нечисленні механічні пошкодження стовбура, подекуди водяні пагони (рис. 6). Категорія середньоослаблених рослин у насадженнях переважно репрезентована тим же видовим асортиментом, як і попередня. Виняток становлять майже всі екземпляри *A. hippocastanum*, які ввійшли до вказаної категорії через їх ураження гусенню білого американського метелика. У середньоослаблених дерев у кроні наявні від 25 до 50% всохлих гілок, листки дрібніші та світліші за звичайні, притаманні для певного виду деревної породи, подекуди попередчасно обпадають, відмічена ажурність крони.

Незначна кількість дерев у парковому фітоценозі належить до сильно ослаблених, а саме 5,9% усіх рослин (або 50 екз.) (див. табл. 2). Цим деревам властива значна частка сухих гілок (50–75%), дрібнолистість, хлорози, некротичні плями на листках різної локалізації, зріджена крона. Вагомою часткою серед таких рослин представлені особини *R. pseudoacacia*, у меншій кількості – *S. aucuparia*, *M. alba*, *P. pungens*, а також нечисленні екземпляри *Q. rubra*, *A. platanoides*, *T. platyphyllos*, *P. simoni*, *A. hippocastanum*, *G. triacanthos*.

Дерев, що відмирають, у парку нараховано всього 4 екз., що становить 0,5% насаджень. Виявлено сухостій (свіжий і минулих років) у кількості 5 і 2 екз. відповідно. Серед свіжого сухостою переважають молоді дерева *Sorbus aucuparia*, висаджені нещодавно, але протягом вегетаційного сезону вони загинули через відсутність догляду, переважно поливу. Сухостій мину-

Таблиця 2

Оцінка стану насаджень парку Воїнам АТО за віталітетом
(джерело: сформовано автором)

Види	**Загальна кількість рослин, шт.**	**Категорія стану дерев, шт.**							**Число екз., уражених хворобами й шкідниками**
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	
Acer campestre	20	9	9	1	1				
Acer negundo	9		3	5	1				4
Acer platanoides	63	34	16	8	2	1	1	1	4
Acer pseudoplatanus	7	1	2	4					1
Acer saccharum	3			2	1				
Acer tataricum	1			1					
Aesculus hippocastanum	80			78	2				80
Ailanthus altissima	1	1							
Arrenіaca vulgaris	3			1	2				
Betula pendula	17	12	5						
Cerasus vulgaris	1		1						
Fraxinus excelsior	1	1							
Fraxinus lanceolata	1	1							4
Gleditsia triacanthos	40	9	17	12	2				
Juglans regia	12	3	5	4					5
Juniperus communis	30	17	6	6	1				
Maclura pomifera	11	11							
Malus domestica	1		1						
Morus alba	41	19	5	9	8				4
Parthenocissus quinquefolia	1	1							
Picea abies	18	8	9	1					
Picea pungens	32	6	7	11	7	1			
Picea glauca	14	6	1	7					
Picea pungens f. '*Glauca*'	35	17	11	4	3				
Pinus pallasiana	1			1					
Populus nigra	19	5	6	8					
Populus simoni	1				1				
Quercus robur	2	2							1
Quercus rubra	17	8	7	1	1				
Robinia pseudoacacia	107	42	20	30	13	1		1	15
Rosa × hybrida	4		4						
Rosa canina	1		1						1
Sambucus nígra	1	1							
Sorbus aucuparia	32	15	4	5	4		4		
Tilia cordata	34	20	14						
Tilia platyphyllos	102	65	25	10	1	1			3
Ulmus carpinifolia	13	7	5	1					
Ulmus glabra	1			1					
Ulmus laevis	5	1	1	3					5
Ulmus parvifolia	2	2							
Ulmus pumila	65	30	18	17					6
Усього	849	354	203	231	50	4	5	2	133
% до загальної кількості екземплярів	100,0	41,7	23,9	27,2	5,9	0,5	0,6	0,2	15,7

Рис. 6. Пошкодження штамбу дерев: зліва – морозобійні тріщини в *T. platyphyllos*, заселення стовбуровими шкідниками, справа – тіла дереворуйнівних грибів *U. Pumila*
Джерело: сформовано автором.

лих років презентований *A. platanoides* та *R. pseudoacacia*, по 1 екз. кожного виду. Згідно з розрахованим індексом віталітетного стану паркових насаджень (79,8 у. о.), який здійснено залежно від частки участі різних категорій дерев у деревостані, його можна охарактеризувати як майже «здоровий».

Висновки

Базовою ландшафтною композицією парку воїнам парку АТО м. П'ятихатки є зірчаста. Територія об'єкта розчленована на функціональні зони: зону тихого відпочинку, дитячу, заняття спортом тощо. На дослідній ділянці багато пам'ятників і місць пошани, а також сакральних об'єктів. Дендрофлора парку в кількості 849 екз. належить до 41 виду й переважно представлена листяними деревними породами. Частка участі хвойних становить 15,3%. Домінують у паркових насадженнях *R. pseudoacacia* (12,60% усіх дерев) і *T. platyphyllos* (12,01%). Деревами-содомінантами є *A. hippocastanum* та *U. pumila*. Більшу частку серед насаджень парку становлять інтродуковані рослини (75,1%).

За таксаційними показниками, зокрема за діаметром штамбу, домінує категорія дерев зі значеннями 30–39,8 см (276 екз). Особин із діаметром стовбуру більше ніж 60 см нараховано всього 52 екз. Це переважно старі екземпляри *U. pumila* та *R. pseudoacacia*. У середньому на деревостан парку цей параметр сягає близько 35 см. У розрізі висотних характеристик значну частку становлять дерева висотою від 9,1 до 13,0 м, переважно через значну представленість у насадженнях *A. hippocastanum*, *T. platyphyllos* і *T. cordata*.

За віталітетним станом вагомою є частина дерев, які є «здоровими». Їх кількість становить 41,7% щодо всіх особин у парку. Значний внесок у цій групі мають *T. platyphyllos*, *R. pseudoacacia* як види-домінанти паркового фітоценозу. Помірно й середньо ослаблених екземплярів у насадженнях 23,9% і 27,2% відповідно. У незначній кількості зустрічається сухостій. Загальний життєвий стан паркових насаджень можна оцінити як здоровий, з незначними пошкодженнями.

Варто зазначити, що перспективним за цим напрямом досліджень буде проведення оцінки відповідності наявного асортименту деревної рослинності паркового фітоценозу екологічним чинникам різного генезу (абіотичні й антропогенні), які склалися на ділянці, що дасть змогу застосовувати оптимальні агротехнічні заходи щодо догляду за насадженнями. На основі отриманих даних з інвентаризації доцільно розробити проєкти реконструкції окремих локацій рекреаційного об'єкта, особливо це стосується квіткового оформлення, а також уведення до складу насаджень декоративних кущів, що покращить їх естетичний вигляд і підвищить ступінь виконання ними санітарно-гігієнічних функцій.

Список використаної літератури

Бессонова В.П., Іванченко О.Є. Видове багатство дендрофлори та естетичне оцінювання фітоценозів парку смт. Магдалинівка. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2020. Т. 30. № 1. С. 25–32. https://doi.org/10.36930/40300104.

Бессонова В.П., Іванченко О.Є. Дизайнерські рішення та видовий склад рослин парку селища міського типу Петриківка Дніпропетровської області. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2021. Т. 31. № 4. С. 27–35. https://doi.org/10.36930/40310404.

Бессонова В.П. Методологія і організація наукових досліджень у садово-парковому господарстві. Київ : Центр учбової літератури, 2019. 261 с.

Бідолах Д.І., Гринюк Ю.Г., Шляхта Я.М. Особливості реконструкції парків відпочинку невеликих міст Заходу України на прикладі Зборівського міського парку. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Лісівництво та декоративне садівництво».* 2012. Вип. 171(1). С. 28–33.

Бондаренко О.С., Павличенко А.В., Іванець К.Т. Питання забруднення атмосферного повітря пилом і шляхи його мінімізації. *Молодь: наука та інновації. Секція 10 «Екологічні проблеми регіонів»* : матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (Дніпро, 27 листопада – 03 грудня 2019 р.). Дніпро, 2019. С. 170–171.

Горб А.С., Дук Н.М. Клімат Дніпропетровської області : монографія. Д. : Вид-во ДНУ, 2006. 204 с.

Гром М.М. Лісова таксація : підручник. 3-тє вид., доповн. Львів : РВВ НЛТУ України, 2010. 416 с.

Дендрофлора України. Дикорослі та культивовані дерева й кущі. Покритонасінні : довідник / М.А. Кохно, Н.М. Трофименко, Л.І. Пархоменко та ін. Київ : Фітосоціоцентр, 2005. Ч. 2. 716 с.

Заячук В.Я. Дендрологія. Львів : Апріорі, 2008. 656 с.

Зібцева О.В. Озеленення забудованих територій малих міст у контексті дотримання державних будівельних норм. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України.* 2018. Вип. 28(10). С. 28–31. https://doi.org/10.15421/40281005.

Зібцева О.В., Півнюк О.С. Характеристика системи озеленення м. Вишневе. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Лісівництво та декоративне садівництво».* 2013. Вип. 187(2). С. 144–147.

Зібцева О.В. Концептуальні основи систем зелених насаджень малих міст Київщини в контексті екозбалансованого розвитку : автореф. дис. ... д.с.-г.н. : 06.03.01 «Лісові культури та фітомеліорація». Київ, 2021. 52 с.

Іванченко О.Є., Бессонова В.П. Видовий склад та стан деревних насаджень парку «Воїнам-визволителям» міста Дніпропетровська. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2014. Вип. 24.4. С. 22–26.

Інструкція з технічної інвентаризації зелених насаджень у містах і селищах міського типу України, затв. Наказом Держ. комітета будівництва, архітектури та житлової політики від 24.12.2001 № 226.

Калініченко О.А. Декоративна дендрологія. Київ : Вища шк., 2003. 199 с.

Куйбіда В.С., Білоконь Ю.М. Територіальне планування в Україні: європейські засади та національний досвід. Київ : Логос, 2009. 107 с.

Кучерявий В.П. Ландшафтна архітектура. Львів : Новий Світ-2000, 2017. 520 с.

Кучерявий В.П., Дудин Р.Б., Левусь Т.М., Мельничук С.М. Принципи реконструкції та ландшафтного облаштування парку культури та відпочинку ім. М. Чекмана у Хмельницькому. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України.* 2013. Вип. 23.9. С. 121–126.

Пушка І.М., Шлапак В.П. Аналіз стану паркового середовища малих міст України та шляхи його удосконалення. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України.* 2024. № 34(3). С. 7–14. https://doi.org/10.36930/40340301.

References

Bessonova, V.P. & Ivanchenko, O.E. (2020). Vydove bahatstvo dendroflory ta estetychne otsiniuvannia fitotsenoziv parku smt. Mahdalynivka [Species richness of dendroflora and aesthetic assessment of phytocenoses of the park of Mahdalynivka town]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 30(1), 25–32. https://doi.org/10.36930/40310404 [in Ukrainian].

Bessonova, V.P. & Ivanchenko, O.E. (2021). Dyzajnerski rishennja ta vydovyj sklad roslyn parku selyshha miskogo typu Petrykivka Dnipropetrovskoi oblasti [Desing solutions and species composition of plants of the park in Petrukivka urban-type settlement, Dnipropetrovsk region]. *Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 31(4), 27–35. https://doi.org/10.36930/40310404 [in Ukrainian].

Bessonova, V.P. (2019). Metodolohiia i orhanizatsiia naukovykh doslidzhen u sadovo-parkovomu hospodarstvi [Methodology and organization of scientific research in parks, gardens and landscaping]. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].

Bidolakh, D.I., Hryniuk Yu.H. & Shliakhta Ya.M. (2012). Osoblyvosti rekonstruktsii parkiv vidpochynku nevelykykh mist Zakhodu Ukrainy na prykladi Zborivskoho miskoho parku [Features of the reconstruction of recreation parks in small cities of Western Ukraine using the example of Zboriv city park]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser. : Lisivnytstvo ta dekoratyvne sadivnytstvo [Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Ser. : Forestry and ornamental horticulture],* 171(1), 28–33 [in Ukrainian].

Bondarenko, O.S., Pavlychenko, A.V. & Ivanets, K.T. (2019). Pytannia zabrudnennia atmosfernoho povitria pylom i shliakhy yoho minimizatsii [The issue of atmospheric air pollution by dust and ways to minimize it]. *Molod: nauka ta innovatsii :* materialy VII Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh. Sektsiia 10 «Ekolohichni problemy rehioniv» [Youth: Science and Innovation: Proceedings of the VII All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists. Section 10 «Environmental Problems of Regions»] (Dnipro, 27 lystopada – 03 hrudnia), 170–171 [in Ukrainian].

Horb, A.S. & Duk, N.M. (2006). Klimat Dnipropetrovskoi oblasti: monohrafiia [Climate of Dnipropetrovsk region: monograph], D.: Vyd-vo DNU, 204 p. [in Ukrainian].

Hrom, M.M. (2010). Forest valuation : textbook [Lisova taksatsiia : pidruchnyk]. Lviv : RVV NLTU Ukrainy, 416 p. [in Ukrainian].

Kokhno, M.A., Trofymenko, N.M., Parkhomenko, L.I. ta in. (2005). Dendroflora Ukrainy. Dykorosli ta kultyvovani dereva y kushchi. Pokrytonasinni: dovidnyk [Dendroflora of Ukraine. Wild and cultivated trees and shrubs. Angiosperms: a guide]. K. : Vyd-vo «Fitosotsiotsentr», Ch. 2. 716 p. [in Ukrainian].

Zaiachuk, V.Ya. (2008). Dendrolohiia [Dendrology]. Lviv : Apriori, 656 p. [in Ukrainian].

Zibtseva, O.V. (2018). Ozelenennia zabudovanykh terytorii malykh mist u konteksti dotrymannia derzhavnykh budivelnykh norm [Greening of built-up areas of towns in the context of compliance with state construction norms]. *Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 28(10), 28–31. https://doi.org/10.15421/40281005 [in Ukrainian].

Zibtseva, O.V. & Pivniuk, O.S. (2013). Kharakterystyka systemy ozelenennia m. Vyshneve [Characteristics of the landscaping system of the city of Vyshneve]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser. : Lisivnytstvo ta dekoratyvne sadivnytstvo [Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Ser. : Forestry and ornamental horticulture],* 187(2), 144–147 [in Ukrainian].

Zibtseva, O.V. (2021). Kontseptualni osnovy system zelenykh nasadzhen malykh mist Kyivshchyny v konteksti ekozbalansovanoho rozvytku [Conceptual Foundations of Green Space Systems of Small Towns of the Kyiv Region in the Context of Sustainable Development]. *Avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stup. d.s.-h.n. 06.03.01 «Lisovi kultury ta fitomelioratsiia».* Kyiv, 52 p. [in Ukrainian].

Ivanchenko, O.E. & Bessonova, V.P. (2014). Vydovyi sklad ta stan derevnykh nasadzhen parku «Voinam vyzvolyteliam» mista Dnipropetrovska [The species composition and the state of tree plantations of the memorial park «Soldiers of Liberation» in Dnepropetrovsk]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 24(4), 22–26 [in Ukrainian].

Instruktsiia z tekhnichnoi inventaryzatsii zelenykh nasadzhen u mistakh i selyshchakh miskoho typu Ukrainy [Instructions for technical inventory of green spaces in cities and urban-type settlements of Ukraine]: zatv. nakazom Derzh. komiteta budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovoi polityky vid 24.12.2001 r. № 226 [in Ukrainian].

Kalinichenko, O.A. (2003). Dekoratyvna dendrolohiia [Decorative dendrology]. K.: Vyshcha shk., 199 p. [in Ukrainian].

Kuibida, V.S. & Bilokon, Yu.M. (2009). Terytorialne planuvannia v Ukraini: yevropeiski zasady ta natsionalnyi dosvid [Territorial planning in Ukraine: European principles and national experience]. K. : Lohos, 107 p. [in Ukrainian].

Kucheriavyi, V.P. (2017). Landshaftna arkhitektura [Landscape architecture]. Lviv: Novyi Svit-2000, 520 p. [in Ukrainian].

Kucheriavyi, V.P., Dudyn, R.B., Levus, T.M. & Melnychuk, S.M. (2013). Pryntsypy rekonstruktsii ta landshaftnoho oblashtuvannia parku kultury ta vidpochynku im. M. Chekmana u Khmelnytskomu [The principles of reconstruction and landscape improvement of M. Chekman recreation park in Khmelnitsk]. *Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 23(9), 121–126 [in Ukrainian].

Pushka, I.M. & Shlapak, V.P. (2024). Analiz stanu parkovoho seredovyshcha malykh mist Ukrainy ta shliakhy yoho udoskonalennia [Analysis of the state of the park environment of small cities of Ukraine and ways to improve it]. *Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 34(3), 7–14. https://doi.org/10.36930/40340301 [in Ukrainian].

Отримано: 05.11.2025
Прийнято: 27.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 504.4:556.53:628.1
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.29

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ РІЧКИ СЕЙМ У КОНТЕКСТІ ТРАНСКОРДОННОГО ЗАБРУДНЕННЯ

О. В. Іщук[1], О. М. Василенко[2]

Збереження якості транскордонних водних ресурсів України в умовах воєнної агресії держави-агресора набуває особливої актуальності, оскільки руйнування промислової інфраструктури на суміжних територіях призводить до аварійних скидів висококонцентрованих забруднювальних речовин у прикордонні річкові системи. Події серпня-жовтня 2024 року стали показовим прикладом такої екологічної загрози: у басейні річки Сейм зафіксовано масштабну загибель риби й різке погіршення гідрохімічних показників води, що пов'язується з аварійними скидами відходів із промислових підприємств, зокрема Тьоткінського цукрового заводу в Курській області. Стічні води цукрової промисловості характеризуються надзвичайно високим органічним навантаженням (БСК до 7000 мгO₂/дм³, ХСК до 10 000 мгO₂/дм³), підвищеним умістом амонію, завислих речовин і сполук, здатних знижувати pH і створювати кисневий дефіцит у водних екосистемах. Такі процеси демонструють критичну вразливість транскордонних водних систем до воєнних ризиків і підтверджують потребу в модернізації національної системи моніторингу та гармонізації її з європейськими екологічними стандартами.

Метою дослідження є оцінка сучасного гідрохімічного стану річки Сейм на території України в умовах транскордонного забруднення, спричиненого аварійними скидами органічних сполук із промислових об'єктів держави-агресора під час активних бойових дій. Дослідження виконано на основі аналізу фізико-хімічних показників якості води (pH, уміст амонійного азоту, сульфатів, хлоридів, нітритів, нітратів, загального заліза, хімічного та біохімічного споживання кисню) відповідно до чинних стандартів ДСТУ ISO. Для порівняння використано багаторічні гідрохімічні дані (1967–1979; 1993–2013) та сучасні результати моніторингу 2024 року.

Отримані результати свідчать, що більшість основних показників якості води (pH 7,3–7,4; сульфати ≈40 мг/дм³; хлориди 29,4 мг/дм³; нітрити 0,02–0,06 мг/дм³; нітрати 0,75–1,0 мг/дм³) залишаються в межах екологічно допустимих рівнів і навіть нижчі за середньобагаторічні значення. Водночас зафіксовано значне перевищення концентрації загального заліза (0,37–0,79 мг/дм³ при ГДК 0,1 мг/дм³) та органічного навантаження: ХСК досягало 58–60 мгO₂/дм³ (при нормі 50 мгO₂/дм³ та історичному середньому рівні 18,1 мгO₂/дм³), БСК₅ – 7,3–7,4 мгO₂/дм³ (при нормі

[1] кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Ishchuk-O@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8993-8366
[2] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Vasylenko-O@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3283-6980

3 мгO₂/дм³ та середньобагаторічному рівні 2,8 мгO₂/дм³). Підвищені концентрації заліза можуть мати як природне походження (надходження з болотистих ґрунтів і підземних вод), так і бути посилені транскордонними техногенними впливами. Високий рівень органічного забруднення прямо корелює з аварійними скидами стічних вод із цукрових і суміжних виробництв у період бойових дій.

Наукова новизна роботи полягає у виявленні й кількісній оцінці гідрохімічної реакції транскордонної річки на воєнно зумовлені техногенні скиди, що вперше задокументовано для басейну Сейму на основі поєднання багаторічних даних та актуальних спостережень 2024 року. Практична значущість полягає в обґрунтуванні необхідності інтегрованого басейнового управління та гармонізації системи екологічного моніторингу України із Водною рамковою директивою ЄС (Directive 2000/60/EC… 2000) для раннього виявлення транскордонних екологічних криз і юридичного документування шкоди від воєнних злочинів проти довкілля.

Ключові слова: *транскордонне забруднення, річка Сейм, воєнна агресія, гідрохімічний аналіз, екологічна безпека, моніторинг водних ресурсів.*

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE SEIM RIVER IN THE CONTEXT OF TRANSBOUNDARY POLLUTION

O. V. Ishchuk, O. M. Vasylenko

Preservation of the quality of transboundary water resources of Ukraine in conditions of military aggression of the aggressor state becomes particularly urgent, since the destruction of industrial infrastructure in adjacent territories leads to emergency discharges of highly concentrated pollutants into border river systems. The events of August–October 2024 became a vivid example of such an ecological threat: in the Seim River basin, large-scale fish mortality and a sharp deterioration in the hydrochemical parameters of water were recorded, which is associated with emergency discharges of waste from industrial enterprises, in particular the Tyotkino Sugar Plant in the Kursk Region. Wastewater from the sugar industry is characterized by an extremely high organic load (BOD up to 7,000 mgO₂/dm³, COD up to 10,000 mgO₂/dm³), an increased content of ammonium, suspended substances and compounds capable of reducing pH and creating oxygen deficiency in aquatic ecosystems. Such processes demonstrate the critical vulnerability of transboundary water systems to military risks and confirm the need to modernize the national monitoring system and harmonize it with European environmental standards.

The purpose of the study is to assess the current hydrochemical state of the Seim River in Ukraine under conditions of transboundary pollution caused by accidental discharges of organic compounds from industrial facilities of the aggressor state during active hostilities. The study was carried out based on the analysis of physicochemical indicators of water quality (pH, content of ammonium nitrogen, sulfates, chlorides, nitrites, nitrates, total iron, chemical and biochemical oxygen demand) in accordance with the current DSTU ISO standards. For comparison, multi-year hydrochemical data (1967–1979; 1993–2013) and current monitoring results in 2024 were used.

The results obtained indicate that most of the main water quality indicators (pH 7.3–7.4; sulfates ≈40 mg/dm³; chlorides 29.4 mg/dm³; nitrites 0.02–0.06 mg/dm³; nitrates 0.75–1.0 mg/dm³) remain within ecologically acceptable levels and even below the long-term average values. At the same time, a significant excess of the concentration of total iron (0.37–0.79 mg/dm³ at a maximum concentration of 0.1 mg/dm³) and organic load was recorded: CSC reached 58–60 mgO₂/dm³ (at a norm of 50 mgO₂/dm³ and a historical average of 18.1 mgO₂/dm³), BOD_5 – 7.3–7.4 mgO₂/dm³ (at a norm of 3 mgO₂/dm³ and a long-term average of 2.8 mgO₂/dm³). Increased iron concentrations can have both a natural origin (inflow from swampy soils and groundwater) and be enhanced by transboundary technogenic impacts. The high level of organic pollution directly correlates with emergency discharges of wastewater from sugar and related industries during the period of hostilities.

The scientific novelty of the work lies in the identification and quantitative assessment of the hydrochemical response of a transboundary river to military-induced man-made discharges, which was documented for the first time for the Seim basin based on a combination of multi-year data and current observations in 2024. The practical significance lies in substantiating the need for integrated basin management and harmonization of the environmental monitoring system of Ukraine with the EU Water Framework Directive (Directive 2000/60/EC …, 2000) for early detection of transboundary environmental crises and legal documentation of damage from war crimes against the environment.

Key words: *transboundary pollution, Seim river, military aggression, hydrochemical analysis, environmental security, water resources monitoring.*

Вступ

Річка Сейм є однією з найбільших приток Десни та виконує важливі екологічні, соціально-економічні й водогосподарські функції для північно-східних регіонів України. Вона забезпечує питне водопостачання, використовується для сільського господарства, рибного господарства, рекреації та формує важливі екологічні коридори. Особливість Сейму полягає в транскордонному розташуванні басейну: значна частина водозбору знаходиться на території держави-агресора. Це робить водну систему вразливою до неконтрольованого антропогенного впливу й ускладнює реалізацію єдиної політики охорони водних ресурсів.

Ситуація істотно ускладнилася у зв'язку зі збройною агресією та воєнними діями, що тривають на суміжних територіях. Руйнування промислових підприємств, складів відходів та очисних споруд призводить до неконтрольованих скидів органічних речовин, важких металів та інших токсикантів у річкову систему. Пошкодження гідротехнічної інфраструктури сприяє раптовому вивільненню забруднених стоків і донних відкладів, що збагачені історичними промисловими накопиченнями. У багатьох випадках бойові дії роблять неможливим оперативний доступ екологічних служб до місць аварій, порушують роботу лабораторій і постів моніторингу, ускладнюють транспортування проб і швидке реагування на екологічні кризи.

Проблематика дослідження полягає у відсутності комплексної та стійкої системи моніторингу транскордонних річкових систем в умовах збройного конфлікту. Чинні підходи до оцінки стану поверхневих вод залишаються фрагментарними, часто не синхронізованими із сучасними європейськими стандартами, а дані про якість води з територій держави-агресора недоступні або неповні. Воєнні дії створюють додаткові ризики: пошкодження критичної інфраструктури, порушення логістики екологічних досліджень, ускладнення доступу до відбору проб у небезпечних районах, а також підвищену ймовірність масштабних транскордонних екологічних катастроф.

Сучасні виклики вимагають нового підходу до оцінки екологічного стану річки Сейм, який ураховуватиме як традиційні гідрохімічні й токсикологічні індикатори, так і воєнні фактори ризику: руйнування очисних споруд, аварійні скиди промислових стоків, мобілізацію донних відкладів та обмежений доступ до моніторингу. Потребує розвитку система раннього попередження та кризового управління водними ресурсами, що дасть змогу швидко реагувати на екологічні загрози навіть у зоні бойових дій. Додаткової уваги потребує також документування екологічної шкоди, спричиненої війною, для подальшого використання в правових механізмах компенсації та відновлення довкілля.

Події серпня-жовтня 2024 року наочно продемонстрували критичні екологічні ризики транскордонного забруднення річкових систем: зафіксовано переміщення забруднених вод річкою Сейм із території держави-агресора та масову загибель риби в межах Сумської й Чернігівської областей. За офіційними повідомленнями, імовірною причиною стали аварійні скиди з промислових об'єктів у районі селища Тьоткіно (цукрове, спиртове й шкіряне виробництва), що засвідчило особливу вразливість транскордонних водних екосистем у період воєнної агресії та актуалізувало потребу дієвої системи моніторингу й правового захисту водних ресурсів (Державна …, 2025).

Формування якості води Сейму, найбільшої притоки Десни, зумовлене поєднанням природних процесів і виразного антропогенного навантаження, яке надходить як із території держави-агресора (близько 70% стоку), так і з української частини басейну; середньорічна витрата в гирлі становить близько 100 м³/с (~3,13 км³/рік). Багаторічні гідрохімічні дослідження річки Сейм (1967–1979; 1993–2013) засвідчили відносно стабільний стан водного середовища за більшістю основних показників якості води та відповідність їх гранично допустимим концентраціям (далі – ГДК) для водойм рибогосподарського призначення, за винятком загального заліза, яке систематично перевищувало норматив. Середнє значення pH води становило 7,85, що відповідає встановленому діапазону 6,5–8,5 і вказує на слабколужний характер середовища, характерний для річок Полісся. Концентрація амонійного азоту досягала 0,35 мг/дм³, що нижче за допустимі межі (0,5–1,0 мг/дм³), проте свідчить про постійне, але помірне органічне навантаження, пов'язане з побутовими та сільськогосподарськими стоками. Уміст сульфатів становив 4,7 мг/дм³, а хлоридів – 32 мг/дм³, що значно нижче за встановлені нормативи (100 і 300 мг/дм³ відповідно) та свідчить про відсутність процесів засолення й стабільність природного

мінералізаційного режиму води, зумовленого геохімічними особливостями басейну.

Концентрації сполук азоту також залишалися в межах екологічно безпечних значень. Середній уміст нітратів становив 2,94 мг/дм³, що значно нижче за гранично допустимий рівень (40 мг/дм³), а нітритів – 0,06 мг/дм³ за норматив 0,08 мг/дм³. Це свідчить про відсутність значного впливу неочищених стічних вод і задовільний стан окисно-відновних процесів у водоймі, що підтримує природний цикл азоту. Органічне навантаження оцінювалося за показниками кисневого режиму: хімічне споживання кисню (ХСК) у середньому дорівнювало 18,1 мгO_2/дм³, що майже втричі нижче за норматив для рибогосподарських водойм (50 мгO_2/дм³), але перевищувало допустиме значення для господарсько-побутового водокористування (15 мгO_2/дм³), що вказує на стійкий, проте некритичний рівень органічного забруднення. Біохімічне споживання кисню протягом п'яти діб (БСК$_5$) становило 2,8 мгO_2/дм³ при нормативі 3 мгO_2/дм³, тобто наближалося до граничного рівня, відображаючи наявність легкодоступних органічних речовин, які можуть споживати кисень під час мікробіологічного розкладання.

Єдиним стабільно проблемним показником залишався вміст загального заліза, середнє значення якого становило 0,3 мг/дм³, що утричі перевищувало допустиму концентрацію для рибогосподарських водойм (0,1 мг/дм³). Таке перевищення можна пояснити як техногенними, так і природними чинниками. З одного боку, залізо могло надходити зі стічними водами промислових підприємств, корозією інженерних споруд і систем водовідведення; з іншого боку, природні умови басейну Сейму сприяють підвищеному вмісту цього елемента. Значна частина території водозбору представлена болотистими ґрунтами й алювіальними відкладами, багатими на залізовмісні сполуки. Сезонне підтоплення заплав, паводкові явища та розчинення органо-мінеральних комплексів сприяють мобілізації колоїдних форм заліза, що може підвищувати його концентрацію навіть без активного техногенного впливу. Таким чином, на відміну від інших досліджуваних показників, які залишалися в межах нормативів, залізо є індикатором як природної гідрохімічної специфіки басейну, так і потенційного антропогенного впливу, що потребує додаткового моніторингу та детальнішого аналізу його джерел (Лозовіцький і Лозовіцький, 2015; Бірюков, 2023).

Узагальнений аналіз впливу збройних конфліктів на водні ресурси вказує на триєдний характер води як ресурсу, мішені та каналу поширення забруднювачів; руйнування очисних споруд, мобілізацію донних відкладів, аварійні скиди та деградацію біорізноманіття описані для басейнів України в контексті сучасної війни (Kitowski et al., 2023). Питання стійкості транскордонних річок України та потреба інтегрованого басейнового підходу до моніторингу й управління узгоджуються з вимогами Водної рамкової директиви ЄС, що задає методологічний каркас для уніфікації показників і процедур оцінювання (Directive 2000/60/EC …, 2000; Strokal et al., 2021).

Проблематика дослідження полягає у відсутності досить ефективних механізмів комплексної оцінки транскордонного забруднення, здатних синтезувати гідрохімічні й токсикологічні дані з біоіндикаційними критеріями стану водних біоресурсів; чинна система моніторингу залишається фрагментарною, потребує гармонізації з європейськими стандартами (Directive 2000/60/EC …, 2000) та адаптації до умов воєнного часу, що ускладнює своєчасне запобігання екологічним кризам і прийняття управлінських рішень.

Метою дослідження є оцінка сучасного екологічного стану річки Сейм у контексті транскордонного надходження забруднювальних речовин з території держави-агресора та впливу воєнних дій на водну екосистему з визначенням ключових гідрохімічних, токсикологічних і біоіндикаційних показників, необхідних для вдосконалення системи моніторингу й управління водними ресурсами.

Матеріал і методи

Дослідження проводили в період з 15 серпня 2024 року по 28 жовтня 2024 року в межах річки Сейм (басейн Десни) на території Сумської області.

Для моніторингу обрано три ключові створи: с. Чаплищі (зразок 1), с. Чумакове (зразок 2) та м. Путивль (зразок 3). Відбір проб здійснювали відповідно до національного стандарту ДСТУ ISO 5667-3:2001. Проби відбирали з поверхневого шару води (0,3–0,5 м), використовували чистий пластиковий іта скляний посуд; консервацію здійснювали відповідно до вимог стандартів: охолодження до 4 °C для азотовмісних сполук і сульфатів і підкислення азотною

кислотою до pH < 2 для аналізу металів (Про затвердження ..., 2018).

Фізико-хімічний аналіз включав визначення основних показників якості води відповідно до затверджених стандартів. Рівень pH визначали за ДСТУ 4077-2001, аналіз іонного складу включав визначення концентрацій амонію, нітритів і нітратів за ДСТУ 26777-85, хлоридів – за ДСТУ ISO 9297:2019, сульфатів – за ДСТУ ISO 9280:2021. Уміст загального заліза визначали методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії за ДСТУ ISO 11885:2001.

Хімічне споживання кисню (ХСК) визначали дихроматним методом (ДСТУ ISO 6060:2003..., 2003).

Біохімічне споживання кисню протягом п'яти діб ($БСК_5$) визначали інкубаційним методом (ДСТУ ISO 5815-1:2009 ..., 2009).

Отримані результати порівнювали з гранично допустимими концентраціями (ГДК), установленими чинним законодавством України (Закон ..., 2021).

Результати

Реакція водного середовища річки Сейм загалом відповідала чинним нормативним вимогам (рис. 1).

Показники pH у контрольних створах перебували в межах допустимого діапазону 6,5–8,5, установленого для поверхневих вод господарсько-питного призначення. Зафіксовано слабко виражене зниження pH порівняно з багаторічними середніми значеннями 1967–2012 (7,35), що може свідчити про поступове підкислення води внаслідок транскордонних скидів стічних вод і вторинного впливу воєнних дій на водну інфраструктуру.

Уміст аміаку й амонійних сполук є чутливим індикатором органічного забруднення, спричиненого надходженням тваринних відходів, побутових і промислових стоків. Дослідження показали перевищення концентрації амонійного азоту над нормативними значеннями у 1,4–2,7 раза (рис. 2); зафіксовані величини становили

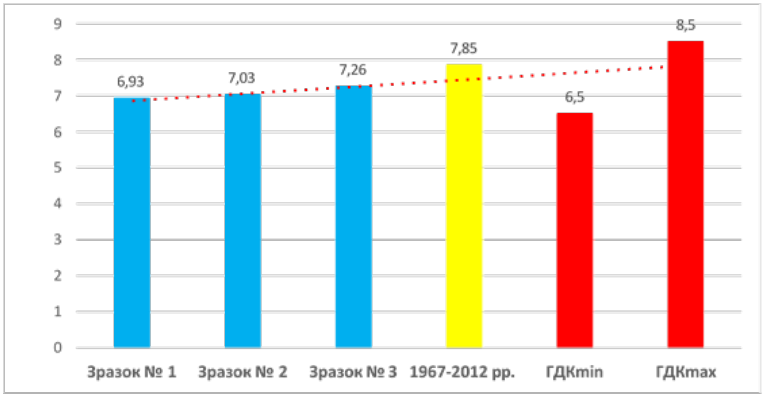


Рис. 1. Значення pH у воді річки Сейм

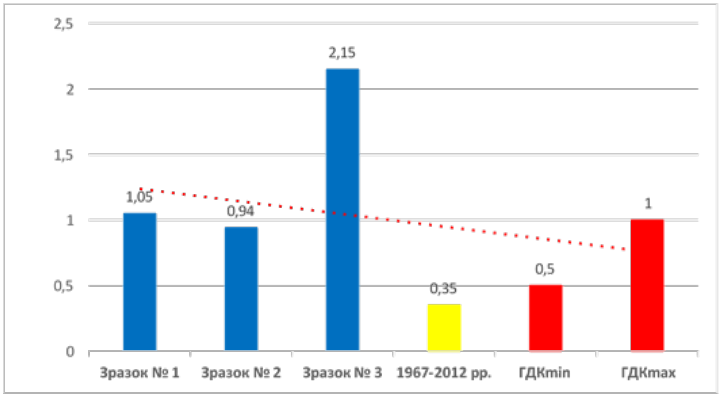


Рис. 2. Концентрація амонійного азоту у воді річки Сейм

0,94–2,15 мг/дм³ при гранично допустимій концентрації 0,5–1,0 мг/дм³. Такі дані свідчать про відчутне антропогенне навантаження і транскордонне надходження органічних забруднювачів.

Сульфати й хлориди в природних водах можуть мати як мінеральне походження (розчинення гірських порід, солонців), так й органічне, пов'язане з побутовими та тваринними відходами (Feth, 1981; Zak et al., 2021). Результати гідрохімічного аналізу засвідчили, що середній уміст сульфатів не перевищує нормативу 100 мг/дм³ і становить близько 40 мг/дм³ (рис. 3).

Концентрація хлоридів також відповідає екологічним нормам: середнє значення становило 29,4 мг/дм³ при гранично допустимому рівні 300 мг/дм³ (рис. 4). Порівняно з багаторічними даними 1967–2012 (32 мг/дм³) спостерігається навіть деяке зменшення цього показника, що свідчить про відсутність процесів засолення та помірне антропогенне навантаження.

Концентрації нітритів (NO_2^-) у зразках № 1 і № 2 становить по 0,06 мг/дм³, що відповідає середньому багаторічному рівню (рис. 5), визначеному за період 1967–2012 (0,06 мг/дм³), є нижчою за гранично допустиму концентрацію для водойм рибогосподарського призначення (0,08 мг/дм³). У зразку № 3 зафіксовано зниження вмісту нітритів до 0,02 мг/дм³, що також не перевищує нормативного рівня та є істотно нижчим за багаторічний фон. Отримані результати вказують на стабільно низькі концентрації нітритного азоту у воді річки в межах досліджуваних ділянок і їх відповідність чинним екологічним нормативам.

Аналіз наведених даних свідчить, що концентрація нітратів у воді річки Сейм у досліджених точках залишається низькою та значно нижчою за гранично допустиму концентрацію – 40 мг/дм³ (рис. 6). У зразку № 1 показник становить 1,0 мг/дм³, у зразку № 2 – 0,85 мг/дм³, а в зразку № 3 – 0,75 мг/дм³. Для порів-

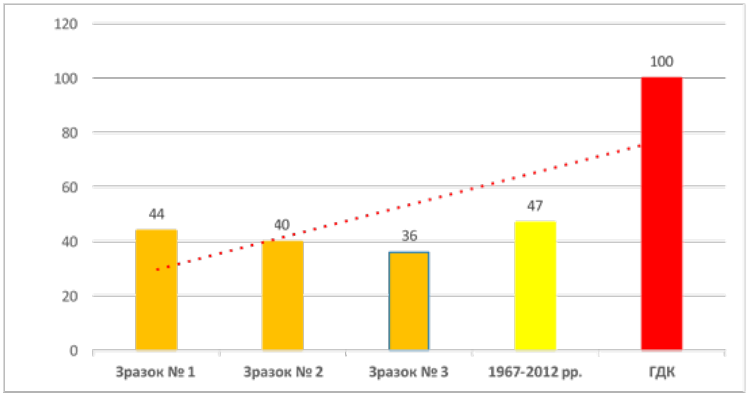


Рис. 3. Уміст сульфатів у воді річки Сейм

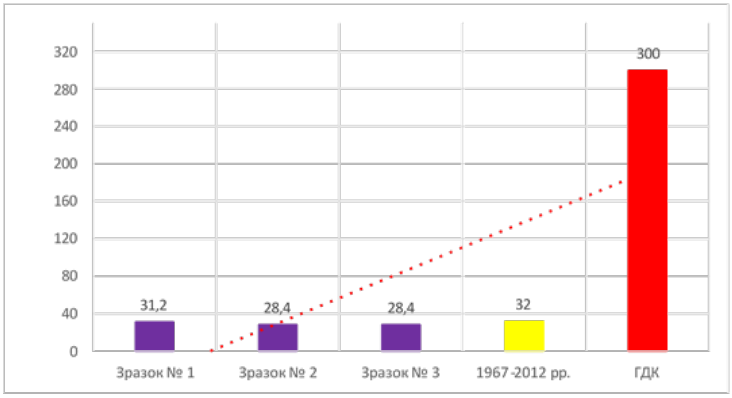


Рис. 4. Уміст хлоридів у воді річки Сейм

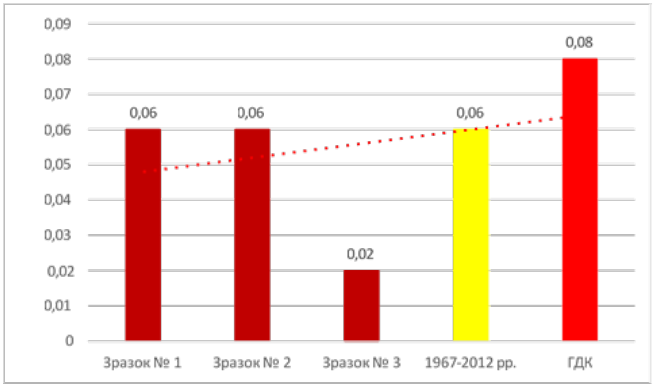


Рис. 5. Уміст нітритів у воді річки Сейм

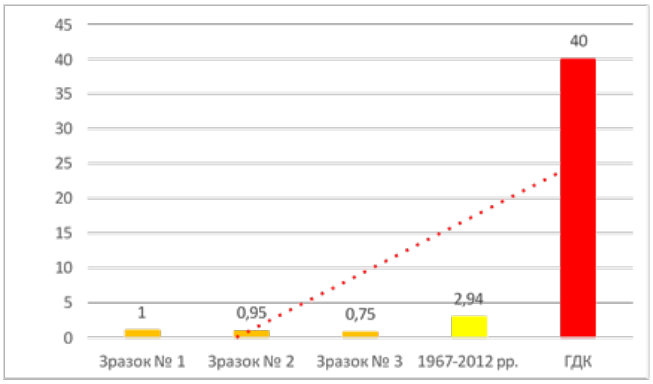


Рис. 6. Уміст нітратів у воді річки Сейм

няння, середнє багаторічне значення за період 1967–2012 дорівнює 2,64 мг/дм³ і також суттєво нижче за норматив. Отримані результати вказують, що сучасний рівень нітратного азоту у воді річки не перевищує екологічно безпечних значень і є навіть нижчим за історичні середні показники, що свідчить про відсутність інтенсивного надходження нітратів у період дослідження.

Аналіз наведених даних показує, що вміст загального заліза у воді річки Сейм у сучасних точках спостереження коливається в межах 0,37–0,79 мг/дм³ та перевищує екологічно допустиму концентрацію (рис. 7). Для порівняння, середнє багаторічне значення за 1967–2012 становить 0,3 мг/дм³, що відповідає нормативу.

Концентрація перевищувала нормативи у 3,7–7,9 раза, що свідчить про погіршення гідрохімічного стану порівняно з історичним фоном. Зростання вмісту заліза може бути наслідком підвищеного антропогенного навантаження, транскордонних скидів і руйнування інфраструктури внаслідок воєнних дій, що створює ризики токсичного впливу на водні біоресурси й знижує біопродуктивність екосистеми.

Аналіз даних хімічного споживання кисню (ХСК) у воді річки Сейм на досліджених ділянках виявляє, що воно є високим і демонструє чітке перевищення екологічно допустимого рівня (рис. 8). Для порівняння, середнє багаторічне значення за 1967–2012 становило 18,1 мгO_2/дм³ і було істотно нижчим за сучасні показники.

Перевищення гранично допустимих концентрацій сягало 1,16–1,2 раза, що свідчить про значне надходження органічних речовин, здатних знижувати концентрацію розчиненого кисню та погіршувати умови існування гідробіонтів.

Дані, наведені на рисунку 9, свідчать про підвищений рівень біохімічного споживання кисню (БСК$_5$) у воді річки Сейм у точках спостереження, що свідчить про суттєве погіршення органічного стану водойми порівняно як із нормативами, так і з багаторічними даними спостережень річки Сейм.

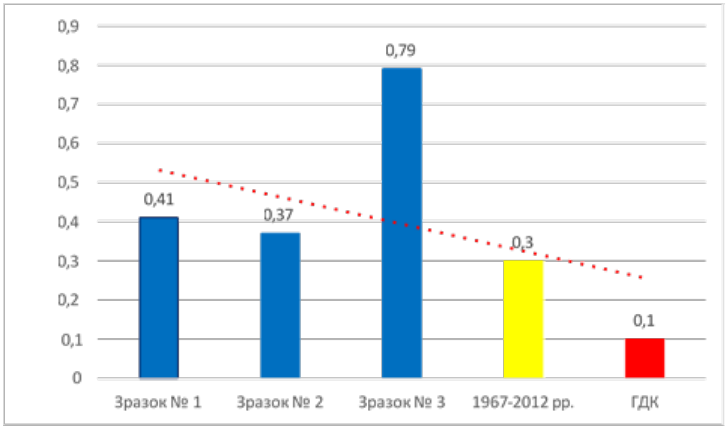


Рис. 7. Уміст загального заліза у воді річки Сейм

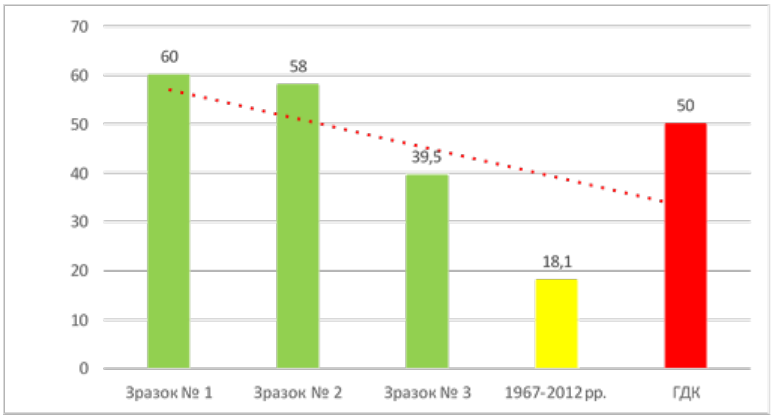


Рис. 8. Хімічне споживання кисню (ХСК) у воді річки Сейм

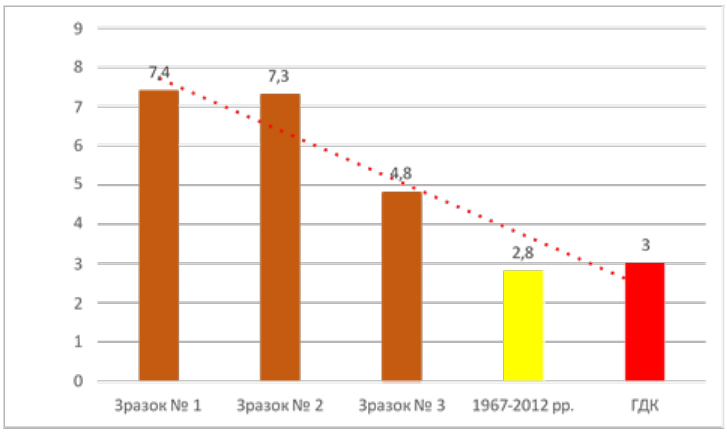


Рис. 9. Біохімічне споживання кисню ($БСК_5$) у воді річки Сейм

Отримані результати свідчать, що загальний стан води річки Сейм є неоднорідним за різними показниками. Реакція середовища (pH) залишається в межах нормативного діапазону 6,5–8,5, хоча спостерігається тенденція до помірного підкислення порівняно з багаторічними значеннями. Амонійний азот значно перевищує допу-

стимі рівні (у 1,4–2,7 раза), що вказує на виражене органічне навантаження та транскордонне надходження забруднювачів. Концентрації сульфатів і хлоридів загалом відповідають нормативам і залишаються на рівні або нижче історичного фону, що свідчить про відсутність засолення. Нітрити й нітрати знаходяться на низькому рівні та не перевищують ГДК, а сучасні показники нітратного азоту навіть нижчі за багаторічні середні. Натомість уміст загального заліза історично залишався підвищеним і суттєво перевищував установлені нормативи (до 7,9 раза), що може бути зумовлено природними особливостями водозбору – болотистими й алювіальними ґрунтами, багатими на сполуки заліза, і сезонною мобілізацією залізовмісних колоїдів унаслідок паводків і підтоплення заплав, хоча не можна повністю виключати й антропогенний вплив (Ліннік, 2018). Інтегральні показники органічного забруднення – ХСК і $БСК_5$ – значно перевищують нормативи й історичний фон, що підтверджує зростання органічного навантаження та зниження кисневого режиму річки.

Обговорення

Період серпня-жовтня 2024 року став показовим щодо екологічних ризиків транскордонного забруднення під час воєнної агресії. На території селища міського типу Тьоткіно Глушківського району Курської області держави-агресора розташований Тьоткінський цукровий завод із двома відкритими басейнами-накопичувачами рідких відходів, сполученими з виробничими корпусами трубопроводами. Під час бойових дій у цьому регіоні зафіксовано неконтрольовані скиди високоорганічних стічних вод у річку Сейм, що призвело до масової загибелі риби на території Сумської та Чернігівської областей (Державна …, 2025).

Стічні води цукрових виробництв характеризуються надзвичайно високим органічним навантаженням: біохімічне споживання кисню ($БСК_5$) зазвичай сягає 4000–7000 $мгO_2/дм^3$, хімічне споживання кисню (ХСК) – 6000–10 000 $мгO_2/дм^3$, при цьому вони містять до 5000 $мг/дм^3$ завислих речовин, високий уміст амонію та сапонінів, здатних знижувати pH і викликати кисневий дефіцит у водних екосистемах (Коваленко, 2022; Пономаренко, 2020; Nawaz et al., 2021). Традиційні методи очищення таких стічних вод, хоча й залишаються ефективними, є надзвичайно трудомісткими й економічно затратними, тому на практиці вони часто ігноруються, що призводить до скидання недостатньо очищених або взагалі необроблених відходів безпосередньо у водні об'єкти (Nawaz et al., 2021), що в період активних бойових дій робить транскордонні річки надзвичайно вразливими.

Результати наших гідрохімічних досліджень у зазначений період підтверджують різке погіршення якості води річки Сейм. ХСК у верхніх створах сягало 58–60 $мгO_2/дм^3$ при багаторічному середньому значенні 18,1 $мгO_2/дм^3$ та нормативі для рибогосподарських водойм 50 $мгO_2/дм^3$, що свідчить про надзвичайно високе органічне навантаження. $БСК_5$ досягало 7,3–7,4 $мгO_2/дм^3$ при нормативі 3 $мгO_2/дм^3$ та багаторічному рівні 2,8 $мгO_2/дм^3$, що вказує на інтенсивний розклад органіки й кисневий дефіцит. Амонійний азот перевищував допустимі значення у 1,4–2,7 раза (0,94–2,15 $мг/дм^3$ при нормі 0,5–1,0 $мг/дм^3$), а загальне залізо сягало 0,79 $мг/дм^3$, що перевищує норматив (0,1 $мг/дм^3$) у 7,9 раза й значно вище за багаторічне середнє 0,3 $мг/дм^3$. Водночас концентрації сульфатів (≈40 $мг/дм^3$ при ГДК 100 $мг/дм^3$), хлоридів (29,4 $мг/дм^3$ при ГДК 300 $мг/дм^3$), а також нітратів і нітритів залишалися в межах екологічних нормативів і навіть нижчими за історичні показники. Це свідчить, що забруднення мало переважно органічний і металевий характер, не супроводжувалося засоленням чи надмірним надходженням нітратного азоту.

Події 2024 року яскраво продемонстрували вразливість транскордонних водних екосистем у воєнний час. Руйнування промислових об'єктів та очисних споруд на території держави-агресора створює додаткові джерела небезпечних речовин, тоді як сучасна система моніторингу в Україні залишається фрагментарною й не забезпечує оперативного виявлення та попередження подібних катастроф. Відсутність дієвих міжнародних механізмів екологічного контролю й відшкодування збитків поглиблює ризики деградації водних ресурсів та ускладнює захист екосистем від наслідків воєнних дій.

Отримані результати підтверджують необхідність гармонізації національної системи моніторингу з європейським законодавством, зокрема вимогами Водної рамкової директиви ЄС (Directive 2000/60/EC …, 2000), а також упровадження принципів інтегрованого басейнового управління й механізмів екстреного екологічного реа-

гування (Strokal et al, 2021). Такий підхід сприятиме створенню системи раннього попередження, оперативному документуванню екологічної шкоди від воєнних злочинів і посиленню здатності України захищати власні водні ресурси від транскордонних загроз.

Висновки

Дослідження засвідчило суттєве погіршення гідрохімічного стану річки Сейм у період аварійних скидів серпня-жовтня 2024 року, що спричинені руйнуванням промислової інфраструктури на території держави-агресора й потраплянням у водотік високоорганічних стічних вод цукрового виробництва. У сучасних пробах зафіксовано підвищений уміст амонійного азоту, загального заліза та значне зростання інтегральних показників органічного забруднення – хімічного й біохімічного споживання кисню, що перевищують як установлені нормативи, так і багаторічні фонові значення. Натомість концентрації сульфатів, хлоридів, нітратів і нітритів залишаються в межах екологічно безпечних рівнів, що свідчить про домінування органічного та металевого характеру антропогенного впливу без ознак засолення чи накопичення сполук азоту в окисненій формі. Отримані результати підтверджують, що воєнні дії створюють високі ризики для транскордонних водних систем, оскільки руйнування промислових об'єктів і очисних споруд зумовлює неконтрольовані скиди небезпечних речовин та ускладнює екологічний контроль. Подальший розвиток досліджень доцільно спрямувати на вдосконалення системи оперативного моніторингу якості води із залученням дистанційного зондування й автоматизованих станцій, розроблення методів фіксації та юридичного підтвердження екологічної шкоди, а також на глибший токсикологічний і біоіндикаційний аналіз впливу аварійних скидів на водні біоресурси. Необхідним є гармонізування національної системи контролю з положеннями Водної рамкової директиви ЄС (Directive 2000/60/EC …, 2000) і впровадження принципів інтегрованого басейнового управління, що дасть змогу своєчасно виявляти загрози та підвищить здатність України захищати свої водні ресурси в умовах воєнних ризиків.

Список використаної літератури

Бірюков О.В. Гідрохімічний аналіз динаміки змін якості поверхневих вод річки Оскіл. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія».* 2023. Вип. 29. С. 17–24. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-02.

Державна екологічна інспекція України. Оперативна інформація щодо ситуації на річках Сейм та Десна. [Електронний ресурс]. URL: https://www.dei.gov.ua/post/2958 (дата звернення: 06.10.2025).

Державна служба України з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів. Сумщина: виявлено забруднення річки Сейм біля кордону з РФ. [Електронний ресурс]. URL: https://dpss.gov.ua/news/sumshchyna-vyiavleno-zabrudnennia-richky-seim-bilia-kordonu-z-rf (дата звернення: 06.10.2025).

Про внесення змін до деяких законів України щодо державної політики у сфері використання та охорони водних ресурсів : Закон України від 14 лип. 2021 р. № 1938-IX. *Відомості Верховної Ради України.* 2021. № 37. Ст. 317. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0173926-21#Text (дата звернення: 06.10.2025).

Коваленко С.А., Пономаренко Р.В., Третьяков О.В., Титаренко А.В., Іванов Є.В. Визначення нових аспектів зміни екологічного стану поверхневого водного об'єкту. *Комунальне господарство міст. Серія «Технічні науки та архітектура».* 2022. Том 3. № 170. С. 53–60. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-53-61.

Ліннік Р.П., Жежеря В.А., Ліннік П.М. Залізо у природних поверхневих водах України : склад, особливості міграції та біологічна роль. *Гідробіологічний журнал.* 2018. Т. 54, № 5. С. 63–80. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v54.i5.70.

Лозовіцький П.С., Лозовіцький А.П. Екологічне оцінювання води Сейму на кордоні з Росією та транскордонне перенесення речовин стоком. *Екологічні науки.* 2015. № 9–10. С. 62–83.

Пономаренко Р.В., Пляцук Л.Д., Ковальов П.А., Затько Й. Дослідження зміни якісного стану поверхневого водного об'єкта в умовах техногенного навантаження. *Техногенно-екологічна безпека.* 2020. № 8 (2/2020). С. 48–54. https://doi.org/10.5281/zenodo.4300769.

Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод : Постава Кабінету Міністрів України від 19 вересня 2018 р. № 758. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Tex (дата звернення: 03.10.2025).

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*. L 327/1. 2000.

Feth J.H. Chloride in natural continental water: A review. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*. 1981. № 2176. https://doi.org/10.3133/wsp2176.

Kitowski I., Cierpiał-Wolan M., Grygoruk M. The water dimensions of Russian–Ukrainian conflict. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2023. Vol. 23. Iss. 3. P. 335–345. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.05.001.

Nawaz M.Z., Arshad M., Hussain T., Alghamdi H.A., Cheng H. Bio-purification of sugar industry wastewater and production of high-value industrial products with a zero-waste concept. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. Vol. 61. Iss. 21. P. 3537–3554. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1802696.

Strokal V., Kroeze C., Kurovska N. Transboundary rivers of Ukraine: perspectives for sustainable development. *Journal of Integrative Environmental Sciences*. 2021. Vol. 18. Iss. 1. P. 1–18. https://doi.org/10.1080/1943815X.2021.1930058.

Zak D., Cabezas A., Gelbrecht J. Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycling and ecological impacts. *Earth-Science Reviews*. 2021. Vol. 212. P. 103446. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103446.

References

Biriukov, O.V. (2023) Hidrokhimichnyi analiz dynamiky zmin yakosti poverkhnevykh vod richky Oskil [Hydrochemical analysis of surface water quality dynamics in the Oskil river]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriia «Ekolohiia» [Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series «Ecology»],* 29, 17–24. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-02 [in Ukrainian].

Derzhavna ekolohichna inspektsiia Ukrainy (2025). Operatyvna informatsiia shchodo sytuatsii na richkakh Seim ta Desna [Operational information on the situation on the Seim and Desna rivers]. [Electronic resource] URL: https://www.dei.gov.ua/post/2958 (access date: 06.10.2025) [in Ukrainian].

Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan bezpechnosti kharchovykh produktiv ta zakhystu spozhyvachiv (2024, August 21). Sumshchyna: vyiavleno zabrudnennia richky Seim bilia kordonu z RF [Sumy region: pollution of the Seim River detected near the border with Russia]. [Electronic resource] URL: https://dpss.gov.ua/news/sumshchyna-vyiavleno-zabrudnennia-richky-seim-bilia-kordonu-z-rf (access date: 06.10.2025) [in Ukrainian].

Zakon Ukrainy «Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo derzhavnoi polityky u sferi vykorystannia ta okhorony vodnykh resursiv» vid 14 lypnia 2021 r. № 1938-IX [Law of Ukraine «On amendments to certain laws of Ukraine on state policy in the field of use and protection of water resources», July 14, 2021, № 1938-IX]. (2021). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine],* 37, 317. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0173926-21#Text (access date: 06.10.2025) [in Ukrainian].

Kovalenko, S.A., Ponomarenko, R.V., Tretyakov, O.V., Titarenko, A.V., & Ivanov, Ye.V. (2022). Vyznachennia novykh aspektiv zminy ekolohichnoho stanu poverkhnevoho vodnoho obiekta [Determination of New Aspects of Changes in the Ecological State of a Surface Water Body]. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriia: Tekhnichni nauky ta arkhitektura [Municipal Economy of Cities. Series: Engineering Sciences and Architecture],* 3(170), 53–60. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-53-61 [in Ukrainian].

Linnik, R.P., Zhezheria, V.A., & Linnik, P.M. (2018). Zalizo u pryrodnykh poverkhnevykh vodakh Ukrainy: sklad, osoblyvosti mihratsii ta biolohichna rol [Iron in natural surface waters of Ukraine: composition, migration features and biological role]. *Hidrobiolohichnyi zhurnal [Hydrobiological Journal], 54*(5), 63–80. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v54.i5.70 [in Ukrainian].

Lozovitskyi, P.S., & Lozovitskyi, A.P. (2015). Ekolohichne otsiniuvannia vody Seimu na kordoni z Rosiieiu ta transkordonne perenesennia rechovyn stokom [Ecological assessment of the Seim River water at the border with Russia and transboundary transfer of substances by runoff]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences],* 9–10, 62–83 [in Ukrainian].

Ponomarenko, R.V., Plyatsuk, L.D., Kovalov, P.A., & Zatko, Y. (2020). Doslidzhennia zminy yakisnoho stanu poverkhnevoho vodnoho obiekta v umovakh tekhnohennoho navantazhennia [Research of changes in the qualitative state of a surface water body under conditions of technogenic

load]. *Tekhnohenno-ekolohichna bezpeka [Technogenic and Environmental Safety],* 8(2/2020), 48–54. https://doi.org/10.5281/zenodo.4300769 [in Ukrainian].

Kabinet Ministriv Ukrainy (2018). Pro zatverdzhennia Poriadku zdii snennia derzhavnoho monitorynhu vod [On the approval of the Procedure for conducting state water monitoring] (Postava № 758 vid 19 veresnia 2018 r.). [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Tex (access date: 03.10.2025) [in Ukrainian].

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy (2000). *Official Journal of the European Communities, L 327/ 1* [in English].

Feth, J.H. (1981). Chloride in natural continental water: A review. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper,* 2176. https://doi.org/10.3133/wsp2176 [in English].

Kitowski, I., Cierpiał-Wolan, M., & Grygoruk, M. (2023). The water dimensions of Russian–Ukrainian conflict. *Ecohydrology & Hydrobiology, 23*(3), 335–345. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.05.001 [in English].

Nawaz, M.Z., Arshad, M., Hussain, T., Alghamdi, H.A., & Cheng, H. (2021). Bio-purification of sugar industry wastewater and production of high-value industrial products with a zero-waste concept. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61*(21), 3537–3554. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1802696 [in English].

Strokal, V., Kroeze, C., & Kurovska, N. (2021). Transboundary rivers of Ukraine: Perspectives for sustainable development. *Journal of Integrative Environmental Sciences, 18*(1), 1–18. https://doi.org/10.1080/1943815X.2021.1930058 [in English].

Zak, D., Cabezas, A., & Gelbrecht, J. (2021). Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycling and ecological impacts. *Earth-Science Reviews,* 212, 103446. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103446 [in English].

Отримано: 30.10.2025
Прийнято: 26.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 502.131.1:504.06:657.635]:338.244.47
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.30

ПАРАМЕТРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ЯК БАЗОВІ КОМПОНЕНТИ ФОРМУВАННЯ ЗВІТНИХ ДОКУМЕНТІВ СТРАТЕГІЧНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОСВІТИ ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

Ю. О. Карпенко[1], В. О. Свердлов[2]

У статті досліджено сутність, структуру й функціональне значення параметрів і компонентів навколишнього середовища як ключової складової звітних документів стратегічної екологічної оцінки (СЕО) технічної документації територіальних громад. Розкрито теоретико-методологічні засади інтеграції інформації про характеристики й стан довкілля в процеси планування та просторового розвитку територій. Проаналізовано сучасні нормативно-правові акти, що регламентують процедуру СЕО, визначено роль екологічних і природоресурсних показників у забезпеченні відповідності технічної документації вимогам підходів до сталого розвитку.
Особливу увагу приділено структурі природничо-екологічного блоку звіту СЕО, який охоплює дані про геологічну будову, рельєф, ґрунти, стан атмосфери, водні ресурси, флору, фауну, природоохоронну мережу, кліматичні особливості, а також рівень антропогенного навантаження. У роботі підкреслено, що саме ці компоненти є основою для оцінювання екологічного стану території, прогнозування наслідків реалізації планових рішень і визначення екологічних ризиків та альтернатив. Методологічну основу дослідження становлять системний і комплексний підходи, методи аналізу нормативних документів, порівняльного аналізу й картографічного моделювання. Результатом дослідження є узагальнення методичних підходів і рекомендацій щодо збору, систематизації та представлення природничої інформації в межах технічної документації. Запропоновано алгоритм інтеграції природничих компонентів та екологічної інформації у звіт СЕО, що забезпечує наукову обґрунтованість і прозорість прийняття управлінських рішень на регіональному рівні. Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості їх використання органами місцевого самоврядування, розробниками технічної документації, а також екологічними експертами під час підготовки звітів СЕО, оцінки стану навколишнього середовища та планування збалансованого розвитку територіальних громад.

Ключові слова: *стратегічна екологічна оцінка, навколишнє середовище, технічна документація, територіальні громади, природокористування.*

[1] кандидат біологічних наук, доцент,
завідувач кафедри екології, географії та природокористування
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: yuch2011@i.ua
ORCID: 0000-0002-1703-8473
[2] доктор філософії з біології,
старший викладач кафедри екології, географії та природокористування
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: vovasv8989@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4079-0831

ENVIRONMENTAL PARAMETERS AS BASIC COMPONENTS OF THE FORMATION OF REPORTING DOCUMENTS OF STRATEGIC ENVIRONMENTAL EDUCATION AND TECHNICAL DOCUMENTATION OF TERRITORIAL COMMUNITIES

Yu. O. Karpenko, V. O. Sverdlov

The article explores the essence, structure and functional significance of environmental parameters and components as a key component of reporting documents of strategic environmental assessment (SEA) of technical documentation of territorial communities. The theoretical and methodological principles of integrating information on the characteristics and state of the environment into the processes of planning and spatial development of territories are revealed. Modern regulatory legal acts regulating the SEA procedure are analyzed, the role of environmental and natural resource indicators in ensuring compliance of technical documentation with the requirements of approaches to sustainable development is determined.

Particular attention is paid to the structure of the natural and ecological block of the SEA report, which includes data on the geological structure, relief, soils, state of the atmosphere, water resources, flora, fauna, nature protection network, climatic features, as well as the level of anthropogenic load. The work emphasizes that these components are the basis for assessing the ecological state of the territory, predicting the consequences of implementing planning decisions and identifying environmental risks and alternatives.

The methodological basis of the study is a systematic and comprehensive approach, methods of analysis of regulatory documents, comparative analysis and cartographic modeling. The result of the study is a generalization of methodological approaches and recommendations for collecting, systematizing and presenting natural information within the framework of technical documentation. An algorithm for integrating natural components and environmental information into the SEA report is proposed, which ensures scientific validity and transparency of management decision-making at the regional level.

The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their use by local governments, developers of technical documentation, as well as environmental experts during the preparation of SEA reports, environmental assessment and planning of balanced development of territorial communities.

Key words: *strategic environmental assessment, environment, technical documentation, territorial communities, nature management.*

Вступ

Сучасний етап розвитку територіальних громад України характеризується активними процесами децентралізації, реформування системи управління природними ресурсами й упровадження нових підходів до планування територій. У цих умовах особливого значення набуває екологічна складова стратегічних і технічних документів розвитку, що визначає збалансованість територіального управління з відповідністю стандартам законодавства ЄС та України. Одним із ключових інструментів інтеграції екологічного аспекту у процес планування є стратегічна екологічна оцінка (далі – СЕО), яка дає змогу оцінити можливі наслідки реалізації програм, планів, Стратегій чи документів державного планування для стану довкілля та здоров'я населення.

Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» (2018) установлює обов'язковість проведення процедури СЕО для документів державного планування, що визначають рамки для подальшої реалізації проєктів. Відповідно, будь-яка технічна документація, зокрема генеральні плани, схеми планування територій, планів правління відходами чи використання природних ресурсів, повинна включати екологічну складову, побудовану на об'єктивних даних про стан навколишнього середовища (Про стратегічну…, 2018).

У цьому контексті «природничі компоненти» – як сукупність відомостей про геологічну будову, ґрунтовий покрив, водні об'єкти, стан атмосфери, біорізноманіття, кліматичні умови, ландшафтну структуру, природоохоронні території та інші елементи природного середовища – є базовим підґрунтям для формування звітних документів СЕО. Вони забезпечують наукову достовірність аналітичної частини звіту, дають змогу визначити екологічну ємність території, оцінити потенційні ризики, передбачити наслідки антропогенного впливу або акцентувати увагу на пошук альтернатив. Без належного врахування цих компонентів неможливе коректне визначення зон

екологічного ризику, впливів на природно-заповідні території, а також обґрунтування напрямів просторового розвитку громади.

Проблематика інтеграції екологічної та природничої інформації в процес стратегічного планування на рівні територіальних громад є особливо актуальною в умовах сучасних викликів – зміни клімату, деградації ґрунтів, зменшення запасів прісної води, утрати біорізноманіття й зростання антропогенного навантаження на довкілля загалом. Це потребує системного підходу до збору, аналізу й відображення природничих даних у звітній документації, що, у свою чергу, забезпечує екологічну збалансованість і довгострокову ефективність територіального розвитку та реалізації регіональних програм (Про основні…, 2019).

Огляд сучасної науково-практичної літератури й методичних документів показує кілька ключових тенденцій, релевантних для формування звітів СЕО на місцевому рівні. По-перше, останні методичні рекомендації та підходи до СЕО в Україні підкреслюють необхідність застосування геоінформаційних технологій (ГІС) для збору, обробки та візуалізації природничих даних, що значно підвищує оперативність і точність аналітичних висновків. Це фіксується як у практичних рекомендаціях для органів місцевого самоврядування, так і в прикладних дослідженнях із застосування ГІС-аналітики (Стратегічна…, 2022)

Міжнародні та регіональні настанови (зокрема UNECE й ініціативи ЄС/ EU4Environment) спрямовані на уніфікацію процедур СЕО й підвищення прозорості процесу оцінювання для регіональних планів; ці документи акцентують увагу на необхідності включення просторових і природничих даних до звітів СЕО та практиках міжсекторального оцінювання впливів (Questionnaire …, 2025).

Наукові публікації та тренінгові практики останніх років (Okhariev & Pidsadnii, 2024, Кононенко, 2021, Карпенко і Свердлов, 2025) відзначають проблеми фрагментарності й застарілості вихідних даних у місцевих СЕО – відсутність єдиних стандартів збору природничої інформації, нерівномірність доступу до якісних баз даних про ґрунти, водні ресурси та біорізноманіття, а також брак єдиних алгоритмів інтеграції цих даних у процес планування. У наукових працях пропонуються методичні підходи до стандартизації даних і впровадження інструментів прийняття рішень на основі ГІС (Strategic…, 2023).

Водночас у прикладних дослідженнях наголошується на все більшій ролі міждисциплінарних підходів (екологія + просторове планування + соціально-економічний аналіз), що дає змогу точніше прогнозувати екологічні наслідки й оцінювати ризики, пов'язані з реалізацією технічної документації громади. Це підтверджується як у наукових статтях про інформаційне забезпечення прийняття рішень, так і в практичних кейсах реалізації СЕО для програм і проєктів розвитку (Okhariev & Pidsadnii, 2024).

Водночас на практиці спостерігається недостатній рівень методичного забезпечення формування «природничого» блоку у звітах СЕО. Чинні методичні рекомендації часто мають загальний характер і не враховують специфіки територій громад, особливостей ландшафтної структури, екосистемного різноманіття або локальних екологічних проблем (Стратегічний …, 2024). Це зумовлює потребу в удосконаленні підходів до структурування природничих компонентів, їх систематизації та відображення у звітних документах (Стратегічна …, 2023).

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю наукового обґрунтування ролі природничих компонентів у процесі підготовки звітних документів стратегічної екологічної оцінки, а також вироблення методичних принципів їх інтеграції в технічну документацію територіальних громад. Розгляд цього питання сприятиме підвищенню ефективності екологічного планування, прозорості управлінських рішень та узгодженості між технічною, природоохоронною та просторовою політикою на місцевому рівні.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в системному обґрунтуванні ролі природничих компонентів як базової складової звітних документів стратегічної екологічної оцінки технічної документації територіальних громад. У роботі вперше узагальнено структурно-функціональний підхід до інтеграції природничої інформації в процеси стратегічного планування місцевого розвитку. Запропоновано методичну послідовність відбору, аналізу та представлення природничих даних у складі звітів СЕО, що базується на принципах комплексності, достовірності й територіальної конкретизації.

Дослідження розширює наукові уявлення про екологічну інформативність технічної

документації, поглиблює розуміння взаємозв'язку між станом навколишнього середовища та планувальними рішеннями, а також формує підґрунтя для створення уніфікованої моделі опису природничих компонентів та екологічних показників у документах екологічної оцінки.

Практичне значення роботи полягає в можливості застосування запропонованих підходів у діяльності органів місцевого самоврядування, екологічних підрозділів, розробників генеральних планів, схем планування територій, програм природокористування й охорони довкілля.

Використання результатів дослідження сприятиме:

– підвищенню якості звітних документів СЕО та їх відповідності вимогам законодавства;

– покращенню достовірності оцінювання стану навколишнього середовища громад;

– забезпеченню інтеграції екологічних чинників у стратегічне й технічне планування;

– формуванню єдиної інформаційно-аналітичної бази природничих показників у системі місцевого екологічного управління.

Мета дослідження полягає в науковому обґрунтуванні ролі природничих компонентів еколого-інформаційних матеріалів як базової складової формування звітних документів СЕО технічної документації територіальних громад, а також у розробленні методичних підходів до інтеграції даних про стан довкілля в процеси планування розвитку територій.

Реалізація цієї мети передбачає формування комплексного підходу до збору, аналізу, систематизації та представлення природничої інформації у звітних документах СЕО, що забезпечить повноту екологічної характеристики територій і підвищить ефективність управлінських рішень у сфері регіонального планування.

Таким чином, отримані результати мають як теоретичну, так і прикладну цінність, оскільки сприяють удосконаленню методології СЕО та підвищенню ефективності практики просторового планування на рівні територіальних громад.

Матеріал і методи

Методологічну основу дослідження становить системний підхід, який розглядає природничі компоненти як взаємопов'язані елементи єдиної системи території. Такий підхід дає змогу комплексно оцінювати природне середовище й ураховувати його взаємодію з антропогенними факторами під час формування звітних документів СЕО.

У процесі дослідження застосовано комплекс взаємодоповнювальних методів, серед яких – аналітичний метод (використано для узагальнення чинних нормативно-правових актів і методичних документів, що регламентують проведення СЕО та формування технічної документації територіальних громад); порівняльно-географічний метод (застосовано для зіставлення природничих характеристик територій різних адміністративних одиниць і визначення типологічних ознак їх природного потенціалу); метод системного аналізу (забезпечив виявлення структурних і функціональних зв'язків між окремими природними компонентами, а також визначення їх ролі у формуванні загального екологічного стану території); картографічний метод (використано для просторової візуалізації природничих показників, побудови схем ландшафтної структури, зон екологічного ризику й екологічного каркасу територій); геоінформаційний аналіз (застосовано для інтеграції просторових даних, моделювання територіальних процесів і створення інформаційної бази природничих компонентів, що може бути використана при розробленні звітів СЕО); екологічно-статистичний метод (дав змогу кількісно оцінити ступінь антропогенного навантаження, рівень трансформації ландшафтів і показники екологічної стабільності територій); метод експертних оцінок (використано для перевірки достовірності інформації, отриманої з різних джерел, формування узгоджених висновків щодо значення природничих компонентів у системі екологічної оцінки) (Методичні…, 2018).

Застосування вказаних методів забезпечило комплексність дослідження, дало змогу сформувати об'єктивну картину до оцінки природного стану територій і запропонувати науково обґрунтовані рекомендації щодо вдосконалення звітних документів СЕО.

Результати та їх обговорення

Результати дослідження підтверджують, що природничі компоненти становлять наукове й інформаційне підґрунтя СЕО технічної документації територіальних громад. Їх інтеграція у звітні документи забезпечує всебічне розкриття природно-ресурсного потенціалу, визначення ступеня антропогенної трансформації території, а також формування реалістичних сценаріїв просто-

рового розвитку з урахуванням екологічних обмежень і забезпечення умов для життя і здоров'я населення територіальних громад.

У результаті аналізу з'ясовано, що більшість звітів СЕО, які розробляються в сучасних умовах, характеризуються недостатнім рівнем деталізації характеристик природничих компонентів. Типовими недоліками є фрагментарність даних, невідповідність показників між різними джерелами, брак інтегрованих оцінок стану екосистем, а також відсутність системної взаємодії між геологічним, кліматичним і біотичним блоками. Такі протиріччя в структурі призводять до зниження достовірності екологічних прогнозів та ускладнюють процес ухвалення управлінських рішень (Довкілля …, 2022).

З метою усунення виявлених недоліків у межах дослідження сформовано комплексну структуру природничих компонентів СЕО, яка включає сім ключових блоків (табл. 1):

Таблиця 1

Структура природничих компонентів звіту СЕО технічної документації територіальної громади

№ з/п	Природничий компонент	Змістова характеристика	Основні показники оцінювання	Джерела даних	Методи аналізу й оцінки
1	Геологічна будова та рельєф	Структура земної поверхні, геоморфологічні особливості, прояви геодинамічних процесів	Тип рельєфу, експозиція схилів, стійкість до ерозії, ризики зсувів	Геологічні карти, дані Державної служби геології та надр України, регіональні реєстри, екологічні паспорти	Геоморфологічний аналіз, ГІС-моделювання, порівняльний метод
2	Ґрунтовий покрив	Типи та властивості ґрунтів, бонітет ґрунтів, деградаційні процеси	Гранулометричний склад, гумусний уміст, кислотність, ступінь еродованості	Матеріали Держгеокадастру, агрохімічні паспорти ґрунтів	Польові обстеження, лабораторний аналіз, бальна оцінка родючості
3	Водні ресурси	Мережа поверхневих вод, підземні запаси, водоносні горизонти, водозабірні площі	Гідрохімічні та гідробіологічні показники, дебіт, глибина залягання, площа водозбору	Дані Держводагентства, спостереження Укргідрометцентру, лабораторії якості води	Гідрологічний моніторинг, індекс забруднення води, екологічна класифікація
4	Кліматичні умови	Кліматичні параметри, вплив зміни клімату на екосистеми	Середньорічна температура, кількість опадів, вітровий режим, індекси посушливості	Укргідрометцентр, дані метеостанцій, кліматичні архіви, супутникові дані	Динамічний аналіз рядів, екстраполяційне моделювання
5	Біотичні ресурси (флора і фауна)	Видовий склад, чисельність, рідкісні види, природоохоронні території	Біорізноманіття (індекси Шеннона, Маргалефа), наявність ЧКУ-видів, видів регіональної охорони	Дані Департаменту екології, лісогосподарських підприємств, природоохоронних установ, наукових звітів	Біоіндикаційні методи, екологічне картографування, таксономічний аналіз
6	Ландшафтна структура	Просторова організація природних та антропогенних ландшафтів	Типи ландшафтів, їх площа, ступінь трансформації, екологічна ємність	Картографічні матеріали, ГІС-аналіз, польові дослідження	Ландшафтно-екологічне зонування, картографічне моделювання
7	Антропогенне навантаження	Вплив господарської діяльності на довкілля, урбаністичні й технологічні показники та впливи	Щільність забудови, навантаження на ґрунти й водні об'єкти, обсяг викидів і відходів	Дані місцевих органів самоврядування, підприємств, статистичні звіти з відкритих джерел (сайт Департаменту екології)	Екологічне нормування, індекс антропогенного впливу, порівняльний аналіз

1. Геологічна будова й рельєф виступають як основа для оцінки інженерно-геологічних умов і стійкості території до природних і техногенних процесів.

2. Ґрунтовий покрив є показником продуктивності екосистем і чутливості території до деградаційних процесів.

3. Водні ресурси визначаються як важливий компонент життєзабезпечення населення, що потребує постійного моніторингу кількісних і якісних характеристик.

4. Кліматичні умови забезпечують регуляцію функціонування екологічних систем, впливають на водний баланс та агрокліматичний потенціал території.

5. Біотичні ресурси відображають біорізноманіття, є індикатором екологічної рівноваги.

6. Ландшафтна структура забезпечує системне бачення природно-територіального комплексу, виявляє зони конфліктності між природокористуванням і збереженням природного середовища, у тому числі в межах наявної мережі природоохоронних територій.

7. Антропогенне навантаження виступає як інтегральний показник, що характеризує ступінь впливу господарської діяльності на природні екосистеми та визначає напрями необхідних заходів зі збалансованості й екологічної оптимізації територій.

Наведена структура може бути адаптована відповідно до специфіки території громади та характеру технічної документації (генерального плану, схеми планування, програми природокористування тощо). Для комплексного аналізу рекомендується створення інтегрованої бази екологічних показників із застосуванням геоінформаційних технологій (ДСТУ…, 2015).

Розроблена структурно-логічна модель взаємозв'язків природничих компонентів (рис. 1) показує, що між ними існують багатовекторні кореляційні зв'язки, які визначають рівновагу природних процесів, а саме: зміна кліматичних параметрів безпосередньо впливає на водний баланс, а деградація ґрунтів призводить до зниження біорізноманіття й порушення ландшафтної стабільності. У свою чергу, збільшення антропогенного навантаження здатне спричинити поступові або системні зміни в усіх природних блоках.

Обґрунтовано доцільність використання ГІС як інструмента інтеграції просторових даних, що забезпечує візуалізацію екологічних показників, просторове моделювання процесів і побудову тематичних карт. ГІС-аналіз дає змогу здійснювати моніторинг змін природного середовища в реальному часі, проводити просторову оцінку рівня антропогенного навантаження та прогнозувати наслідки реалізації проєктних рішень.

Виявлено, що впровадження єдиної методологічної системи збору й обробки природничих даних є ключовою умовою підвищення якості звітів СЕО. Така система має базуватися на використанні стандартизованих форматів представлення інформації, забезпеченні відкритості екологічних даних і застосуванні сучасних технологій моніторингу.

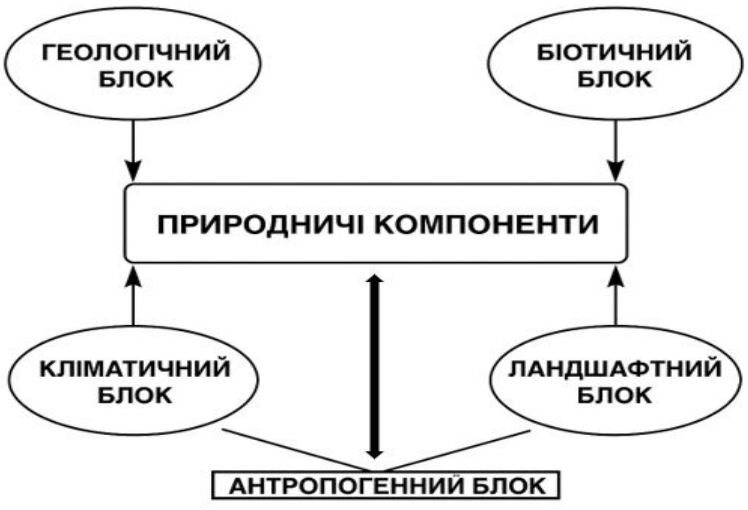


Рис. 1. Система природничих компонентів у структурі звіту СЕО

Окрему увагу в дослідженні приділено питанням взаємозв'язку природничих і соціально-економічних показників у межах територіальних громад. Доведено, що інтеграція природничих компонентів у стратегічне планування дає змогу визначати екологічні можливості господарського освоєння територій, формувати збалансовані сценарії розвитку й оптимізувати просторову структуру поселень. Так, застосування природничо-аналітичних підходів сприяє виявленню потенційно конфліктних територій, де можливе перевищення гранично допустимого антропогенного навантаження або ризик деградації природних систем (Андрієнко і Шако, 2016).

Варто зазначити, що ефективна інтеграція природничих компонентів у звіти СЕО можлива лише за умов міждисциплінарної взаємодії фахівців – екологів, географів, геологів, ґрунтознавців, біологів, спеціалістів з просторового планування. Такий підхід формує науково обґрунтовану базу даних для прийняття екологічно виважених управлінських рішень, підвищує прозорість планувальних процедур і сприяє реалізації принципів сталого розвитку на локальному рівні.

Результати дослідження підтверджують, що природничі компоненти є не лише інформаційним підґрунтям звітів СЕО, а й методологічною основою для побудови сучасної екологічно орієнтованої системи територіального управління, яка відповідає вимогам Європейської директиви 2001/42/ЄС і національним нормативним актам України.

Висновки

Природничі компоненти становлять базову основу звітних документів СЕО, оскільки відображають реальний стан навколишнього середовища і є джерелом для екологічного прогнозування. Їх комплексний аналіз сприяє формуванню екологічно збалансованих управлінських рішень на рівні територіальних громад.

Використання інтегрованих методик збору і представлення інформації про стан навколишнього середовища та його компонентів підвищує ефективність стратегічного планування та забезпечує відповідність технічної документації вимогам екологічного законодавства.

Оптимізація збору, аналізу й візуалізації природничих даних і сучасної екологічної інформації (зокрема із застосуванням ГІС-технологій) є важливим напрямом удосконалення процедур СЕО на регіональному рівні.

Запровадження єдиних стандартів включення інформації про абіотичні та біотичні компоненти довкілля до звітів СЕО дасть змогу забезпечити їх порівнюваність, наукову обґрунтованість і практичну цінність для розвитку територіальних громад.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення уніфікованих форматів картографічного й аналітичного представлення природничих компонентів у звітних документаціях СЕО.

Список використаної літератури

Андрієнко М.В., Шако В.С. Сутність державної екологічної політики на загальнодержавному та регіональному рівнях. *Державне управління: удосконалення та розвиток.* 2016. № 9. [Електронний ресурс]. URL: http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=1051 (дата звернення: 15.10.2025).

Довкілля України 2021: статистичний збірник. *Державна служба статистики України.* 2022. [Електронний ресурс]. URL: https://stat.gov.ua/sites/default/files/2023-08/Статистичний%20збірник%20"Довкілля%20України".pdf (дата звернення: 14.10.2025).

ДСТУ ISO 14001:2015 Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосовування (ISO 14001:2015, IDT). *БУДСТАНДАРТ Online – нормативні документи будівельної галузі України.* [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64015 (дата звернення: 10.10.2025).

Карпенко Ю.О., Свердлов В.О. Реалізація цілей сталого розвитку в акценті на регіональні екологічні проблеми. *Український журнал природничих наук.* 2025. № 12. С. 361–370. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.36

Кононенко І. Державна екологічна політика в умовах децентралізації влади в Україні. *Геополітика України: історія і сучасність.* 2021. № 2(27). С. 67–74. https://doi.org/10.24144/2078-1431.2021.2(27).67-74

Методичні рекомендації із здійснення стратегічної екологічної оцінки документів державного планування. [Електронний ресурс]. URL: https://www.ecorivne.gov.ua/tmp/nakaz_CEO_296.pdf (дата звернення: 09.10.2025).

Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28.02.2019. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text (дата звернення: 13.10.2025).

Про стратегічну екологічну оцінку : Закон України від 20.03.2018. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19#Text (дата звернення: 08.10.2025).

Стратегічна екологічна оцінка комплексного плану. [Електронний ресурс]. URL: https://decentralization.ua/uploads/library/file/819/SEO_ready.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 16.10.2025).

Стратегічний план роботи Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України на 2024–2028 роки. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України – офіційний сайт.* [Електронний ресурс]. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/10/Strategichnyj_plan_24.10.2024_zatverdzhenyj-Ministrom.pdf (дата звернення: 18.10.2025).

Okhariev V.O., Pidsadnii S.H. Information support of decision making for technogenic and environmental safety using geospatial data analysis. *Environmental safety and natural resources*. 2024. Vol. 50. P. 115–129. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.115-129

Strategic ecological assessment of Ukraine's Reconstruction Projects – Ecoclub Rivne is an environmental NGO. [Електронний ресурс]. URL: https://ecoclubrivne.org/en/sea-changes-to-the-law/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 23.10.2025).

Questionnaire for the report of UKRAINE on the implementation of the Protocol on Strategic Environmental Assessment in the period 2022–2024. [Електронний ресурс]. URL: https://unece.org/sites/default/files/2025-07/UKRAINE_2022-2024_Template%20Questionnarie_PROTOCOL_03.07.2025.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 09.10.2025).

References

Andriienko, M.V., & Shako, V.S. (2016). Sutnist derzhavnoi ekologhichnoi polityky na zaghalnoderzhavnomu ta reghionalnomu rivniakh [The essence of state environmental policy at the national and regional levels]. *Derzhavne upravlinnja: udoskonalennja ta rozvytok [Public administration: improvement and development].* [Electronic resource] URL: http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=1051 (access date 15.10.2025) [in Ukrainian].

Dovkillia Ukrainy 2021: statystychnyi zbirnyk (2022). [Environment of Ukraine 2021: statistical compilation]. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. [State Statistics Service of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://stat.gov.ua/sites/default/files/2023-08/Статистичний%20збірник%20“Довкілля%20України”.pdf (access date 14.10.2025) [in Ukrainian].

DSTU ISO 14001:2015 Systemy ekologhichnogho upravlinnja. Vymoghy ta nastanovy shhodo zastosovuvannja (ISO 14001:2015, IDT). (2015). [DSTU ISO 14001:2015 Environmental management systems. Requirements and guidance for application (ISO 14001:2015, IDT)]. BUDSTANDART Online – normatyvni dokumenty budiveljnoji ghaluzi Ukrajiny [BUDSTANDART Online – regulatory documents of the construction industry of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64015 (access date 10.10.2025) [in Ukrainian].

Karpenko, Yu.O., & Sverdlov, V.O. (2025). Realizacija cilej stalogho rozvytku v akcenti na regionaljni ekologhichni problemy [Implementation of sustainable development goals with an emphasis on regional environmental problems]. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 12, 361–370. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.36 [in Ukrainian].

Kononenko, I. (2021). Derzhavna ekologhichna polityka v umovakh decentralizacii vlady v Ukraini [State Environmental Policy in the Conditions of Decentralization of Power in Ukraine]. *Gheopolityka Ukrajiny: istorija i suchasnistj [Geopolitics of Ukraine: History and Modernity]*, 2(27), 67–74. https://doi.org/10.24144/2078-1431.2021.2(27).67-74 [in Ukrainian].

Metodychni rekomendacii iz zdiisnennia strateghichnoii ekologichnoii ocinky dokumentiv derzhavnogho planuvannia (2018). [Methodological recommendations for conducting strategic environmental assessment of state planning documents]. [Electronic resource] URL: https://www.ecorivne.gov.ua/tmp/nakaz_CEO_296.pdf (access date 09.10.2025). [in Ukrainian].

Pro Osnovni zasady (strateghiiu) derzhavnoii ekologhichnoii polityky Ukrainy na period do 2030 roku: Zakon Ukrainy (2019). [On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the Period Until 2030: Law of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text (access date 13.10.2025) [in Ukrainian].

Pro strateghichnu ekologhichnu ocinku: Zakon Ukrainy (2018). [On strategic environmental assessment: Law of Ukraine]. [Electronic resource] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19#Text (access date 08.10.2025) [in Ukrainian].

Strateghichna ekologhichna ocinka kompleksnogho planu (2023) [Strategic environmental assessment of the comprehensive plan]. [Electronic resource] URL: https://decentralization.ua/uploads/library/file/819/SEO_ready.pdf?utm_source=chatgpt.com (access date 16.10.2025) [in Ukrainian].

Stratehichnyi plan roboty Ministerstva zakhystu dovkillja ta pryrodnykh resursiv Ukrainy na 2024 – 2028 roky (2024) [Strategic work plan of the ministry of environmental protection and natural resources of ukraine for 2024-2028]. Ministerstvo zakhystu dovkillja ta pryrodnykh resursiv Ukrainy – oficiinyj sait [Ministry of environmental protection and natural resources of Ukraine – official website]. [Electronic resource] URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/10/Strategichnyj_plan_24.10.2024_zatverdzhenyj-Ministrom.pdf (access date 18.10.2025) [in Ukrainian].

Okhariev, V.O., & Pidsadnii, S.H. (2024). Information support of decision making for technogenic and environmental safety using geospatial data analysis. *Environmental safety and natural resources*, 50, 115–129. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.115-129 [in English].

Strategic ecological assessment of Ukraine's Reconstruction Projects – Ecoclub Rivne is an environmental NGO (2023). [Electronic resource] URL: https://ecoclubrivne.org/en/sea-changes-to-the-law/?utm_source=chatgpt.com (access date 23.10.2025) [in English].

Questionnaire for the report of UKRAINE on the implementation of the Protocol on Strategic Environmental Assessment in the period 2022–2024 (2025). [Electronic resource] URL: https://unece.org/sites/default/files/2025-07/UKRAINE_2022-2024_Template%20Questionnarie_PROTOCOL_03.07.2025.pdf?utm_source=chatgpt.com (access date 09.10.2025) [in English].

Отримано: 29.10.2025
Прийнято: 15.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 556. 532 (477-924-52)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.31

ЕКОЛОГО-ТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ҐРУНТІВ У МЕЖАХ БЕРЕСТИНСЬКОГО РАЙОНУ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

О. М. Крайнюков[1], І. А. Кривицька[2], В. Л. Самохвалова[3], Б. Ю. Матіськo[4], В. М. Філатов[5]

У роботі представлено результати комплексного дослідження фітотоксичних властивостей ґрунтів на території Берестинського району Харківської області, проведеного у 2025 році. Метою дослідження було встановлення сезонних змін рівня токсичності й визначення впливу антропогенних і техногенних факторів на якість ґрунтового середовища. Для оцінки стану ґрунтів застосовано метод біотестування з використанням тест-об'єкта Zea mays L., який дає змогу оцінити реальний біологічний ефект сукупності забруднювачів.

Результати експериментів показали, що рівень токсичності ґрунтів має виражену сезонну динаміку. Навесні переважають процеси мобілізації токсичних сполук унаслідок накопичення залишків агрохімікатів та активізації анаеробних процесів після танення снігу. Улітку спостерігається

[1] доктор географічних наук, професор,
професор кафедри екології та менеджменту довкілля
(Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: alkraynukov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5264-3118

[2] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та менеджменту довкілля
(Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: ivkrivicka@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4727-794X

[3] кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник відділу охорони ґрунтів
(Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського», м. Харків)
e-mail: v.samokhvalova.com@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1352-9838

[4] аспірант кафедри екології та менеджменту довкілля
(Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: matisko1998@gmail.com
ORCID: 0009-0001-2672-1813

[5] аспірант кафедри екології та менеджменту довкілля
(Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: filatov@gmail.com
ORCID: 0009-0004-9102-7686

суттєве покращення якості ґрунтів, що пов'язано зі стабілізацією водного режиму, активним ростом рослин і біохімічною детоксикацією органічних сполук. Восени ґрунти проходять фазу відновлення: завдяки опадам і зростанню мікробіологічної активності відбувається вимивання токсичних речовин, формування нового шару гумусу й вирівнювання хімічного складу.

Виявлено, що на більшості моніторингових ділянок рівень забрудненості зменшується до I–II класу якості (незабруднені або слабко забруднені ґрунти). Водночас у межах с. Крестище зберігається підвищений рівень токсичності, що пов'язано з діяльністю нафто- та газовидобувних підприємств і накопиченням вуглеводневих сполук.

Отримані результати свідчать, що ґрунти регіону зберігають здатність до самоочищення, біологічної регенерації й екологічної стабілізації, особливо в літньо-осінній період. Доведено ефективність використання біотестування як інструмента оцінки фактичної токсичності ґрунтів і доцільність подальшого впровадження системного моніторингу для забезпечення сталого використання агроекосистем і зниження ризику накопичення токсичних речовин.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання даних біотестування для екологічного нормування, контролю за станом земельних ресурсів і планування заходів з рекультивації ґрунтів у районах, що зазнали техногенного або військового впливу. Отримані висновки можуть бути основою для розроблення регіональних програм моніторингу, спрямованих на підвищення екологічної безпеки та збереження родючості ґрунтів у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: *забруднення, ґрунти, тест-об'єкт, фітотоксичні властивості, біотестування.*

ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF SOIL QUALITY IN THE BERESTYNSKYI DISTRICT, KHARKIV REGION

O. M. Krainiukov, I. A. Kryvytska, V. L. Samokhvalova, B. Yu. Matisko, V. M. Filatov

The study presents the results of a comprehensive assessment of the phytotoxic properties of soils in the Berestynskyi district of the Kharkiv region, conducted in 2025. The main objective was to determine seasonal variations in soil toxicity and to evaluate the influence of anthropogenic and technogenic factors on soil quality. The bioassay method using Zea mays L. as a test organism was applied to assess the actual biological effects of complex soil contamination.

The results revealed a distinct seasonal dynamic in soil toxicity. In spring, the mobilization of toxic compounds dominates due to the accumulation of residual agrochemicals and activation of anaerobic processes following snowmelt. During summer, a significant improvement in soil quality occurs, associated with the stabilization of the water regime, active plant growth, and biochemical detoxification of organic pollutants. In autumn, soils undergo a recovery phase: rainfall and increased microbial activity promote the leaching of toxic substances, the formation of a new humus layer, and stabilization of the chemical balance.

Most monitoring sites showed a decrease in contamination levels to Class I–II (uncontaminated or slightly contaminated soils). However, elevated toxicity levels persisted in the Krestyshche area, likely due to oil and gas extraction activities and the accumulation of hydrocarbon compounds.

The findings indicate that the region's soils maintain the capacity for self-purification, biological regeneration, and ecological stabilization, particularly during the summer-autumn period. The study confirms the effectiveness of bioassay methods for assessing the actual toxicity of soils and supports the necessity of systematic monitoring to ensure sustainable agricultural land use and minimize the risk of toxic substance accumulation.

The practical significance of the research lies in the potential application of bioassay data for environmental regulation, soil quality control, and the planning of reclamation measures in areas affected by technogenic or military impacts. The results can serve as a scientific basis for developing regional soil monitoring programs aimed at enhancing ecological safety and preserving soil fertility in the long term.

Key words: *pollution, soils, test object, phytotoxic properties, biotesting.*

Вступ

Ґрунтовий покрив можна визначити як динамічну суміш частинок гірських порід, органічної речовини, повітря та води, і він є фундаментальним компонентом екосистеми й важливим ресурсом для людської діяльності.

Ґрунти виконують різні важливі функції для підтримки життя на планеті: він забезпечує рослини та сільськогосподарські куль-

тури водою та поживними речовинами, а також впливає на міграцію речовин, що потрапляють у навколишнє середовище (зберігання, фільтрація та буферизація) (Vogel et al., 2019; Szopka et al., 2021).

Ґрунт є невідновлюваним ресурсом, і необхідність запобігання його деградації стає все більш нагальною з кожним днем. Європейська комісія включила захист ґрунтів до пріоритетів 6-ї Програми дій з охорони навколишнього середовища, розробивши Тематичну стратегію щодо ґрунтів (СТС) у 2002 році (Комісія Європейських Співтовариств, 2002) і пропозицію щодо рамкової програми захисту ґрунтів у 2006 році (Комісія Європейських Співтовариств, 2006).

Хімічне забруднення є одним із основних факторів деградації ґрунту, і воно може бути прямим результатом застосування пестицидів, шламів і ґрунтових поліпшувачів, а також наслідком вологого або сухого осадження забруднювачів повітря з природних та антропогенних джерел. Присутність органічних і неорганічних ксенобіотиків у ґрунті викликає широке занепокоєння, оскільки ці агенти можуть впливати на здоров'я людини та навколишнього середовища (Arellano et al., 2015; Okereafor et al., 2020).

Потенційний вплив забруднюючих речовин на здоров'я людини та навколишнього середовища оцінюється за допомогою оцінки ризику на основі вмісту хімічних речовин або біологічних підходів. Ці різні методи часто застосовуються в інтегрованій стратегії моніторингу для підвищення її достовірності: хімічна характеристика надає інформацію про рівні конкретних ксенобіотиків, тоді як біологічні дослідження використовують моделі in vitro (клітини людини, тварин і бактерій) та in vivo (наприклад, вищі рослини, дощові черв'яки) для оцінки реакцій, викликаних взаємодією потенційних рецепторів із забрудненим ґрунтом, ураховуючи біодоступність забруднювачів, шлях впливу та надходження.

Використання біологічних аналізів є цінним інструментом для оцінки якості ґрунту. Ці аналізи базуються на застосуванні репрезентативних моделей in vitro й in vivo, які надають інформацію про потенційні небезпеки для здоров'я людини та навколишнього середовища. Дослідження токсичних властивостей забруднених ґрунтів описані в роботах із використанням кількох модельних організмів, таких як дощові черв'яки (Resende et al., 2018; Li et al., 2020), рослини (Loureiro et al., 2006; Massa et al., 2018) або клітинні лінії, причому останні піддавалися впливу екстрактів забруднюючих речовин, отриманих безпосередньо з ґрунтів (Baderna et al., 2013, 2014; Husejnovic et al., 2018). Окрім забруднених ґрунтів, ці аналізи також виявилися відповідним підходом для вивчення токсичності ґрунтів сміттєзвалищ (Alimba et al., 2016; Swati et al., 2017), а також інших забруднених субстратів, таких як осади (Pinto et al., 2014).

Метою роботи було дослідження токсичних властивостей ґрунтів на території Берестинського району Харківської області за допомогою методу біотестування.

Матеріал і методи

У навчально-дослідній лабораторії еколого-токсикологічних досліджень навчально-наукового інституту екології, зеленої енергетики та сталого розвитку Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна проведено серію експериментальних досліджень щодо встановлення фітотоксичних властивостей ґрунтів і їх впливу на ростові показники коренів і паростків тест-об'єкта *Zea mays* L. із 6 моніторингових площадок (ділянок).

Під час визначення придатності насіння вищих рослин для біологічного тестування встановлювали концентрацію еталонної речовини, яка спричиняє зниження довжини коренів і/або паростків на 20% протягом 120 год біотестування ($ЕК_{(20-120)}$) (Кривицька, 2020).

Як еталонну речовину використовували фенол (C_6H_5OH) кваліфікації ч. д. а. Вихідний розчин готували в концентрації 1 г/дм³, використовуючи дистильовану воду. Із цього розчину готували серію робочих розчинів із концентрацією від 100 до 200 мг/дм³ C_6H_5OH з інтервалом 25 мг/дм³, застосовуючи дехлоровану водопровідну воду. Біотестування тривало 120 годин, після чого за експериментальними даними розраховували значення $ЕК_{(20-120)}$ (Кривицька, 2020). Критерієм токсичності визначали зменшення довжини паростків і коренів відносно контролю протягом 120 год після експозиції (контроль – зволоження дехлорованою відстояною водою). На підставі вимірювання довжини коренів і паростків у контрольних і дослідних варіантах розраховували середні арифметичні значення, за якими визначали відхилення за формулою (1):

$$A = ((Xk - Xd) / Xk) * 100\ \%, \qquad (1)$$

де: A – зменшення довжини коренів (паростків) у досліді відносно контролю, %; X_k –

середня довжина коренів (паростків) у контролі, мм; *Xd* – середня довжина коренів (паростків) у досліді, мм.

Розчини вважали фітотоксичними, якщо будь-який із наведених показників суттєво відрізнявся від контрольного значення.

Для оцінювання рівня забруднення ґрунтів застосовували показник ступеня забрудненості ґрунтів, що визначався за рівнем пригнічення ростових процесів. Його кількісним вираженням слугував коефіцієнт забрудненості ґрунтів ($К_{зг}$), який диференціювали відповідно до градацій пригнічення росту (Кривицька, 2020).

У таблиці 1 наведено класифікацію якості ґрунтів за ступенем забрудненості.

Відбір зразків ґрунтів на моніторингових площадках проведено в березні, червні та жовтні 2025 року.

На рисунку 1 і таблиці 2 наведено територію дослідження й моніторингові площадки на території Берестинського району Харківської області.

Результати

Відповідно до проведених у березні 2025 року експериментальних досліджень, отримано такі результати (рис. 2): найбільший ступінь забрудненості ґрунтів визначено в селищах Крестище, Оленівка та Раківка, де рівень забрудненості ґрунтів дорівнював ІІІ класу якості – ґрунти помірно забруднені (табл. 1), що може свідчити про наявність надмірного впливу токсичних речовин, які перебувають у ґрунтах у різних фізико-хімічних формах. З огляду на те що відбір зразків проводився в межах сільськогосподарських угідь, тобто на територіях, які ми вважали найменш забруд-

Таблиця 1

Класифікація якості ґрунтів за ступенем забрудненості

Клас якості ґрунтів	**Рівень забрудненості ґрунтів**	**Рівні пригнічення ростових процесів (фітотоксичний ефект), %**	**Ступінь забрудненості ґрунтів, $К_{зг}$**
I	Незабруднені	0–20	1,1
II	Слабко забруднені	20,1–40	1,2
III	Помірно забруднені	40,1–60	1,3
IV	Брудні	60,1–80	1,4
V	Дуже брудні	80,1–100	1,5

– моніторингові площадки.

Рис. 1. Розташування моніторингових площадок на території дослідження

Таблиця 2

Місця розташування моніторингових площадок

№ з/п	Моніторингові площадки	Координати
1	с. Українка	49.579099, 35.538966
2	с. Крестище	49.548950, 35.497064
3	с. Оленівка	49.590828, 35.534207
4	с. Раківка	49.564540, 35.601939
5	с. Мирне	49.548858, 35.478772
6	с. Світле	49.541927, 35.546183

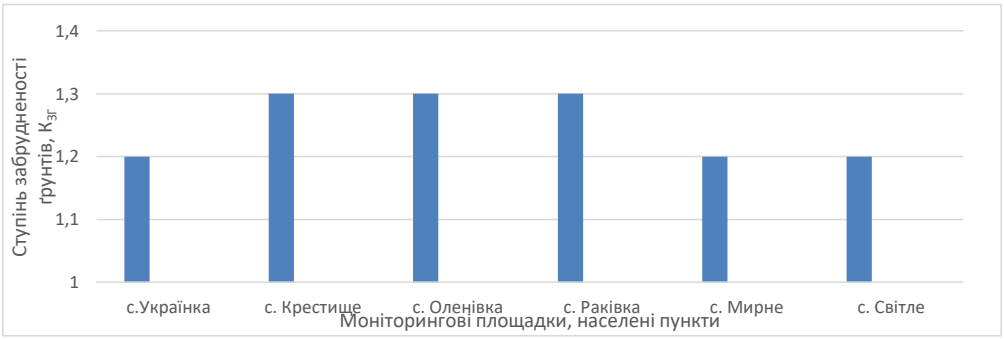


Рис. 2. Результати визначення фітотоксичних властивостей ґрунтів на моніторингових площадках Берестинського району Харківської області, які були відібрані в березні 2025 року

неними, виявлений рівень забруднення виглядає особливо показовим. Імовірно, такі показники є наслідком потрапляння до ґрунту різноманітних хімічних токсичних сполук, що утворилися або були розсіяні внаслідок того, що після осінньо-зимового періоду в ґрунті можуть накопичуватися залишки мінеральних добрив, гербіцидів, інсектицидів або фунгіцидів, унесених попереднього сезону. Під час танення снігу й підвищення вологості ці речовини можуть переходити в більш доступну форму, створюючи токсичне середовище для рослин і мікроорганізмів. На інших моніторингових площадках фітотоксичні властивості ґрунтів знаходилися на меншому рівні – II клас (ґрунти слабко забруднені) – селища Українка, Мирне та Світле. Також варто відмітити, що після зимового періоду, коли ґрунт відтає, починається активне розкладання органічних залишків. Якщо в ґрунті багато органіки або він погано аерується, можуть утворюватися токсичні гази (аміак, сірководень, метан) та органічні кислоти, що тимчасово може підвищувати рівень забрудненості ґрунтів.

У червні 2025 року проведено другий етап спостережень, у результаті яких отримано такі результати (рис. 3): на моніторингових ділянках у с. Українка та с. Світле не визначено токсичних властивостей ґрунтів – I клас якості ґрунтів (незабруднені); на моніторингових площадках у межах селищ Оленівка, Раківка та Мирне в зразках ґрунтів було визначено II клас якості ґрунтів (слабко забруднені); у зразку ґрунту із с. Крестище встановлено III клас якості (помірно забруднені). Покращення якості ґрунтів у більшості моніторингових площадок можна пояснити декількома причинами:

– після весняного надлишку води, коли талі води вимивають токсичні сполуки, улітку ґрунт досягає більш стабільного водного режиму. Менше застою води означає менше анаеробних (гнильних) процесів, які часто спричиняють накопичення токсичних сполук;

– рослини активно ростуть і поглинають частину шкідливих елементів із ґрунту, зокрема важкі метали, нітрати, залишки пестицидів. Коренева система покращує структуру ґрунту, а фотосинтез сприяє стабілізації екосистеми;

– у сухих, прогрітих ґрунтах покращується аерація. Це сприяє окисненню токсичних сполук, зокрема відновлених форм

металів (наприклад, Fe^{2+}, Mn^{2+}), які переходять у менш токсичні;

– багато пестицидів та органічних токсикантів нестійкі при високих температурах і під дією ультрафіолету. Улітку відбувається їх розклад і детоксикація, тому загальний рівень хімічного навантаження на ґрунт зменшується.

Рівень забрудненості ґрунтів у с. Крестище залишився на тому ж рівні, щой навесні. На думку авторів, це може бути наслідком діяльності великої кількості нафтогазовидобувних ділянок, що призводить до забруднення ґрунтів надлишковими концентраціями вуглеводнів фітотоксичної дії: вони ушкоджують кореневу систему, пригнічують проростання насіння, порушують фотосинтез. Рослини втрачають здатність засвоювати поживні речовини, жовтіють, відмирають або накопичують токсичні сполуки у тканинах. Під дією мікроорганізмів або сонячного випромінювання вуглеводні можуть частково окислюватися, утворюючи альдегіди, кетони, органічні кислоти, які часто ще токсичніші за початкові сполуки.

Як видно з отриманих у жовтні 2025 року експериментальних даних з моніторингових площадок на території Берестинського району Харківської області, рівень забрудненості ґрунтів залишився на «літньому» рівні, а на моніторинговій ділянці в с. Крестище навіть зменшився (рис. 4). На моніторингових ділянках у с. Українка та с. Світле не визначено токсичних властивостей ґрунтів – І клас якості ґрунтів (незабруднені). На моніторингових ділянках у межах селищ Оленівка, Раківка, Мирне та Крестище у зразках ґрунтів визначено ІІ клас якості ґрунтів (слабко забруднені).

На думку авторів, восени ґрунт проходить фазу відновлення й саморегуляції: після літньої спеки приходять дощі, що сприяє вимиванню надлишкових солей, нітратів, залишків добрив і пестицидів з верхнього шару. У результаті концентрація токсичних речовин на поверхні знижується, а хімічний склад ґрунту вирівнюється; мікрофлора знову активна; формується новий шар органічної речовини. Тому показники якості (структура, вологість, хімічна рівновага, біологічна активність) можуть бути кращі, ніж улітку, коли домінують стресові фактори: спека, дефіцит вологи й надлишок агрохімії, і це може сприяти усуненню токсичних властивостей ґрунтів.

Обговорення

Результати експериментальних досліджень показали, що рівень токсичності ґрунтів має виражену сезонну динаміку з чітко окресленими фазами активізації та відновлення. Навесні спостерігається підвищення токсичності внаслідок мобілізації забруднювальних речовин, накопичених за зиму, зокрема залишків агрохімікатів і продуктів анаеробного розкладу органічних речовин після танення снігу. У літній період під впливом стабілізації водного режиму, активної рослинності й біохімічної детоксикації якість ґрунтів суттєво поліпшується. Восени ґрунти переходять у фазу природного відновлення, що супроводжується активізацією мікробіологічних процесів, вимиванням токсикантів атмосферними опадами, накопиченням гумусу та вирівнюванням хімічного складу.

На більшості моніторингових ділянок зафіксовано зниження рівня забрудненості до І–ІІ класу якості, що свідчить про

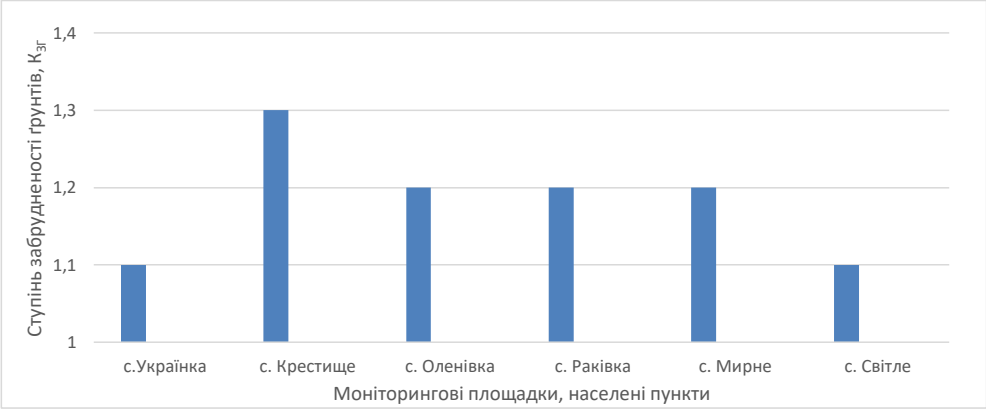


Рис. 3. Результати визначення фітотоксичних властивостей ґрунтів на моніторингових площадках Берестинського району Харківської області, які відібрані в червні 2025 року

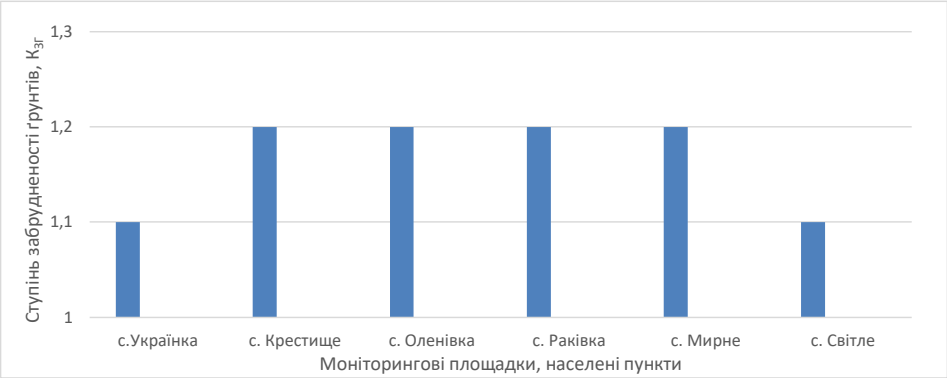


Рис. 4. Результати визначення фітотоксичних властивостей ґрунтів на моніторингових площадках Берестинського району Харківської області, які відібрані в жовтні 2025 року

незначне або слабке забруднення ґрунтів. Водночас у межах с. Крестище спостерігається збереження підвищеної токсичності, що пояснюється техногенним навантаженням від нафтовидобувних і газових підприємств і накопиченням вуглеводневих сполук у верхніх горизонтах ґрунту.

Отримані результати підтверджують здатність ґрунтів регіону до самоочищення, біологічної регенерації та екологічної стабілізації, особливо в літньо-осінній період. Використання методу біотестування продемонструвало свою ефективність як інструмент комплексної оцінки фактичної токсичності ґрунтів, що дає змогу враховувати інтегральний вплив сумішей забруднювачів. Це підкреслює доцільність упровадження системного екологічного моніторингу для своєчасного виявлення тенденцій деградації та підвищення екологічної безпеки агроекосистем.

Порівняльний аналіз із результатами інших вітчизняних і зарубіжних досліджень показує, що отримані закономірності відповідають загальним тенденціям для помірного кліматичного поясу. Так, за даними досліджень у Полтавській, Чернігівській і Сумській областях, сезонні коливання токсичності мають подібний характер: підвищення навесні, часткове відновлення влітку й стабілізація восени (Тригуб і Домусчи, 2020). Аналогічні результати наведено в роботах польських екологів, які також відзначають ключову роль біотичних процесів у детоксикації органічних забруднювачів і здатність ґрунтів до природної регенерації (Musilová et al., 2021). Це свідчить, що спостережені в дослідженні процеси мають універсальний екологічний характер і відображають загальні закономірності функціонування ґрунтових систем у посттехногенних регіонах.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання даних біотестування для екологічного нормування, моніторингу стану земельних ресурсів і планування рекультиваційних заходів у районах, що зазнали техногенного чи військового впливу (Heise et al., 2020). Отримані висновки можуть стати науковим підґрунтям для розроблення регіональних програм екологічного моніторингу, спрямованих на збереження родючості ґрунтів, підвищення екологічної безпеки й забезпечення сталого функціонування агроекосистем у довгостроковій перспективі.

Висновки

Загалом результати досліджень свідчать, що стан і токсичні властивості ґрунтів мають динамічний характер, який визначається поєднанням сезонних природних чинників, рівнем антропогенного навантаження та локальними техногенними впливами. Зміна температурного режиму, вологості, біологічної активності й інтенсивності агротехнічних робіт протягом року безпосередньо впливає на процеси акумуляції, трансформації та детоксикації хімічних сполук у ґрунтовому середовищі. Навесні домінують процеси мобілізації токсичних речовин, улітку – їх біохімічна трансформація й часткове знешкодження, а восени – стабілізація ґрунтової системи та формування умов для природного відновлення. Отримані результати підтверджують, що за сприятливих природно-кліматичних умов і дотримання раціональних агротехнічних заходів ґрунти здатні до самоочищення, біологічної регенерації та поступового зниження токсичного навантаження. Це особливо важливо для територій, які зазнали впливу техногенних або військових чинників, оскільки демонструє потенціал екологічної стійкості й відно-

вної здатності агроландшафтів. Разом із тим результати дослідження підкреслюють необхідність системного моніторингу фітотоксичності ґрунтів, застосування біотестування як надійного індикатора їх екологічного стану та розроблення довгострокових стратегій управління родючістю, спрямованих на мінімізацію ризиків накопичення токсичних речовин і забезпечення сталого розвитку агроекосистем.

Список використаної літератури

Кривицька І.А. Діагностика та моніторинг забруднення ґрунтів важкими металами в урбанізованих ландшафтах Приазов'я : дис. … канд. біол. наук : 03.00.18. Харків, 2020. 187 с.

Тригуб В.І., Домусчи С.В. Біотестування як метод дослідження токсичності ґрунтів. *Вісник Одеського національного університету. Серія «Географічні та геологічні науки».* 2020. Вип. 25(2(37). С. 112–127. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2(37).216565.

Alimba C.G., Gandhi D., Sivanesan S., Bhanarkar M.D., Naoghare P.K., Bakare A.A., Krishnamurthi K. Chemical characterization of simulated landfill soil leachates from Nigeria and India and their cytotoxicity and DNA damage inductions on three human cell lines. *Chemosphere.* 2016. Vol. 164. P. 469–479. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.093.

Arellano P., Tansey K., Balzter H., Boyd D.S. Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environ. Pollut.* 2015. Vol. 205. P. 225–239. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.05.041.

Baderna D., Colombo A., Romeo M., Cambria F., Teoldi F., Lodi M., Diomede L., Benfenati E. Soil quality in the Lomellina area using in vitro models and ecotoxicological assays. *Environ. Res.* 2014. Vol. 133. P. 220–231. https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.030.

Heise S., Babut M., Casado C. Ecotoxicological testing of sediments and dredged material: an overlooked opportunity? *J Soils Sediments.* 2020. Vol. 20. P. 4218–4228. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02798-7.

Husejnovic M.S., Bergant M., Jankovic S., Zizek S., Smajlovic A., Softic A., Music O., Antonijevic B. Assessment of Pb, Cd and Hg soil contamination and its potential to cause cytotoxic and genotoxic effects in human cell lines (CaCo-2 and HaCaT). *Environ. Geochem. Health.* 2018. Vol. 40. P. 1557–1572. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0071-6.

Li X., Wang M., Jiang R., Zheng L., Chen W. Evaluation of joint toxicity of heavy metals and herbicide mixtures in soils to earthworms (Eisenia fetida). *J. Environ. Sci. (China).* 2020. Vol. 94. P. 137–146. https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.055.

Loureiro S., Santos C., Pinto G., Costa A., Monteiro M., Nogueira A.J.A., Soares A.M.V.M. Toxicity assessment of two soils from Jales mine (Portugal) using plants: growth and biochemical parameters. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2006. Vol. 50. P. 182–190. https://doi.org/182-190. 10.1007/s00244-004-0261-3.

Massa N., Cesaro P., Todeschini V., Bona E., Cantamessa S., Berta G. Evaluation of soil toxicity using different biotests on Pisum sativum: a case study. *Plant Biosyst. An Int. J. Deal. with all Asp. Plant Biol.* 2018. Vol. 152. P. 1191–1198. https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1435570.

Musilová J., Harangozo L., Lidiková J., Franková H. Hygienic quality of soil in the Gemer region (Slovakia) and ecological risk assessment. *Scientific Reports.* 2021. Vol. 11. P. 13639. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93587-w.

Okereafor U., Makhatha M., Mekuto L., Uche-Okereafor N., Sebola T., Mavumengwana V. Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health.* 2020. Vol. 17. P. 2204. https://doi.org/10.3390/ijerph17072204.

Pinto M., Costa P.M., Louro H., Costa M.H., Lavinha J., Caeiro S., Silva M.J. Determining oxidative and non-oxidative genotoxic effects driven by estuarine sediment contaminants on a human hepatoma cell line. *Sci. Total Environ.* 2014. Vol. 478. P. 25–35. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.084.

Resende A.P.O., Santos V.S.V., Campos C.F., de Morais C.R., de Campos Júnior E.O., de Oliveira A.M.M., Pereira B.B. Ecotoxicological risk assessment of contaminated soil from a complex of ceramic industries using earthworm Eisenia fetida. *J. Toxicol. Environ. Health Part A Curr. Issues.* 2018. Vol. 81. P. 1058–1065. https://doi.org/10.1080/15287394.2018.1528572.

Swati A., Ghosh P., Thakur I.S. An integrated approach to study the risk from landfill soil of Delhi: chemical analyses, in vitro assays and human risk assessment. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2017. Vol. 143. P. 120–128. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.019.

Szopka K., Gruss I., Gruszka D., Karczewska A.., Gediga K, Gałka B., Dradrach A. The Effects of forest litter and water logging on the ecotoxicity of soils strongly enriched in arsenic in a historical mining site. *Forests.* 2021. Vol. 12. P. 355. https://doi.org/10.3390/f12030355.

Vogel H.J., Eberhardt E., Franko U., Lang B., Ließ M., Weller U., Wiesmeier M., Wollschläger U. Quantitative evaluation of soil functions: potential and state. *Front. Environ. Sci.* 2019. Vol. 7. P. 164. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164.

References

Kryvytska, I.A. (2020). Diahnostyka ta monitorynh zabrudnennia gruntiv vazhkymy metalamy v urbanizovanykh landshaftakh Pryazovia [Diagnosis and monitoring of soil pollution by heavy metals in urbanized landscapes of the Azov region]: dys. … kand. biol. nauk : 03.00.18. Kharkiv, 187 p. [in Ukrainian].

Trygub, V.I., & Domuschy, S.V. (2020). Biotestuvannya yak metod doslidzhennya toksychnosti gruntiv. [Biotesting as a method for studying soil toxicity] *Visnyk ONU. Series: Heohrafichni i heolohichni nauky [Bulletin of Odessa National University. Geographical and Geological Sciences],* 25(2(37)), 112–125. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2(37).216565 [in Ukrainian].

Alimba, C.G., Gandhi, D., Sivanesan, S., Bhanarkar, M.D., Naoghare, P.K., Bakare, A.A., Krishnamurthi, K. (2016). Chemical characterization of simulated landfill soil leachates from Nigeria and India and their cytotoxicity and DNA damage inductions on three human cell lines. *Chemosphere,* 164, 469–479. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.093 [in English].

Arellano, P., Tansey, K., Balzter, H., Boyd, D.S. (2015). Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environ. Pollut.,* 205, 225–239. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.05.041 [in English].

Baderna, D., Colombo, A., Romeo, M., Cambria, F., Teoldi, F., Lodi, M., Diomede, L., Benfenati, E. (2014). Soil quality in the Lomellina area using in vitro models and ecotoxicological assays. *Environ. Res.,* 133, 220–231. https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.030 [in English].

Heise, S., Babut, M., Casado, C. (2020). Ecotoxicological testing of sediments and dredged material: an overlooked opportunity? *J Soils Sediments,* 20, 4218–4228. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02798-7 [in English].

Husejnovic, M.S., Bergant, M., Jankovic, S., Zizek, S., Smajlovic, A., Softic, A., Music, O., Antonijevic, B. (2018). Assessment of Pb, Cd and Hg soil contamination and its potential to cause cytotoxic and genotoxic effects in human cell lines (CaCo-2 and HaCaT). *Environ. Geochem. Health,* 40, 1557–1572. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0071-6 [in English].

Li, X., Wang, M., Jiang, R., Zheng, L., Chen, W. (2020). Evaluation of joint toxicity of heavy metals and herbicide mixtures in soils to earthworms (Eisenia fetida). *J. Environ. Sci. (China),* 94, 137–146. https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.055 [in English].

Loureiro, S., Santos, C., Pinto, G., Costa, A., Monteiro, M., Nogueira, A.J.A., Soares, A.M.V.M. (2006). Toxicity assessment of two soils from Jales mine (Portugal) using plants: growth and biochemical parameters. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.,* 50, 182–190. https://doi.org/182-190.10.1007/s00244-004-0261-3 [in English].

Massa, N., Cesaro, P., Todeschini, V., Bona, E., Cantamessa, S., Berta, G. (2018). Evaluation of soil toxicity using different biotests on Pisum sativum: a case study. *Plant Biosyst. An Int. J. Deal. with all Asp. Plant Biol.,* 152, 1191–1198. https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1435570 [in English].

Musilová, J., Harangozo, L., Lidiková, J., Franková, H. (2021). Hygienic quality of soil in the Gemer region (Slovakia) and ecological risk assessment. *Scientific Reports,* 11, 13639. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93587-w [in English].

Okereafor, U., Makhatha, M., Mekuto, L., Uche-Okereafor, N., Sebola, T., Mavumengwana, V. (2020). Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health,* 17, 2204. https://doi.org/10.3390/ijerph17072204 [in English].

Pinto, M., Costa, P.M., Louro, H., Costa, M.H., Lavinha, J., Caeiro, S., Silva, M.J. (2014). Determining oxidative and non-oxidative genotoxic effects driven by estuarine sediment contaminants on a human hepatoma cell line. *Sci. Total Environ.,* 478, 25–35. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.084 [in English].

Resende, A.P.O., Santos, V.S.V., Campos, C.F., de Morais, C.R., de Campos Júnior, E.O., de Oliveira, A.M.M., Pereira, B.B. (2018). Ecotoxicological risk assessment of contaminated soil from

a complex of ceramic industries using earthworm Eisenia fetida. *J. Toxicol. Environ. Health Part A Curr. Issues*, 81, 1058–1065. https://doi.org/10.1080/15287394.2018.1528572 [in English].

Swati, A., Ghosh, P., Thakur, I.S. (2017). An integrated approach to study the risk from landfill soil of Delhi: chemical analyses, in vitro assays and human risk assessment. *Ecotoxicol. Environ. Saf.,* 143, 120–128. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.019 [in English].

Szopka, K., Gruss, I., Gruszka, D., Karczewska, A., Gediga, K, Gałka, B., Dradrach, A. (2021). The Effects of forest litter and water logging on the ecotoxicity of soils strongly enriched in arsenic in a historical mining site. *Forests,* 12, 355. https://doi.org/10.3390/f12030355 [in English].

Vogel, H.J., Eberhardt, E., Franko, U., Lang, B., Ließ, M., Weller, U., Wiesmeier, M., Wollschläger, U. (2019). Quantitative evaluation of soil functions: potential and state. *Front. Environ. Sci.,* 7, 164. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164 [in English].

Отримано: 28.10.2025
Прийнято: 02.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 631/635:631.95
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.32

ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ УТИЛІЗАЦІЇ СТІЧНОЇ ВОДИ ТВАРИННИЦТВА

В. О. Пінчук[1], Ю. В. Подоба[2], О. В. Тертична[3]

Упродовж останніх років в Україні спостерігається позитивна динаміка розвитку тваринництва промислового типу, що підвищує локальне антропогенне навантаження на навколишнє природне середовище. У районах розташування крупних тваринницьких підприємств джерелом локального забруднення довкілля є не лише гній, а й стічна вода в щорічній загальній кількості впродовж 1990–2023 років – 28,7–270,1 мільйона м^3. До складу стоків входять гній і сеча тварин, залишки корму, механічні домішки й вода. На основі цієї сировини доцільно виробляти якісні органічні добрива та біопаливо, водночас знешкоджувати й очищати стічні води. Встановлено, що у складі стічної води впродовж 1990–2023 років щорічно скидалося 618,2–7 342,5 тисячі тонн органічної речовини, вміст якої найвищий у стоках скотарства – 477,1 тисячі т/рік, свинарства – 135,3 тисячі т/рік (2023 рік). Серед досліджених систем поводження з побічною продукцією тваринного походження в Україні біологічна обробка (компостування і анаеробні лагуни) за кількістю гною становлять 922,8 тисячі т/рік, або 1,8%. Частка викидів метану від систем біологічної обробки гною становить 4,73 тисячі т/рік, або 14% від загальних викидів (2023 рік). Показано перспективність дослідження локального впливу стічної води тваринницьких підприємств на довкілля за використання супутникового агроекологічного моніторингу. Аналізом світових тенденцій виділено основні технологічні підходи переробки побічної продукції тваринного і рослинного походження. У світі відмічається поступовий рух до усвідомлення того, що будь-які побічні продукти сільського господарства, навіть такі, що раніше вважалися непридатними для подальшого використання, є сировиною для отримання добрив, поживних субстратів, біопалива й біогенних елементів. Спрямування процесів до збільшення кількості поживних речовин в осаді з одночасним підвищенням ефективності біологічних процесів очищення стоків дозволить збільшити біологічну

1 кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник,
завідувач лабораторії екології тваринництва
(Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ)
e-mail: pinchuk_vo@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0646-1580
2 кандидат сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник лабораторії екології тваринництва
(Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ)
e-mail: yurpo@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1000-7946
3 доктор біологічних наук, професор,
провідний науковий співробітник лабораторії екології тваринництва
(Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ;
Інститут сільськогосподарської мікробіології та аграрного виробництва НААН, м. Чернігів)
e-mail: olyater@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9514-2858

іммобілізацію розчинених органічних і мінеральних компонентів з метою переведення їх у тверду фракцію, придатну для відокремлення від рідини й подальшого гранулювання.

Ключові слова: *тваринництво, побічна продукція, стічна вода, органічна речовина, добриво, викиди.*

ENVIRONMENTAL PERSPECTIVES FOR UTILIZATION OF LIVESTOCK WASTEWATER

V. O. Pinchuk, Yu. V. Podoba, O. V. Tertychna

In recent years, Ukraine has seen positive dynamics in the development of industrial livestock, which increases the local anthropogenic load on the environment. In areas where large livestock enterprises are located, the source of local environmental pollution is not only manure, but also wastewater in an annual total amount of 28,7–270,1 million m^3 during 1990–2023. The wastewater includes animal manure and urine, feed residues, mechanical impurities and water. Based on these raw materials, it is advisable to produce high-quality organic fertilizers and biofuels, neutralizing and purifying wastewater. It was found that 618,2–7 342,5 thous. tons of organic matter were discharged annually as part of wastewater during 1990–2023, the content of which is highest in cattle breeding wastewater – 477,1 thous. tons/year and pig farming – 135,3 thous. tons/year. Among the studied systems for handling animal by-products in Ukraine, biological treatment (composting and anaerobic lagoons) account for 922,8 thous. tons/year or 1,8% of manure in terms of volume. The share of methane emissions from biological manure treatment systems is 4,73 thous. tons/year or 14% of total emissions (2023). The potential of studying the local impact of wastewater from livestock enterprises on the environment using satellite agroecological monitoring is shown. Analysis of global trends has highlighted the main technological approaches to processing by-products of animal and plant origin. There is a gradual movement in the world towards the realization that any by-products of agriculture, even those previously considered unsuitable for further use, are raw materials for obtaining fertilizers, nutrient substrates, biofuels and biogenic elements. The direction of processes to increase the amount of nutrients in the sediment with a simultaneous increase in the efficiency of biological wastewater treatment processes will increase the biological immobilization of dissolved nutrients in order to convert them into a solid fraction suitable for separation from the liquid and subsequent granulation.

Key words: *livestock, by-products, wastewater, organic matter, fertilizer, emissions.*

Вступ

Одним із засобів підвищення кругообігу поживних речовин у циркуляційній біоекономіці є поєднання наукових, технологічних і комерційних шляхів щодо продовження ланцюга використання (валоризації) наявних біоресурсів (Kundu et al., 2022) і прагнення до завершеності циклів переробляння відходів “close loop” (Brandao et al., 2021), науково-технічною основою яких є розроблення раціональних технологій поводження з побічною продукцією сільськогосподарських і харчових підприємств. Як мінімум половина хімічних елементів кормів виділяється тваринами із гноєм і сечею (Практикум …, 2015). Якщо хімічні елементи гною після компостування переважно повертаються розкидачами на поля, то з рідкими стоками процес рециркуляції ускладнений унаслідок неможливості швидкої утилізації, переробляння і зберігання великих об’ємів стічної води.

На великих тваринницьких фермах прибирання гною часто проводять змиванням водою, тому до складу таких стоків входять гній і сеча тварин, залишки корму, механічні домішки й вода. На основі цієї сировини можна виробляти якісні органічні добрива та біопаливо, водночас знешкоджувати й очищати стічні води. За даними (Williams et al., 2016; Tang et al., 2019), стічна вода з підприємств тваринництва містить неперетравлені поживні речовини й метаболіти тварин у розчиненому або зваженому стані. Світові дослідження останніх років акцентують увагу на загальній сукупності розчинених органічних речовин (DOM – dissolved organic matter) у рідких стоках. Дослідженнями впливу на природні водні екосистеми (Qi et al., 2023) встановлено, що рідкі стоки тваринництва мають вищу біологічну активність порівняно з іншими стоками агровиробництва, отже, більший вплив на природні біологічні об’єкти. Тому у світі розробляються нові та вдосконалюються різні методи (Grell et al., 2023) відокремлення розчинених поживних речовин від стічної води тваринни-

цтва, які основані на класичних підходах очищення (механічне, фізичне, хімічне, біологічне) побутових і промислових стічних вод. Очищення промислових стічних вод від забруднень органічними сполуками на тваринницьких підприємствах ефективне за використання біологічного очищення в аеротенках (Ребрикова та ін., 2018).

В Україні нині немає єдиної уніфікованої технології поводження зі стоками тваринницьких комплексів. Поширеними є технології аеробного очищення стоків з утворенням мулу й води. Іншим способом біологічного очищення і знезараження стоків є анаеробне метанове бродіння, у результаті якого в біогазових установках утворюється рідкий дігестат. У зв'язку із тим, що призначення цих технологій – очищення стоків або отримання біогазу, – органічні залишки фактично є побічною продукцією, яку необхідно утилізувати або використовувати в подальшій переробці. Для розроблення оптимальних систем поводження з побічною продукцією тваринництва насамперед необхідний аналіз сучасних обсягів стоків та їх просторової локалізації для визначення впливу стічної води агропідприємств на довкілля, розрахунок кількості виділення гною у промисловому тваринництві й встановлення концентрації органічних речовин у стічній воді. Тому метою цих досліджень є визначення органічних залишків у процесі виробництва продукції тваринництва, екологічна оцінка поводження і пошук шляхів раціонального використання поживних речовин стоків.

Матеріал і методи

Для розрахунку об'єму стічних вод у тваринницьких господарствах використовували норми витрат виробничої води в системах видалення гною із тваринницьких приміщень і для миття годівниць з Відомчих норм технологічного проєктування підприємств тваринництва та Державних будівельних норм України.

Кількість гною від сільськогосподарських тварин визначали на основі виділення нітрогену тваринами різних статево-вікових груп, поголів'я тварин і хімічного складу гною. Для визначення хімічного складу гною використовували науково-методичні рекомендації (Виробництво …, 2009).

Розрахунок кількості виділення нітрогену й викидів метану (CH_4) за системами видалення, зберігання та використання гною проводили згідно із загальноприйнятими міжнародними методичними підходами (IPCC …, 2006; Ukraine's …, 2023).

Коефіцієнти вмісту органічної речовини у гнойових стоках скотарства і свиноферм брали з літературних джерел (Біотехнологія …, 2015).

Вміст органічної речовини у стічних водах птахофабрик розраховували на основі показника $БПК_5$ (кількість кисню в мг, потрібна для окиснення органічних речовин, що містяться в 1 л води, аеробними бактеріями до CO_2 і H_2O впродовж 5 діб без доступу повітря і світла) за алгоритмом:

$$ОР = \left(\frac{12}{32 \times 0{,}7}\right) \times БПК_5, \qquad (1)$$

де: ОР – вміст органічної речовини у стічній воді, мг/л;

$БПК_5$ – біологічна потреба кисню, мг O_2/л;

12 – молекулярна маса вуглецю в молекулі CO_2;

32 – молекулярна маса O_2 в молекулі CO_2;

0,7 – коефіцієнт кількості окислювальної речовини за 5 діб.

Показник $БПК_5$ у стічній воді птахофабрики визначали лабораторним шляхом.

Вихідні дані для розрахунків кількості органічної речовини у стоках тваринництва брали з електронного ресурсу Державної служби статистики України (http://www.ukrstat.gov.ua) станом на 5 травня 2024 р. Дослідження проводилися на рівні тваринницьких підприємств різної спеціалізації.

Розрахунки й побудова картограм проводилися в середовищі програми "MS Excel 2021".

Результати

Станом на 1 січня 2023 р. 30,5% поголів'я свиней і 42,7% птиці утримуються на промислових фермах з поголів'ям у тисячі, сотні тисяч або млн голів. Упродовж 2008–2022 рр. відбувається зменшення загальної кількості свинарських і птахівничих промислових господарств, водночас зростає поголів'я тварин у цих господарствах. Наприклад, якщо у 2008 р. були господарства з поголів'я свиней більше 3 000 гол., то із 2015 р. з'явилися господарства з поголів'я свиней більше 10 000 гол., у птахівництві із 2018 р. з'явилися господарства з поголів'ям більше 50 тис. голів птиці, тобто з року в рік зростає локальне антропогенне навантаження на навколишнє природне середовище від тваринницьких господарств. Визначення кількості органічної речовини у стоках тваринницьких господарств різних напрямів виробництва нерозривно пов'язано з оцінкою загальних витрат води, кількістю виділеного гною і стічної води (Пінчук та ін., 2025).

Унаслідок проведення технологічних операцій, як-от промивання каналів системи видалення гною із тваринницьких приміщень, миття годівниць і прибирання приміщень, до складу стоків можуть входити гній і сеча тварин, залишки корму, механічні домішки й вода, тому розраховано кількість виділеного гною від сільськогосподарських тварин різних видів усіх категорій господарств України впродовж 1990–2023 рр., що становило 54,1–266,6 млн т/рік (рис. 1).

Нині найбільше гною (посліду) виділяється у скотарстві – 69%, свинарстві – 25%, птахівництві – 6% від загальної кількості. За категоріями господарств найбільше гною утворюється в сільськогосподарських підприємствах – 54%, фермерських господарствах – 40%, господарствах населення – 6% (рис. 2).

За адміністративними областями найбільше гною виділяється в Полтавській (4,59 млн т/рік), Хмельницькій (4,50 млн т/рік) і Київській (4,31 млн т/рік) областях. Найменше – у Запорізькій (0,27 млн т/рік), Миколаївській (1,04 млн т/рік) і Чернівецькій (1,21 млн т/рік) (рис. 3).

Відмінності в адміністративних областях за кількістю виділення гною пов'язані з різною локалізацією сільгосппідприємств, фермерських господарств і господарств населення залежно від їхньої спеціалізації, що необхідно враховувати у плануванні повернення органічної речовини у ґрунт і оцінюванні рівня локального антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище. У районах розташування крупних тваринницьких підприємств джерелом локального забруднення довкілля є не тільки гній, а й стічна вода, у щорічній загальній кількості впродовж 1990–2023 рр. 28,7–270,1 млн м^3.

Окрім того, на рівень антропогенного забруднення і втрат поживних речовин гною впливає використання тієї чи іншої системи видалення, зберігання та використання гною сільськогосподарських тварин у різних категоріях господарств. Згідно з Національним кадастром антропогенних викидів із джерел і абсорбції поглиначами парникових газів (Ukraine's …, 2023), в Україні розповсюджено 6 систем видалення, зберігання та використання гною сільськогосподарських тварин по всіх категоріях господарств (табл. 1).

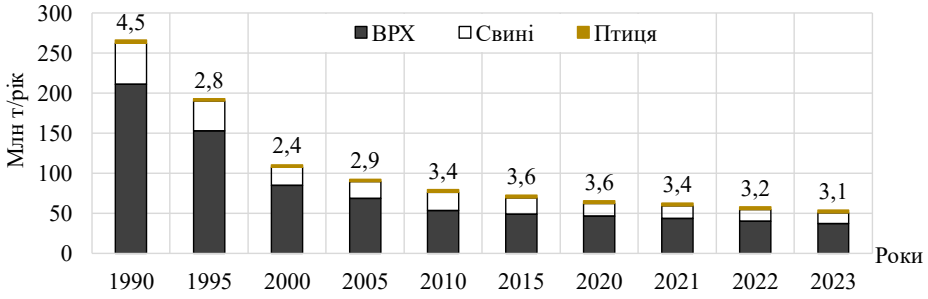


Рис. 1. Динаміка виділення гною від сільськогосподарських тварин різних видів усіх категорій господарств України (1990–2023 рр.)

Джерело: сформовано автором

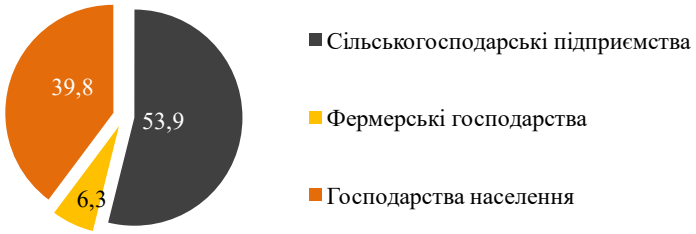


Рис. 2. Відносна кількість виділення гною від сільськогосподарських тварин різних видів за категоріями господарств в Україні (2023 р.), %

Джерело: сформовано автором

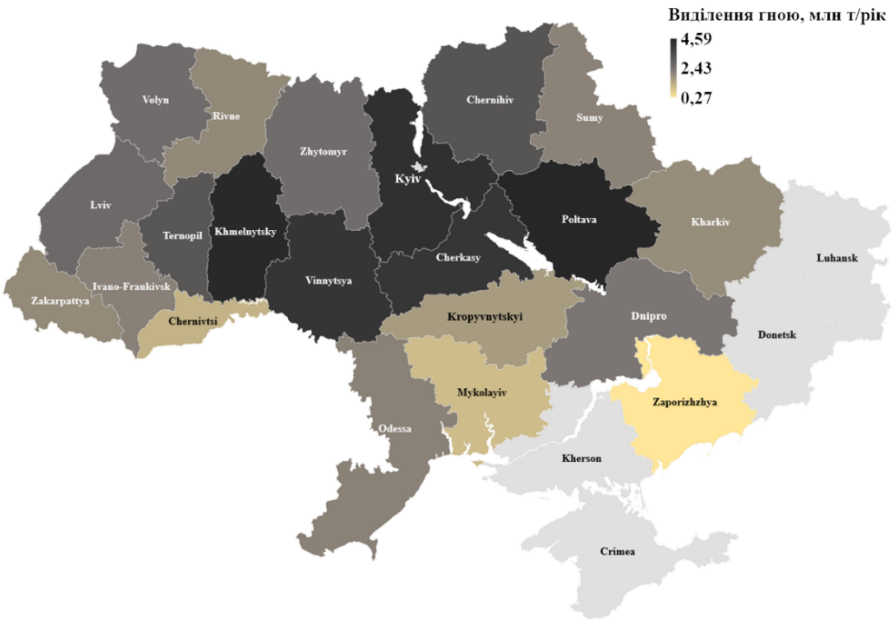


Рис. 3. Виділення гною від с.-г. тварин різних видів усіх категорій господарств за адміністративними областями України (2023 р.)

Джерело: сформовано автором

Таблиця 1

Виділення гною від с.-г. тварин різних видів усіх категорій господарств України за системами видалення, зберігання та використання гною (2023 р.)

Вид тварин	**Кількість виділеного гною за системами видалення, зберігання та використання гною, тис. т**					
	рідкий гній	**тверде зберігання**	**пасовище/ загін**	**анаеробні лагуни**	**послід без підстилки**	**компостування**
ВРХ	1 270,0	17 650,5	18 036,0	–	–	385,5
Свині	4 244,6	8 885,3	–	405,8	–	129,9
Птиця	–	–	719,3	–	2 349,3	1,6
Усього	**5 514,6**	**26 535,7**	**18 755,3**	**405,8**	**2 349,3**	**517,0**

Джерело: сформовано автором

Переважна кількість гною (посліду) сільськогосподарських тварин нині зберігається у твердому вигляді (49%) та на пасовищі (35%), інші системи становлять 16%. Системи біологічної обробки гною (компостування і анаеробні лагуни) за кількістю гною становлять лише 1,8%.

За літературними та лабораторними даними, стічні води підприємств тваринництва у своєму складі містять 0,15–3,00% органічної речовини, яку треба осадити й повернути у ґрунт у формі органічного добрива, а зворотну воду використовувати на виробничі потреби. Визначено кількість органічної речовини стоків у тваринництві України різних напрямів виробництва (рис. 4).

Встановлено, що впродовж 1990–2023 рр. сільськогосподарськими підприємствами тваринництва у складі стічної води щорічно скидалося 618,2–7 342,5 тис. т органічної речовини, якої найбільше у стоках скотарства (2023 р.) – 77,2%, свинарства – 21,9%.

За адміністративними областями найбільше органічної речовини стоків у Полтавській (73,3 тис. т/рік), Київській (66,3 тис. т/рік) і Черкаській (62,3 тис. т/рік) областях. Найменше – у Закарпатській і Запорізькій (2,4 тис. т/рік), Чернівецькій (4,1 тис. т/рік) і Миколаївській (9,2 тис. т/рік) областях (рис. 5).

Біологічна обробка дозволяє ефективно осадити органічну речовину стічних вод, але водночас із тривалим зберіганням

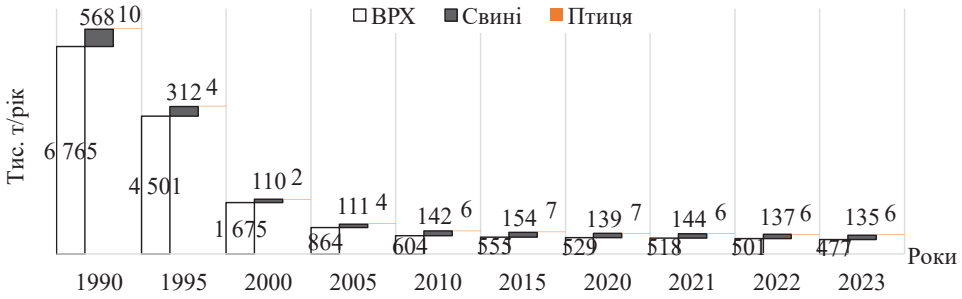


Рис. 4. Кількість органічної речовини стоків у тваринництві різних напрямів виробництва (1990–2023 рр.)

Джерело: сформовано автором

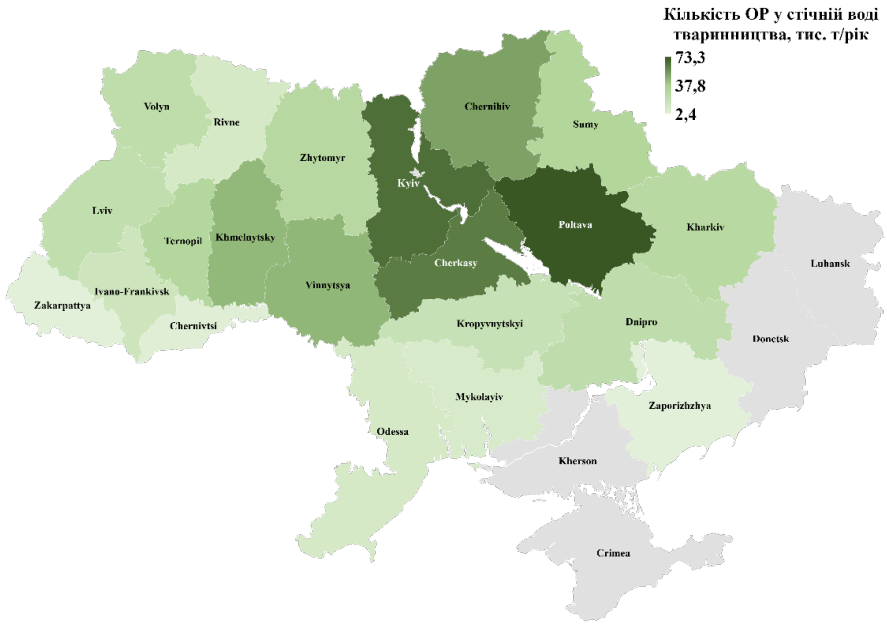


Рис. 5. Загальна кількість органічної речовини (ОР) стоків у тваринництві за адміністративними областями України (2023 р.)

Джерело: сформовано автором

гною, що є основним джерелом викидів CH_4. Розраховано викиди CH_4 залежно від систем видалення, зберігання та використання гною сільськогосподарських тварин в Україні всіх категорій господарств (рис. 6).

Встановлено, що впродовж 1990–2023 рр. від усіх систем видалення, зберігання та використання гною викидалося 33,2–137,4 тис. т CH_4/рік. Частка викидів CH_4 від біологічної обробки гною нині становить 14% від загальної кількості викидів.

Обговорення

Усебічна механізація в сільському господарстві створює передумови для глобалізації сучасного агросектору, локальної концентрації господарської діяльності та створення потужних агропідприємств з переробки. Для таких товаровиробників продукція рослинництва є сировиною, а побічною продукцією є органічна речовина у твердій або рідкій формі, яка не придатна для використання на кормові цілі. Цими підприємствами в секторі тваринництва переважно є комплекси з утримання тварин, біогазові станції, цехи з переробки й пакування тваринницької продукції. Кожне з них виробляє і нагромаджує органічні речовини, як-от гній ВРХ і свиней, пташиний послід, дігестат біогазових станцій, осад стічних вод. Якщо розглядати площу території

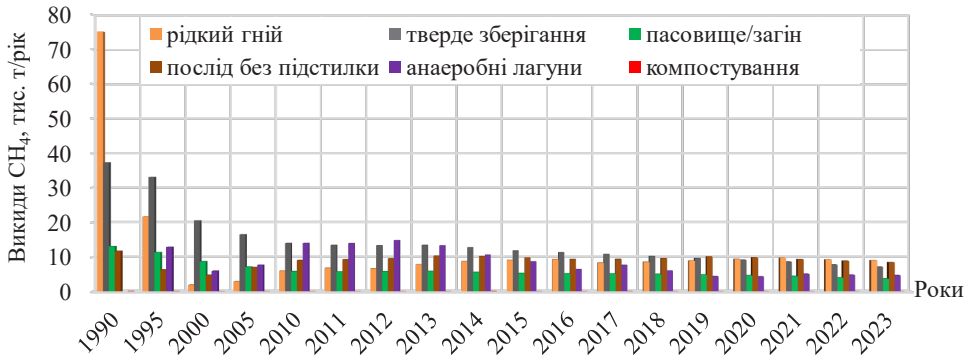


Рис. 6. Викиди CH_4 за системами видалення, зберігання та використання гною сільськогосподарських тварин усіх категорій господарств (1990–2023 рр.)

Джерело: сформовано автором

в кілька сотень км^2 (орієнтовно 1 територіальна громада), то на цій території можуть працювати декілька таких підприємств: ферма ВРХ, свиноферма, птахофабрика й інші джерела рідких органічних речовин.

Дисбаланс у рециркуляції органічних речовин призводить до мінералізації гумусу ґрунтів (Пінчук і Подоба, 2023), з іншого боку, зростання потужностей виробництва тваринницьких підприємств, які мають побічну продукцію, призводить до локального збільшення концентрації органічних і мінеральних речовин навколо таких місць (Подоба та ін., 2023).

Для запобігання територіально обмеженому накопиченню відходів і створення передумов для можливості транспортування і розосередження перероблених речовин на площі, що не обмежується радіусом у кілька кілометрів, необхідне вдосконалення способів поводження з органічними речовинами, що є побічними продуктами перероблляння рослинної сировини, і розроблення технологій переробки побічних продуктів тваринництва, які підвищують логістику та технологічність органічних добрив.

Адаптація існуючих технологій біологічного очищення стоків для отримання гранульованих органічних добрив із твердої фракції очистки органічних стоків різних підприємств тваринництва й харчової промисловості є багатовекторним завданням екології (Біотехнологія …, 2015). Біологічні технології дозволяють отримувати компоненти добрив з різної побічної органічної сировини, підвищувати кругообіг поживних речовин через підвищення технологічності отриманого органічного субстрату та збільшення площі внесення у ґрунт (Екологічно …, 2023).

Інтерпретацією безкисневої біологічної переробки й знезараження стоків є анаеробне метанове зброджування, у результаті якого з органічних речовин у біогазових установках метаногенами синтезується метан і, як побічний продукт, залишається суміш води й мулу – рідкий дігестат. Внесення рідкого дігестату у ґрунт потребує спеціальних машин і територіально обмежене радіусом у кілька кілометрів від біогазової установки. Для внесення відстояної стічної води або рідкого дігестату у ґрунт існують обмежені технічні можливості. Аплікатори для внесення органічних добрив ін'єкційного типу, а також сівалки з обладнанням для припосівного внесення рідких добрив обладнано фільтрами тонкої очистки, які не здатні вносити воду з домішками мулу чи іншими твердими частками. Для підвищення технологічних якостей органічної сировини розробляються різні технології, які дозволяють відокремлювати поживні речовини із залишків анаеробного бродіння, досліджуються ефективний рівень концентрації поживних речовин, вартість технологій та їхня ефективність (Скляр і Скляр, 2015).

Альтернативний шлях використання органічних речовин стоків – це переробка й трансформація розчинених поживних елементів завдяки діяльності мікроорганізмів за аеробних умов в аеротенках (SBR-реакторах), що використовують для очищення стічних вод тваринництва (Біотехнологія …, 2015). Критеріями й очікуваними ефектами біологічного очищення варто вважати мінералізацію органічної речовини, зменшення вмісту та зміну складу завислих речовин, зміну фізичних властивостей стічних вод (запах, забарвлення, прозорість). SBR-реактори або станції аерації

призначені для біологічної очистки стічних вод за допомогою активного мулу. Бактерії у процесі життєдіяльності збільшують свою біомасу, що приводить до утворення осаду аеробного мікробіологічного розкладу органічної речовини. У результаті утворюється дрібнодисперсна органічна речовина, яка осідає на дно ємності у формі органічного мулу. Застосування подальших операцій з видалення цього осаду та його зневоднення створює передумови для отримання твердого органічного добрива.

Технологічно метод біологічного очищення можна реалізувати попереднім підбиранням найбільш ефективних композицій мікроорганізмів, наростивши (іммобілізувавши) їхню біомасу на носії окремо від біореактора, в якому безпосередньо відбувається процес очищення. Коректна робота в аеротенку передбачає періодичну заміну чи очистку носіїв від відпрацьованої мікрофлори (Ребрикова та ін., 2018). Тому одним зі шляхів отримання добрива з осаду стічних вод є адаптація існуючих технологій біологічного очищення стоків для отримання гранульованих органічних добрив із твердої фракції очистки стоків різних підприємств тваринництва.

Очищення стічних вод тваринництва за використання мікроводоростей (Біотехнологія …, 2015) є перспективним способом переробки, коли стоки використовуються як субстрат для вирощування біомаси фотосинтезуючих водоростей. У результаті відбувається глибоке їх очищення, такі стоки набувають статусу сировини для отримання біоенергії. Мікроводорості здатні фіксувати до 9% світлової енергії і трансформувати 513 т CO_2 у 280 т сухої біомаси на 1 га за рік (Sarwer et al., 2022).

Нині існує глобальна тенденція до поступового розширення напрямів і сфер використання відходів тваринництва. Спостерігається рух до усвідомлення того, що побічні продукти сільського господарства, навіть такі, що раніше вважалися непридатними для подальшого використання, є сировиною для отримання поживних речовин (Dadrasnia et al., 2021), або повторного використання очищеної води (Michael-Kordatou et al., 2015). Також інтенсивно розвивається напрям, де стоки тваринництва й харчових підприємств переробки використовуються як поживні субстрати або донори поживних речовин для вирощування біоти нижчих харчових ланок (мікроводоростей, комах, грибів, мікроорганізмів та іншого) з метою отримання енергії, білка, полімерних речовин (Tom et al., 2021; Ruiz-Mercado, 2024). Також цікавий альтернативний напрям використання висушеного осаду як сировини для виробництва біопалива, олій і біовугілля (An et al., 2024). За даними організації “Change Chemistry”, сучасна загальносвітова стратегія у сфері поводження з побічними речовинами різних індустрій передбачає глобальну економіку, де всі хімікати, матеріали та продукти є безпечними та стійкими, від створення до утилізації та повторного використання.

З розвитком супутникових технологій фотографування поверхні активно розвивається напрям дослідження стану агроекосистем за супутниковими даними. Аналіз фотографій надає можливість оцінити об’єкти агроландшафтів, умови вологозабезпечення, визначити стан посівів (Tarariko et al., 2024), що створює передумови адаптації цих методичних підходів для визначення впливу стічної води на довкілля за станом рослинності навколо підприємств.

Отже, на сучасному етапі розвитку промислового тваринництва в Україні перспективними напрямами подальших досліджень є раціоналізація водокористування, зокрема відтворення ресурсів прісної води, упровадження біотехнологій для зниження забруднення природних водоймищ і оптимізація процесу біологічного очищення стоків. Розроблення способів підвищення ефективності біологічних процесів очищення стоків дозволить збільшити мікробіологічне засвоєння розчинених органічних і мінеральних компонентів з метою їх осадження і отримання твердих органічних добрив. Ці дослідження є частиною раціональних технологій, що вдосконалюють способи поводження з побічною продукцією тваринницьких підприємств і розширюють можливості в підвищенні кругообігу поживних речовин. Для дослідження локального впливу стічної води на довкілля вважаємо перспективним інструментом використання супутникового агроекологічного моніторингу підприємств тваринництва.

Висновки

На підставі аналізу світових тенденцій поступового розширення напрямів використання побічної продукції тваринного походження відмічається рух до усвідомлення того, що будь-які побічні продукти сільського господарства, навіть такі, що раніше вважалися непридатними для подальшого використання, є сировиною

для отримання добрив, поживних субстратів, біопалива і біогенних елементів. Встановлено, що впродовж останніх 30 років в Україні спостерігається позитивна динаміка розвитку тваринництва промислового типу, що підвищує локальне антропогенне навантаження на НПС. У районах розташування крупних тваринницьких підприємств джерелом локального забруднення довкілля є не тільки гній, а й стічна вода, у щорічній загальній кількості впродовж 1990–2023 рр. 28,7–270,1 млн м^3. У складі стічної води впродовж 1990–2023 рр. щорічно скидалося 618,2–7 342,5 тис. т органічної речовини, вміст якої найвищий у стоках скотарства – 477,1 тис. т/рік, свинарства – 135,3 тис. т/рік (2023 р.). Серед досліджених систем видалення, зберігання та використання гною в Україні біологічна обробка (компостування і анаеробні лагуни) за кількістю гною становлять 922,8 тис. т/рік, або 1,8%. Частка викидів ПГ – CH_4 від систем біологічної обробки гною становить 4,73 тис. т/рік, або 14% від загальних викидів (2023 р.).

Список використаної літератури

Біотехнологія відходів тваринницьких підприємств : монографія / М.О. Захаренко та ін. Київ : НУБіП України, 2015. 380 с. [Електронний ресурс]. URL: http://repository.vsau.org/getfile.php/19557.pdf (дата звернення 05.09.2025).

Виробництво органічних добрив : науково-методичні рекомендації / Л.В. Войтенко та ін. Київ : НУБіП України, 2009. 45 с. [Електронний ресурс]. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u158/virobnorgdobr_2009.pdf (дата звернення 05.09.2025).

Екологічно безпечні технології переробки побічної продукції тваринного походження з отриманням органічного добрива : науково-методичні рекомендації / В.О. Пінчук та ін. Київ : ДІА, 2023. 50 с.

Пінчук В.О., Подоба Ю.В. Агроекологічна оцінка енергопотенціалу ґрунтів. *Український журнал природничих наук.* 2023. № 6. С. 80–90. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.6.2023.9

Пінчук В.О., Подоба Ю.В., Тертична О.В. Екологічна оцінка утворення і поводження зі стоками у тваринництві. *Агроекологічний журнал.* 2025. № 1. С. 105–116. https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2025.327099

Подоба Ю.В., Пінчук В.О., Тертична О.В., Мінералов О.І., Дешко В.І. Вміст важких металів у дігестаті з побічної продукції птахівництва. *Агроекологічний журнал.* 2023. № 4. С. 65–72. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293755

Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин : навчальний посібник / І.І. Ібатуллін та ін. Київ, 2015. 422 с.

Ребрикова П.А., Шидловська О.А., Жолобак Н.М., Мокроусова О.Р. Біотехнологічні аспекти очищення стічних вод підприємств, що переробляють продукти тваринництва. *Наукові праці Національного університету харчових технологій.* 2018. № 24. Вип. 6. С. 42–49. http://dx.doi.org/10.24263/2225-2924-2018-24-6-7

Скляр О.Г., Скляр Р.В. Аналіз технологій підготовки залишків після анаеробного бродіння. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Механізація сільськогосподарського виробництва.* 2015. Вип. 156. С. 649–655. [Електронний ресурс]. URL: https://repo.btu.kharkov.ua//handle/123456789/28207 (дата звернення 05.09.2025).

An Q., Liu Y., Cao X., Yang P., Cheng L., Ghazani M.S., Suota M.J., Bi X. Microwave catalytic pyrolysis of solid digestate for high quality bio-oil and biochar. *Journal of analytical and applied pyrolysis.* 2024. Vol. 182. P. 106683. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106683

Brandao A., Gonçalves A., Santos J. Circular bioeconomy strategies: From scientific research to commercially viable products. *Journal of Cleaner Production.* 2021. Vol. 295. P. 126407. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126407

Dadrasnia A., Muñoz I., Yáñez E. Sustainable nutrient recovery from animal manure: A review of current best practice technology and the potential for freeze concentration. *Journal of Cleaner Production.* 2021. Vol. 315. P. 128106. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128106

Grell T., Marchuk S., Williams I., McCabe B.K., Tait S. Resource recovery for environmental management of dilute livestock manure using a solid-liquid separation approach. *Journal of Environmental Management.* 2023. Vol. 325. P. 116254. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116254

IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / eds.: Simon Eggelston et al.; Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 2006. [Електронний ресурс]. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html (дата звернення 05.09.2025).

Kundu D., Dutta D., Samanta P., Dey S., Sherpa K., Kumar S., Dubey B. Valorization of wastewater: A paradigm shift towards circular bioeconomy and sustainability. *Science of The Total Environment.* 2022. Vol. 848. P. 157709. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157709

Michael-Kordatou I., Michael C., Duan X. Dissolved effluent organic matter: Characteristics and potential implications in wastewater treatment and reuse applications. *Water Research.* 2015. Vol. 77. P. 213–248. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.03.011

Qi G., Zhang B., Tian B., Yang R., Baker A., Wu P., He S. Characterization of Dissolved Organic Matter from Agricultural and Livestock Effluents: Implications for Water Quality Monitoring. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2023. Vol. 20. Iss. 6. P. 5121. https://doi.org/10.3390/ijerph20065121

Ruiz Mercado G.J. Designing a safer circular economy of chemicals. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2024. Vol. 26. P. 2415–2417. https://doi.org/10.1007/s10098-024-02982-0

Sarwer A., Hamed S., Osman A., Jamil F., Al-Muhtaseb A., Alhajeri N., Rooney D. Algal biomass valorization for biofuel production and carbon sequestration: a review. *Environmental Chemistry Letters.* 2022. Vol. 20. P. 2797–2851. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01458-1

Tang J., Li X., Cao C., Lin M., Qiu Q., Xu Y., Ren Y. Compositional variety of dissolved organic matter and its correlation with water quality in peri-urban and urban river watersheds. *Ecological Indicators.* 2019. Vol. 104. P. 459–469. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.025

Tarariko O.H., Cruse R.M., Ilienko T.V., Kuchma T.L., Kozlova A.O., Andereiev A.A., Yatsiuk V.M., Velychko V.A. Impact of climate changes on agroresources of Ukrainian Polissia based on geospatial data. *Agricultural Science and Practice*. 2024. Vol. 11. № 2. P. 3–29. https://doi.org/10.15407/agrisp11.02.003

Tom A.P., Jayakumar J.S., Biju M., Somarajan J., Ibrahim M.A. Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability : A review. *Energy Nexus.* 2021. Vol. 4. P. 100022. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100022

Ukraine's Greenhouse gas inventory 1990–2021: annual national inventory report for submission under the United Nations framework convention on climate change and the Kyoto protocol / Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, Budget Institution "National Center for GHG Emission Inventory". Kyiv, 2023. 568 p. [Електронний ресурс]. URL: https://unfccc.int/documents/628276 (дата звернення 05.09.2025).

Williams C.J., Frost P.C., Morales-Williams A.M., Larson J.H., Richardson W.B., Chiandet A.S., Xenopoulos M.A. Human activities cause distinct dissolved organic matter composition across freshwater ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* 2016. Vol. 22. Iss. 2. P. 613–626. https://doi.org/10.1111/gcb.13094

References

Zakharenko, M.O. (ed.). (2015). Biotekhnolohiya vidkhodiv tvarynnyts'kykh pidpryyemstv: monohrafiya [Biotechnology of livestock waste: monograph]. Kyiv: Publishing Department of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine [Electronic resource] URL: http://repository.vsau.org/getfile.php/19557.pdf (access date 05.09.2025) [in Ukrainian].

Voitenko, L. (ed.). (2009). Vyrobnytstvo orhanichnykh dobryv. Naukovo-metodychni rekomendatsiyi [Production of organic fertilizers. Scientific-methodical recommendations]. Kyiv: Publishing Department of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine [Electronic resource] URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u158/virobnorgdobr_2009.pdf (access date 05.09.2025) [in Ukrainian].

Pinchuk, V.O. (ed.). (2023). Ekolohichno bezpechni tekhnolohiyi pererobky pobichnoyi produktsiyi tvarynnoho pokhodzhennya z otrymannyam orhanichnoho dobryva. Naukovo-metodychni rekomendatsiyi [Environmentally safe technologies for processing of animal by-products to obtain organic fertilizers. Scientific and methodological recommendations]. Kyiv: DIA [in Ukrainian].

Pinchuk, V.O., & Podoba, Y.V. (2023). Ahroekolohichna otsinka enerhopotentsialu gruntiv [Agroecological assessment of energy potential of soils]. *Ukrayins'kyy zhurnal pryrodnychykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences],* 6, 80–90. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.6.2023.9 [in Ukrainian].

Pinchuk, V.O., Podoba, Y.V., & Tertychna, O.V. (2025). Ekolohichna otsinka utvorennya i povodzhennya zi stokamy u tvarynnytstvi [Environmental assessment of the formation and management

of effluents in livestock]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological Journal],* 1, 105–116. https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2025.327099 [in Ukrainian].

Podoba, Y. (ed.). (2023). Vmist vazhkykh metaliv u dihestati z pobichnoyi produktsiyi ptakhivnytstva [Content of heavy metals in the digestate from poultry by-products]. *Ahroekolohichnyy zhurnal [Agroecological Journal],* 4, 65–72. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293755 [in Ukrainian].

Ibatullin, I.I. (ed.). (2015). Praktykum z hodivli sil'skohospodars'kykh tvaryn: navchal'nyy posibnyk [Workshop on feeding farm animals: a study guide]. Kyiv [in Ukrainian].

Rebrikova, P.A. (ed.). (2018). Biotekhnolohichni aspekty ochyshchennya stichnykh vod pidpryyemstv, shcho pereroblyayut' produkty tvarynnytstva [Biotechnological aspects of wastewater treatment of enterprises processing livestock products]. *Naukovi pratsi NUKHT [Scientific works of the NUCT],* 24(6), 42–49. http://dx.doi.org/10.24263/2225-2924-2018-24-6-7 [in Ukrainian].

Sklyar, O.G., & Sklyar, R.V. (2015). Analiz tekhnolohiy pidhotovky zalyshkiv pislya anaerobnoho brodinnya [Analysis of technologies for preparing residues after anaerobic fermentation]. *Visnyk Kharkivskoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva [Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture],* 156, 649–655. [Electronic resource] URL: https://repo.btu.kharkov.ua//handle/123456789/28207 (access date 05.09.2025) [in Ukrainian].

An, Q. (ed.). (2024). Microwave catalytic pyrolysis of solid digestate for high quality bio-oil and biochar. *Journal of analytical and applied pyrolysis,* 182, 106683. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106683 [in English].

Brandao, A., Gonçalves, A., & Santos, J. (2021). Circular bioeconomy strategies: From scientific research to commercially viable products. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126407. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126407 [in English].

Dadrasnia, A., Muñoz, I., & Yáñez, E. (2021). Sustainable nutrient recovery from animal manure: A review of current best practice technology and the potential for freeze concentration. *Journal of Cleaner Production,* 315, 128106. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128106 [in English].

Grell, T. (ed.). (2023). Resource recovery for environmental management of dilute livestock manure using a solid-liquid separation approach. *Journal of Environmental Management,* 325, 116254. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116254 [in English].

Eggelston, S. (ed.). (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [in English].

Kundu, D. (ed.). (2022). Valorization of wastewater: A paradigm shift towards circular bioeconomy and sustainability. *Science of The Total Environment,* 848, 157709. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157709 [in English].

Michael-Kordatou, I., Michael, C., & Duan, X. (2015). Dissolved effluent organic matter: Characteristics and potential implications in wastewater treatment and reuse applications. *Water Research,* 77, 213–248. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.03.011 [in English].

Qi, G. (ed.). (2023). Characterization of Dissolved Organic Matter from Agricultural and Livestock Effluents: Implications for Water Quality Monitoring. *Int. J. Environ. Res. Public Health,* 20(6), 5121. https://doi.org/10.3390/ijerph20065121 [in English].

Ruiz Mercado, G.J. (2024). Designing a safer circular economy of chemicals. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, 2415–2417. https://doi.org/10.1007/s10098-024-02982-0 [in English].

Sarwer, A. (ed.). (2022). Algal biomass valorization for biofuel production and carbon sequestration: a review. *Environmental Chemistry Letters,* 20, 2797–2851. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01458-1 [in English].

Tang, J. (ed.). (2019). Compositional variety of dissolved organic matter and its correlation with water quality in peri-urban and urban river watersheds. *Ecol. Indic.,* 104, 459–469. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.025 [in English].

Tarariko, O.H. (ed.). (2024). Impact of climate changes on agroresources of Ukrainian Polissia based on geospatial data. *Agricultural Science and Practice*, 11(2), 3–29. https://doi.org/10.15407/agrisp11.02.003 [in English].

Tom, A.P. (ed.). (2021). Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review. *Energy Nexus,* 4, 100022. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100022 [in English].

Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, Budget Institution "National Center for GHG Emission Inventory" (2023). Ukraine's Greenhouse gas inventory 1990–2021: annual national inventory report for submission under the United Nations framework

convention on climate change and the Kyoto protocol. Kyiv [Electronic resource] URL: https://unfccc.int/documents/628276 (access date 05.09.2025) [in English].

Williams, C.J. (ed.). (2016). Human activities cause distinct dissolved organic matter composition across freshwater ecosystems. *Glob. Chang. Biol.,* 22(2), 613–626. https://doi.org/10.1111/gcb.13094 [in English].

Отримано: 26.09.2025
Прийнято: 11.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 579.69:628.353
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.33

НОСІЇ ДЛЯ ІММОБІЛІЗАЦІЇ МІКРОБІОТИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

О. Ф. Рильський[1], Ю. Ю. Петруша[2], К. О. Домбровський[3]

Робота присвячена узагальненню наукових даних щодо різноманіття носіїв для іммобілізації мікроорганізмів, матеріалів для їх виготовлення, конструкцій і архітектури, і впливу цих характеристик на ефективність очищення води. Розглянуто досягнення закордонних та вітчизняних учених у цій галузі. Більшість носіїв, що використовуються сьогодні, має або недостатню поверхню для іммобілізації мікроорганізмів або складність у монтажі чи експлуатації, або низьку біологічну стійкість. Синтетичні носії мікроорганізмів отримують все більше визнання та широке застосування в технологіях біологічного очищення стічних вод. Матеріал носія для іммобілізації мікроорганізмів повинен володіти певними характеристиками: нерозчинністю у воді; значною проникністю щодо повітря, води, ферментів, субстратів і продуктів реакції; високою хімічною і біологічною стійкістю; високою питомою поверхнею для іммобілізації біомаси; значною сорбційною ємністю стосовно мікроорганізмів; технологічністю у виготовленні й монтажі; можливістю регулювання параметрів процесу шляхом зміни структури елементів носія; низькою матеріаломісткістю та економією завдяки використанню вторинних матеріалів. З'ясовано, що шорсткі носії можуть забезпечити кращі можливості для формування біоплівки, ніж гладкі. Бажано також, щоб носій мав позитивний поверхневий заряд, оскільки поверхневий заряд клітин бактерій є негативним. Серед відомих носіїв вітчизняний капроновий волокнистий носій «ВІЯ» має низку беззаперечних переваг і знайшов широке використання в очищенні стічних вод широкого спектра промислових підприємств. Упровадження в сучасні біотехнології очищення води систем для іммобілізації бактеріальної біоти й інших гідробіонтів надає можливість значно покращити

[1] доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри загальної та прикладної екології і зоології
(Запорізький національний університет, м. Запоріжжя)
e-mail: rylsky@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9631-1828
[2] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології»
(Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)
e-mail: yulia.znu@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3041-2877
[3] кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри загальної та прикладної екології і зоології
(Запорізький національний університет, м. Запоріжжя)
e-mail: dombrov1717@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6965-6989

та збільшити швидкість очищення стічних вод в очисних спорудах, а також значно прискорити процеси самоочищення води в малих річках, позитивно вплинути на екологію гідробіонтів водних екосистем.

Ключові слова: *іммобілізація, мікроорганізми, носії, стічні води.*

CARRIERS FOR MICROBIOTA IMMOBILIZATION IN WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES

O. F. Rylskyi, Yu. Yu. Petrusha, K. O. Dombrovskiy

This study provides a comprehensive synthesis of available data on the diversity of carriers for microorganism immobilization, the materials and design architectures used in their production, and analyses how these characteristics affect the efficiency of water purification. This work considers the contributions of researchers from both domestic and international contexts in this field. Most carriers used today either have insufficient surface area for microorganism immobilization, are complex to install or operate, or have low biological stability. Synthetic microorganism carriers are gaining increasing recognition and widespread use in biological wastewater treatment technologies. The carrier material for microorganism immobilization must possess certain characteristics: insolubility in water; significant permeability to air, water, enzymes, substrates, and reaction products; high chemical and biological stability; high specific surface area for biomass immobilization; considerable sorption capacity for microorganisms; manufacturability in production and installation; the ability to regulate process parameters by changing the structure of carrier elements; low material consumption and cost-effectiveness through the use of secondary materials. It has been found that rough carriers can provide better opportunities for biofilm formation than smooth ones. It is also desirable for the carrier to have a positive surface charge, as the surface charge of bacterial cells is negative. Among known carriers, the domestic capron fiber carrier "VIYA" has a variety of undeniable advantages and has found wide application in the treatment of wastewater from a wide range of industrial enterprises. The introduction of systems for the immobilization of bacterial biota and other hydrobionts into modern water purification biotechnologies makes it possible to significantly improve and increase the rate of wastewater treatment at treatment facilities, as well as to significantly accelerate the self-purification processes of water in small rivers, and positively affect the ecology of aquatic ecosystem hydrobionts.

Key words: *immobilization, microorganisms, carriers, wastewater.*

Вступ

Технології біологічного очищення стічних вод є одними з перспективних і сучасних методів відновлення якості води до її питного стану. Як показує практика їх застосування, однією з основних перешкод для їх широкого використання є низька концентрація біомаси у споруді та значні витрати на рециркуляцію активного мулу (Iurchenko & Tkachenko, 2024). Цю проблему дозволяє вирішити використання різноманітних носіїв для іммобілізації мікроорганізмів завдяки їхній природній здатності закріплюватися на твердій поверхні носія (Жукова, 2018; Цитлішвілі, 2021).

Відомими українськими вченими П.І. Гвоздяком і Л.І. Глобою теоретично обґрунтовано ефективність використання в біотехнологіях очищення промислових і господарсько-фекальних стічних вод іммобілізованих мікроорганізмів, що підтверджено результатами досліджень і роботою очисних споруд, реконструйованих або заново побудованих за розробленими біотехнологіями (Гвоздяк, 2019).

Носії класифікуються на природні (органічні, неорганічні) та синтетичні. Природні органічні носії мають багато функціональних груп. До цього класу носіїв відносять: альгінат, к-карагінан, хітозан, тирсу, солому, деревне вугілля, рослинні волокна, кукурудзяні качани, жом, рис, лушпиння насіння соняшнику, діатоміт і міцелій (Dzionek et al., 2016; Armanu & Volf, 2022). Це гідрофільні, біорозкладні, біосумісні й недорогі матеріали, оскільки переважно являють собою відходи харчової промисловості. Однак можливість їх застосування у процесах біоремедіації обмежена через низьку стійкість до біологічного розкладання, чутливість до органічних розчинників і стабільність у вузькому діапазоні pH. Синтетичні органічні носії також мають численні функціональні групи. До цього класу відносять поліпропілен, полівініл хлорид, полістирол, пінополіуретан, поліакрилонітрит і полівініловий спирт. Їх перевагою є можливість регулювання їхньої структури на макромолекулярному рівні – вибір належної молекулярної маси, просто-

рової структури та способу й порядку розташування кожної активної функціональної групи в ланцюжку. Окрім того, під час синтезу можна контролювати пористість, діаметр пор, полярність і гідрофобність носія. Синтетичні носії можуть мати різні форми (трубки, мембрани, покриття, сфери, овали), вони легкодоступні та відносно недорогі. Неорганічні носії (природні та синтетичні) мають високу хімічну, фізичну та біологічну стійкість. Представники цієї групи: магнетит, вулканічні породи, вермикуліт, пористе скло, матеріали на основі кремнезему, кераміка та наночастинки. Істотний недолік цих носіїв – наявність невеликої кількості функціональних груп, що перешкоджає достатньому зчепленню. Із цієї причини їх використовують у формуванні гібридних носіїв, поєднують натуральні полімери та синтетичні наночастинки (Dzionek et al., 2016). Окремо виділяють композитні носії, що являють собою комбінацію неорганічних і органічних матеріалів таким чином, що характеристики двох типів матеріалів доповнюють одна одну (Zhang et al., 2016).

Натепер уже розроблено й використовується низка носіїв для іммобілізації мікроорганізмів у системах очищення стічних вод. Але більшість з них має або недостатню поверхню для іммобілізації мікроорганізмів або складність у монтажі чи експлуатації, або низьку біологічну стійкість. Матеріал носія для іммобілізації мікроорганізмів повинен володіти визначеними характеристиками: високою питомою поверхнею для іммобілізації біомаси; значною сорбційною ємністю стосовно мікроорганізмів; нерозчинністю у воді; значною проникністю щодо повітря, води, ферментів, субстратів і продуктів реакції; високою хімічною і біологічною стійкістю; технологічністю у виготовленні й монтажі; можливістю регулювання параметрів процесу шляхом зміни структури елементів носія; низькою матеріаломісткістю та економією завдяки використанню вторинних матеріалів. Цим характеристикам, зокрема, відповідають синтетичні носії (поліетиленові, поліамідні, поліефірні тощо) (Жукова, 2018). Для іммобілізації мікрофлори зазвичай використовують інертні носії, якими заповнюють об'єм біореактора, утворюють таким чином високорозвинену поверхню для прикріплення і утримування біомаси мікроорганізмів. Варто зазначити, що відомості про використання носіїв іммобілізованих мікроорганізмів і вплив на процеси біологічного очищення стічних вод в анаеробних і аноксидних зонах не досить висвітлено в літературі (Саблій, 2013).

Тому метою нашої роботи було проведення узагальнення щодо різноманіття носіїв для іммобілізації мікроорганізмів, матеріалів для їх виготовлення, конструкцій і архітектури, і впливу цих характеристик на ефективність очищення води. Відповідно до поставленої мети було визначено такі завдання:

– проаналізувати спектр матеріалів, що використовуються в сучасних технологіях як носії мікробіоти для очищення води;

– виявити найбільш поширені носії та їх модифікації, що застосовуються для очищення стічних і природних вод;

– з'ясувати вплив особливостей конструкцій і архітектури носіїв на ефективність очищення води;

– встановити найбільш перспективні носії в сучасних і майбутніх технологіях.

Матеріал і методи

Під час проведення дослідження було використано загальноприйняті теоретичні методи, зокрема: аналіз, синтез, порівняння, систематизацію та узагальнення даних наукових джерел, що забезпечило можливість інтеграції результатів у єдиний комплекс. Як основна інформаційна база дослідження використовувалися монографії, актуальні наукові дослідження, статті з наукових фахових видань, патенти тощо.

У дослідженні також реалізовано комплексний міждисциплінарний підхід, що інтегрує знання з усіх природничих галузей для всебічного аналізу даних, дозволяє виокремити найбільш перспективний, екологічно безпечний і економічно доцільний тип носія для іммобілізації мікробіоти. Отримані результати спрямовані на адаптацію наявних розробок до практичного використання, що є особливо актуальним для територій південної та південно-східної України, екосистеми яких найбільш постраждали від воєнних дій.

Результати та їх обговорення

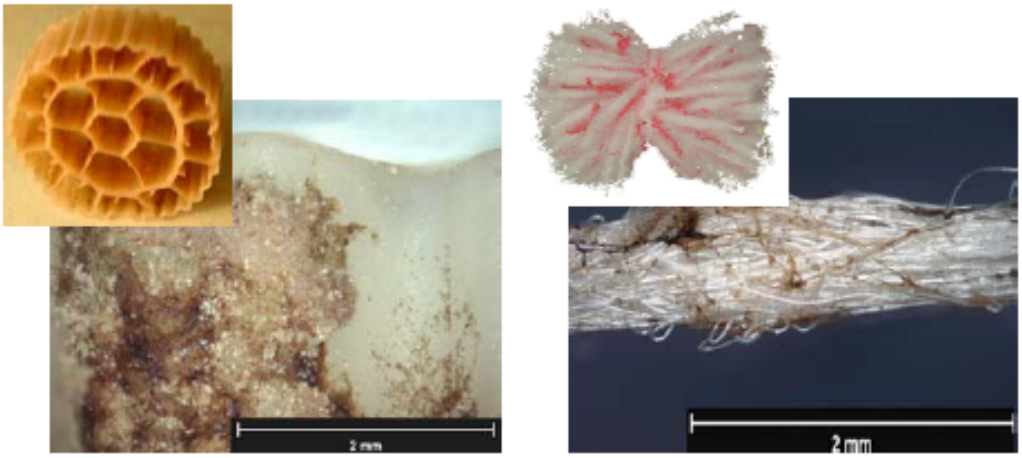
У науковій літературі представлено велике розмаїття носіїв для іммобілізації мікробіоти у вигляді пластин, просторових решіток, сіток з комірками у формі квадрата, прямокутника, кола, овала, три-, шести- й восьмикутника, йоржів, циліндричних, кубічних і ґвинтових полімерних елементів, волокон, тканин із природних і штучних матеріалів, гранул цеолітів (клиноптілоліт, морденіт, хабазит, філліпсит), вулканічних шлаків, пінополіуретану, полі-

мерних волокон, ниток, тканин і нетканих матеріалів з капрону («ВІЯ»), поліетилену, лавсану, поліпропілену, поліамідних волокон, скловолокна, кубиків зі спіненого поліефіру тощо (Саблій, 2013). З безперервним розвитком технологій були розроблені нові носії для іммобілізації, як-от композитні носії, наноматеріали, металоорганічні каркаси й біовугільні матеріали, щоб підвищити навантаження, стабільність і активність мікроорганізмів (Hou et al., 2024). У біореакторах роторного типу носії являють собою встановлені на валу у великій кількості диски з пористою поверхнею, на якій фіксується мікробіота. Вал ротора розташований над поверхнею стічної води в реакторі, під час обертання дисків їхня поверхня аерується. Чи не найважливішим показником носія є питома поверхня для іммобілізації мікроорганізмів, адже цим показником визначається кількість активної іммобілізованої біомаси. Чим він більший, тим інтенсивніше йтимуть процеси вилучення з води забруднювальних речовин, їх розкладання до утворення мінеральних речовин і газів і, як результат, – очищення води (Саблій, 2013).

Для отримання іммобілізованих мікробіоценозів науковцями (Цитлішвілі, 2021) пропонуються диски, виготовлені з полікарбонату, і конструкції з фільтруючого мату в металевих дірчастих кошиках, які занурюють у мулову рідину аеротенка-витіснювача міських очисних споруд і залишають на 6–8 тижнів. Конструкцію з полікарбонату встановлюють на початку аеротенка-витіснювача, а конструкцію з фільтруючих матів – у кінці аеротенків. Таке просторове розміщення носіїв для іммобілізації потрібно для формування специфічних біоценозів. На вході до аеротенка неочищена стічна вода містить велику концентрацію органічних речовин, які є поживним субстратом для сапрофітних гетеротрофних мікроорганізмів (політрофів). Відповідно, на полікарбонатних дисках відбудеться формування біоценозу деструкторів саме органічних сполук. Конструкцію з фільтруючих матів розміщують у кінці аеротенка, де вже очищена вода містить значно менше органічних речовин, але з'являються сполуки мінерального азоту. Це середовище сприяє формуванню біоценозу оліготрофних і хемолітоавтотрофних мікроорганізмів, які окиснюють сполуки азоту в аеробних і мікроаерофільних умовах за мінімальної концентрації органічних сполук, або ж за їх відсутності. Для ефективного формування біоплівки з анаеробних і аноксидних бактерій доцільно застосовувати фільтруючий мат з поліетилену високого тиску, який завдяки своїй структурі володіє великою поверхнею для закріплення хемоавтотрофної мікрофлори (Цитлішвілі, 2021).

Відомо, що полімерні нановолокнисті носії мають багато переваг, зокрема, велику активну питому поверхню, вищу стійкість утвореної біоплівки до зовнішнього токсичного впливу, значну толерантність до фізико-хімічних впливів параметрів середовища та високу швидкість колонізації носія (Kriklavova & Lederer, 2010). Реактор із рухомим шаром біоплівки (MBBR) є різновидом системи очищення з активним мулом і має низку переваг перед іншими методами. Ці переваги включають високу концентрацію біомаси, високу ефективність очищення, відсутність засмічення носія, використання всього об'єму резервуара для зростання біомаси, відсутність потреби в переробці осаду, менші капітальні й експлуатаційні витрати, а також меншу площу. У MBBR для формування мікробної плівки використовуються різні частинки-носії. Ці частинки-носії можуть бути природними матеріалами, як-от пісок, камінь, скло або частинки металевої сітки. Останніми роками також успішно застосовуються синтетичні полімерні матеріали, як-от поліуретан, поліетилен і полівініловий спирт. Нановолокна останнім часом також широко використовуються в багатьох галузях, зокрема й у мікробіології. Однією з відмітних властивостей нановолокон, які можуть покращити поведінку клітин, є адгезивність (покращена порівняно з іншим матеріалом). Для очищення стічних вод бажано використовувати матеріал, який важко псується і є простим у використанні. Поєднання такого носія, мікробної біоплівки та регульованих параметрів навколишнього середовища (температура, швидкість потоку стічних вод) має значний вплив на видалення забруднювальних речовин (Kriklavova & Lederer, 2010). Комерційні носії фірми "AnoxKaldnes" типу K3 (Швеція) виготовлені з поліетилену з питомою поверхнею біоплівки 500 $м^2/м^3$ та використовуються в технології MBBR (рис. 1).

Технологія нановолоконних носіїв була розроблена в Технічному університеті Ліберця (Чехія). Розробка нановолокна триває вже декілька років і дослідження продовжуються (Kriklavova & Lederer, 2010). Носії з нановолокна складаються із трьох частин.



А Б

Рис. 1: А – носій фірми “AnoxKaldnes” К3 та фрагмент біоплівки на ньому; Б – носій з нановолокон і фрагмент біоплівки на ньому (Kriklavova & Lederer, 2010)

Основною несучою ниткою є поліетилен, покриття складається з поліуретанових нановолокон (метод електропрядіння) і все двічі обмотується нитками поліетилену, що забезпечує менший розпад нановолокон. Для нановолокна питома поверхня біоплівки становить понад 1 000 м^2/м^3. Діаметр обох носіїв (К3 та з нановолокна) становить 25 мм. Дослідження були присвячені визначенню мінімальної кількості наношарового наповнення волокном. Занадто малий шар не буде підтримувати ріст мікробіоти, занадто великий шар – буде дорогим для виготовлення. Було виготовлено чотири типи носіїв: без шару нановолокна, з мінімальним, середнім і товстим шаром. Найкращою комбінацією, з погляду швидкості колонізації мікроорганізмами, виявилася нанонитка з позначкою «Шар нановолокон 2». Значною перевагою технології з нановолокнами є можливе зростання бактеріальної біоплівки не тільки на поверхні волокна, але й усередині волокон, де бактерії будуть більш захищеними від токсичної дії навколишнього середовища, а також забезпеченими субстратом і киснем. На наношаровому носії біоплівка наростає в кілька разів швидше, ніж на поліетиленовому носії (AnoxKaldnes, К3), що має велике значення для обробки системи та для регенерації після можливих надзвичайних подій (Kriklavova & Lederer, 2010).

На основі найважливіших параметрів науковцями (Svobodová & Lederer, 2011) було розроблено новий тип носія з використанням нановолокнистих матеріалів як носія біомаси. Основою є шар нановолокна, отриманий методом електропрядіння, який наноситься за допомогою технології NANOSPIDER. Нова технологія (хаотично переплетені волокна) є морфологічно дуже примітною, оскільки просторові вигини отриманих волокон збільшують поверхню, яка може сягати 1 000 м^2/г. Великою перевагою цієї технології є можливість комбінувати різні полімери та таким чином встановлювати щільність носія (від 900 кг/м^3 до 1 200 кг/м^3) залежно від вимог конкретного застосування.

Отриману пряжу можна обробляти за допомогою текстильної технології у вигляді котушок типу «бобл» або як поверхневу структуру. Перша форма – це тип носія, який називається «нанобобл», де носій «тече» разом зі стічними водами. Структура повністю довільна, але бажано сферичної форми, що мінімізує витрати, насамперед на змішування. Друга форма (рис. 2) фіксується в резервуарі, і стічна вода рухається через носій, що має вигляд фіксованих трикотажних полотен. Для взаємно переплетених ниток розроблена технологія опорних рам, які можна встановити в аеротенк як змінний модуль. До конструкції входить сито з високою варіабельністю сітки, яке можна регулювати залежно від процесу очищення або властивостей стічних вод, або використовуваної мікробної популяції (наприклад, залежно від швидкості росту мікроорганізмів) (Svobodová & Lederer, 2011).

Кінцевий продукт (нановолокниста пряжа) складається із трьох частин. Базовим волокном є поліпропілен Prolenvir CE (660 дтекс, повітряно-формований), покриття виготовлене з поліуретанових нановолокон Larithane 1083 (30–100 дтекс, електропрядіння, діаметр нановолокон становить

Рис. 2. Технологія знімних опорних рам і деталь суцільної нановолокнистої тканини (Svobodová & Lederer, 2011)

приблизно 260 нм), усе подвійно обгорнуто захисним поліетиленовим волокном (167 дтекс, захищає від тертя під час обробки та під час подальшого нанесення від розпаду нановолокон). Контур поверхневих утворень виготовлений з поліпропіленових волокон (200 дтекс). Питома поверхня отриманого носія становить щонайменше 800 $м^2/м^3$ (Svobodová & Lederer, 2011).

Створені нановолокна (Svobodová & Lederer, 2011) були апробовані в умовах, які можуть виникнути на очисних спорудах на початковій стадії очищення, до колонізації бактеріальних популяцій. Результати експерименту свідчать про 100%-ву стабільність шарів нановолокна протягом 1-го тижня; протягом 2-го тижня структура волокон вже пошкоджується. Нановолокна агрегуються одне з одним, тим самим зменшують питому площу поверхні. Незначна кількість волокон, переважно тих, які не були добре закріплені під час виробництва, потрапляє в навколишнє середовище. Методологія визначення розпаду наношарів є критично важливою, якщо стічні води можуть потрапляти безпосередньо у природні водойми, тому цей підхід потребує додаткового вивчення.

З'ясовано, що цей нановолокнистий носій (Svobodová & Lederer, 2011) можна використовувати декілька разів, але за визначених умов. Промивання біомаси з поверхні водою не є ефективним на 100%, але економічним і достатнім для використання на очисних спорудах. Використання $CrSO_4$ є ефективним, але складним на практиці; окрім того, його використання руйнує наношари, таким чином зменшує питому площу поверхні носія. Наведені нижче зображення (рис. 3) демонструють, як біоплівка зростає на нановолокнистому носії. Нановолокна утворюють скелет біоплівки й утримують її разом, але водночас дозволяють поживним речовинам і кисню проникати до центру біоплівки.

За допомогою 3D-друку науковцями було створено носії з поліаміду та нейлонового порошку (PA 2200) (рис. 4). Цей матеріал був обраний через його високу міцність і жорсткість, високу роздільну здатність деталей і біосумісність (Ovelheiro, 2020).

Після друку всіх пластин також було розроблено спеціальні стійки, щоб пластини могли підтримуватися у вертикальному положенні. Результати досліджень поставили під сумнів ідею про те, що максимізація площі поверхні є єдиним способом створення більш ефективних біоплівок. Було з'ясовано, що архітектура носія також має вплив на ефективність біоплівки (Ovelheiro, 2020).

Є роботи (Andersson, 2009), у яких досліджено здатність двох денітрифікуючих мікроорганізмів *Comamonas denitrificans* та *Brachymonas denitrificans* утворювати біоплівку на 20 різних дешевих носіях. Утворення біоплівки опосередковано вимірювали шляхом моніторингу швидкості денітрифікації носіїв. Два експериментальні мікроорганізми незалежно один від одного змогли колонізувати 10 досліджуваних матеріалів у різному ступені. Гумові та вапнякові матеріали не сприяли утворенню біоплівки, тоді як інші природні продукти, як-от деревина, лавовий камінь (пемза) і бавовна, а також оброблені матеріали, як-от керамзит (LECA), скловолокно й синтетичні органічні волокна, підтримували ріст біоплівки. Оцінювання пластикових матеріалів показало різні результати, що пов'язано з особливостями структури поверхні. Такі матеріали, як пемза, LECA, деревна стружка та комерційний пластиковий носій Kaldnes (тип K1), було використано в розширеному

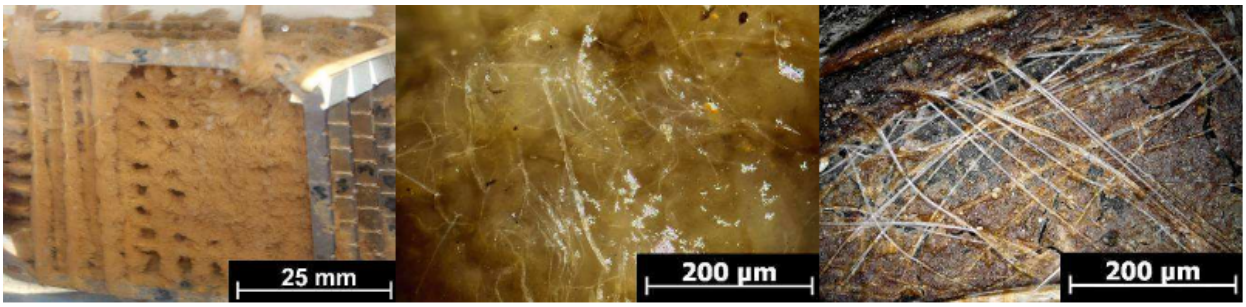


Рис. 3. Біоплівка на фіксованому носії (лабораторний експеримент), деталь біоплівки у вологому і сухому стані (Svobodová & Lederer, 2011)

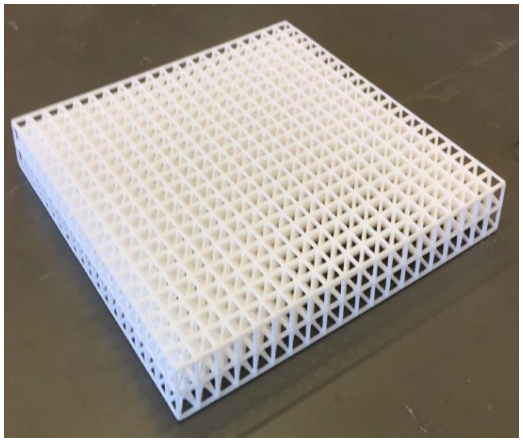


Рис. 4. Приклад 3D-друкованої пластини (Ovelheiro, 2020)

експерименті (5 тижнів), щоб спостерігати проліферацію біоплівки. *C. denitrificans* колонізував матеріали відносно швидко, і кількість біоплівки, прикріпленої до пемзи, LECA та деревини, показала тенденцію до збільшення із часом, тоді як *B. denitrificans* знадобилося більше часу, щоб колонізувати ці матеріали, а потім підтримувати постійну кількість біоплівки. Утворення біоплівки на носіях фірми "Kaldnes" K1 показало значні коливання від одного вимірювання до іншого для обох досліджуваних штамів. Це може бути наслідком нерівномірної колонізації носіїв, спричиненої комбінацією гладкої поверхні (що сповільнює початкове прилипання) та великої захищеної площі поверхні (що полегшує зростання біоплівки) (Andersson, 2009).

Було досліджено (Al-Amshawee et al., 2020a) широкий спектр штучних твердих речовин (поліуретан, поліпропілен, поліетилен) і природних твердих матеріалів (частини рослин і каміння) для колонізації мікробіоти для збільшення утримання твердих речовин і зменшення необхідної площі простору. У літературі (Al-Amshawee et al., 2020a) зазначається, що бажано, щоб носій мав позитивний поверхневий заряд, оскільки поверхневий заряд клітин бактерій є негативним. Дослідження проводилися, зокрема, на висушених шматочках стебла кактусів *Opuntia imbricata*, смужках губки з полівінілхлориду, натуральному рисовому лушпинні, шамоті, геотекстилі з кокосового волокна, бамбуковому вугіллі, персикових кісточках та поліуретанових сферах. Поліуретанові носії забезпечують найкраще видалення люмінофору й азоту, тоді як поліетилен сприяє найшвидшому зниженню показника ХСК. Досліджувалося також зростання біоплівки на цеоліті (Biolite™ і Perl™) у міських стічних водах з погляду ефективності видалення поживних речовин і активності ферменту дегідрогенази. Perl™ і Biolite™ – це промислові носії, виготовлені зі скляних відходів і кераміки. Протягом перших 45 днів біоплівки на Perl™ були дуже ефективними щодо видалення органічних речовин, тоді як на Biolite™ була вища активність дегідроге-

нази. Автори відзначили, що штучні носії є більш перспективними, ніж природний цеоліт (Al-Amshawee et al., 2020a).

Також було використано носії з боросилікатного скла та поліетилену для формування біоплівки *Pseudomonas sp.*, штам S9, що містить рибулозо-1,5-бісфосфаткарбоксилазу (Al-Amshawee et al., 2020a). Помічено, що коли носії покриваються білком, то більше клітин має тенденцію прикріплюватися, і зростання біоплівки прискорюється. Ученими було досліджено цеоліт, губку та керамзит як носії біоплівки для очищення побутових стічних вод. На поверхні цих носіїв виросли представники родів *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Nitrospirae*, *Cyanobacteria* та *Actinobacteria*. Губчастий носій мав найбільшу кількість біомаси через велику площу поверхні (Al-Amshawee et al., 2020a). Окремі типи носіїв наведено на рис. 5, характеристики десяти з них представлено в таблиці 1 (Al-Amshawee et al., 2020a).

Після двох років досліджень для біологічного очищення стічних вод авторами (Al-Amshawee et al., 2020a) було розроблено два носії. Після огляду носіїв біоплівки "Kaldnes" було помічено, що всі розглянуті носії мають слабку конструкцію для захисту біоплівки від видалення турбулентністю. Відповідно, зовнішні поверхні двох нових носіїв були розроблені по-різному для ефективного прикріплення біоплівки, захищеної від зовнішніх впливів (наприклад, потоку стічної води, бульбашок кисню тощо). Окрім того, відомо, що текстура поверхонь носіїв може посилити або послабити прикріплення мікробіоти. Водночас високе заростання біоплівкою може спричинити неефективне очищення води через низьку

Рис. 5. Розмаїття конструкцій носіїв для формування біоплівки (Al-Amshawee et al., 2020a)

Таблиця 1

Специфікації носіїв біоплівки фірми "Kaldnes" (Al-Amshawee et al., 2020a)

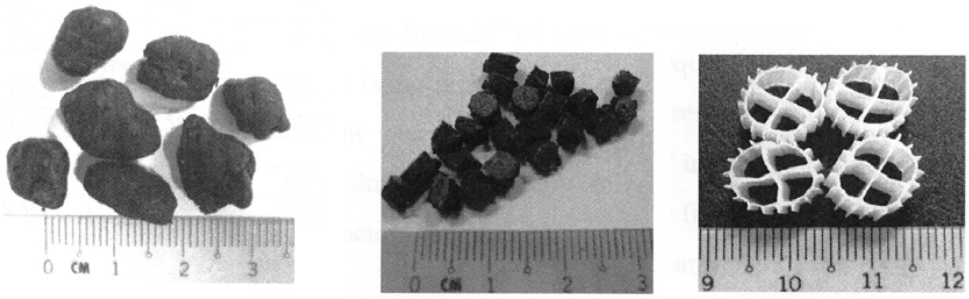
Тип	**Матеріал**	**Кількість комірок**	**Термін служби, рік**	**Тривалість утворення біоплівки**	**Діаметр / висота, мм**	**Вага на м³, кг**	**Температура роботи, °C**
1	2	3	4	5	6	7	8
K1	поліетилен	4	10	5–15 днів	12/9	120	–
K2	поліетилен	4	10	5–15 днів	11/7	140	–
K3	поліетилен	5	10	5–15 днів	11/7	150	–
K4	поліетилен	6	10	5–15 днів	14,5/10	120	–
K5	поліетилен	19	10	5–15 днів	20/12	95	–
K6	поліетилен	19	>15	3–15 днів	35/15	–	5–60
K7	поліетилен	19	–	–	35/18	–	–
K8	поліетилен	8	>15	3–15 днів	5/10	–	5–60
K9	поліетилен	40	>15	3–15 днів	15/15	–	5–60
K10	поліетилен	64	>15	3–15 днів	24/4	–	5–60

площу активної поверхні. Відповідно, два порожнисті куби (носії) було розроблено з використанням програмного забезпечення Auto Desk Auto Cad для високозабруднених (наприклад, стічних вод заводу з виробництва пальмової олії) та низькозабруднених стічних вод (наприклад, муніципальних). Як основний несучий матеріал пропонується поліетилен або поліпропілен, оскільки він має 10–15 років строку служби та вважається менш вартісним порівняно з металами. Носії, що мають гофровані поверхні, можуть підвищити стабільність та прикріплення біоплівки (Al-Amshawee et al., 2020a).

Іншими авторами також зазначено, що нерівності поверхні носія можуть забезпечувати його захист від зсуву рідини та турбулентності, а також від зіткнень частинок. Тобто шорсткі носії можуть забезпечити кращі можливості для формування біоплівки, ніж гладкі. Тому ідеальні частинки носія мають бути грубими, але не дуже гострими. Для дослідження було використано три типи носія: носій, виготовлений з полівінілового спирту, покритий порошкоподібним активованим вугіллям (носій типу I); Bio Carrier Plastic (носій типу II); носій Kaldnes (носій типу III) (рис. 6) (Zheng, 2005). Їхні фізичні характеристики наведено в таблиці 2.

Асоціація бактеріальної біоти на носії Kaldnes показала високі результати, видаливши 66–96% вхідних органічних сполук. Варто зазначити, що за використання однакових носіїв, але за різного коефіцієнта заповнення (навантаження на конкретну площу), продуктивність очищення була різною. Менше питоме навантаження на площу приводило до кращої якості очищення стоків (Zheng, 2005).

За результатами тривалих досліджень звичайні та модифіковані композитні носії для біоплівки за ефективністю зниження хімічної потреби в кисні вченими було класифіковано таким чином: полівініловий спирт > поліуретан > поліетилен > поліпропілен і полівініловий спирт > утилізована шина > поліуретан > поліетилен (Al-Amshawee et al., 2020b).



А Б В

Рис. 6. А – носій типу I, Б – носій типу II, В – носій типу III (Zheng, 2005)

Таблиця 2

Характеристики досліджуваних носіїв (Zheng, 2005)

Фізичні характеристики	**Носій типу I**	**Носій типу II**	**Носій типу III**
1	2	3	4
Загальна площа поверхні, $м^2/м^3$	600	750	500 (площа захищеної поверхні 300 $м^2$)
Щільність, $г/см^3$	1,1	0,98–1,0	0,92–0,96
Діаметр, мм	2–6	4 x 4	7 x 10
Заповнення (об'єм реактора), %	10–30	10–30	35–65
Матеріал	полівініловий спирт і карбон	пластик	поліетилен
Вартість, $USD/м^3$	1 500	1 300	1 000

У наявних роботах описано отримання високоефективних і недорогих матеріалів для іммобілізації біоплівки на основі соснової кори та кукурудзяної соломки, а також дослідження їхніх переваг порівняно із широко використовуваними носіями, як-от натрій альгінат і пелети агару. Отримані результати показали, що найкращим носієм для іммобілізації була модифікована кора (He et al., 2019).

Процеси іммобілізації мікробіоти широко використовуються для біоремедіації підземних забруднених вод. Оскільки є різні методи іммобілізації мікроорганізмів (адсорбція, зв'язування на поверхні (електростатичне або ковалентне), флокуляція, захоплення та інкапсуляція), то вони, відповідно, потребують і носіїв зі специфічними властивостями (для флокуляції носії не потрібні). Наприклад, носії, що використовуються для адсорбції або зв'язування на поверхні, повинні мати високу пористість для забезпечення якомога більшої площі контакту. Природа виконуваних процесів біоремедіації також впливає на вибір носія. Носії, що використовуються в біоаугментації, мають біологічно розкладатися. У процесах очищення стічних вод носій повинен мати високу механічну стійкість, оскільки може піддаватися впливу різних видів фізичних сил (Dzionek et al., 2016).

Автори (Moga et al., 2018) пропонують новий носій біоплівки для третинного очищення стічних вод шкіряних і паперових фабрик. Біологічне очищення засноване на активності грибів, які будуть вирощувати на інноваційних носіях (суміш поліетилену високої щільності), що містять целюлозу. Носій буде розроблено для використання в біореакторі з рухомим шаром (Moga et al., 2018).

У цьому дослідженні (Freitas et al., 2022) було оцінено продуктивність трьох біоплівкових реакторів з рухомим шаром (MBBR) з використанням різних носіїв (із захищеною площею поверхні та без неї) для очищення побутових стічних вод у безперервному потоці. Кожен реактор був заповнений у співвідношенні 50% носіями з поліетилену високої щільності з різними характеристиками: комерційний носій фірми "Kaldnes" (K1) і альтернативні носії (гофрована трубка із захищеною поверхнею та пластівці без захищеної поверхні). Результати показали, що тип носія та його характеристики (загальна площа та з/без захищеної території) не впливають на видалення органічної речовини. Отже, носій без захищеної поверхні в методі MBBR може бути перспективним недорогим варіантом для очищення побутових стічних вод (Freitas et al., 2022).

Запропоновано (Hasegawa et al., 2017) носій для очищення стічних вод, що містить серцевинні елементи та мікробні утримувальні елементи, які отримані шляхом формування багатошарових ниток у багаторівневій або петлевій конфігурації, волокна шарів нитки формуються в розслабленому стані, щоб мати можливість відокремлюватися одне від одного у стічній воді. Найкращим варіантом є поєднання гідрофільних і гідрофобних волокон. Водорозчинні органічні речовини у стічних водах, імовірно, прилипають до гідрофільних волокон. Органічні речовини, що не розкладаються (жири, олії, поверхнево-активні речовини) можуть прилипати до гідрофобних волокон. Синергічний ефект поєднання гідрофільних і гідрофобних волокон значно покращує адгезію органічних речовин, а також підтримує мікробний харчовий ланцюг. Гідрофільне волокно містить гідрофільну групу (гідроксильну групу), легко змочується водою. Це може бути нейлон, акрил, поліестер, вінілон, вуглецеве волокно, промікс, ацетат, конопля, бавовна, віскоза, шовк і вовна. Нейлон і вінілон бажано використовувати в діапазоні нормальних і високих температур (10–60 °C), акрил і вуглецеве волокно – у холодну погоду (10 °C або менше). Гідрофобне волокно містить вуглеводневу групу, важко змочується водою. Найчастіше це вініліден, полівінілхлорид, поліпропілен на основі олефіну або поліетилен. З них вініліден і полівінілхлорид є найбільш придатними незалежно від середовища використання. Пропонується також цей носій адаптувати до стічних вод з високою концентрацією органіки (Hasegawa et al., 2017).

Електропрядіння, як технологія виробництва безперервних волокон розміром від десятків нанометрів до кількох мікрон, може запропонувати нові ідеї для виробництва носіїв для іммобілізації. Ця технологія забезпечує більшу гнучкість в модифікації відповідно до конкретних вимог процесу та забезпечує параметричну обробку за помірних витрат. У зв'язку із цим електропрядіння дає можливість отримувати мікронановолокна з різноманітними компонентами, високою площею поверхні та чудовою механічною міцністю. Було встановлено, що синтетичні волокна нагадують природні

нанофібринові мережі за морфологією, механікою та хімією поверхні та мають високу біосумісність із клітинами. Отже, електронановолокна мають великий потенціал для використання як мікробні носії для очищення стічних вод (Zhao et al., 2023).

У роботі (Phan et al., 2023) стічні води від підприємств виробництва морепродуктів очищали за допомогою реактора MBBR на новому носії, отриманому з комбінації пористої (пінополіуретан) і гідрофільної поверхні (полівініловий спирт). Експериментальні результати показали, що такий гелевий носій має гарні текстурні особливості: питома поверхня 3,4 м^2/г, розмір пор у діапазоні 10–40 мкм і гідрофільна поверхня. Це сприяє швидшому зануренню у воду та кращій мікробній адгезії, у результаті чого обсяг біоплівки, утвореної на початковому етапі, у 2,4 раза вищий порівняно зі звичайним носієм з пінополіуретану.

Ученими було досліджено ефективність утворення біоплівки на 4-х типах пластикових носіїв: сферичних, дископодібних і колесоподібних різного діаметра. Встановлено, що носій діаметром 9,95 мм мав найвищу середню концентрацію біомаси, іммобілізованої на поверхні, – 5 425 мг/дм^3, порівняно з іншими: Ø 9,34 мм, Ø 47,09 мм та Ø 125,93 мм, які показали 2015, 869 та 138 мг/дм^3 відповідно. Отже, колесоподібні носії діаметром 9,95 мм можуть бути ефективно використані в системах MMBR для очищення стічних вод, а також для покращення роботи аеротенків шляхом їх модернізації – створення зон з носіями для підвищення ефективності очищення стічних вод від органічних речовин, азотних сполук, особливо на стадії нітрифікації, фосфорних сполук та інших забруднювальних речовин (Sablii, 2025).

Як видно з вищенаведеного, вибір носія для іммобілізації мікроорганізмів є критичним фактором, оскільки він впливає на оптимальну товщину біоплівки, ріст біомаси й ефективність біодеградації забруднювальних речовин різної природи (Sablii, 2025).

Закордонні вчені активно працюють над проблемою створення та вдосконалення різноманітних носіїв для іммобілізації мікроорганізмів, щоб підвищити якість найбільшого скарбу планети Земля – води. Українські науковці також плідно працюють над цим питанням. Зокрема, видатний український учений П.І. Гвоздяк ще у 80–90-х рр. XX ст. теоретично обґрунтував і практично довів доцільність та ефективність використання в біотехнологіях очищення стічних вод волокнистих носіїв із синтетичних (капронових) волокон типу «ВІЯ», «ДІЯ», «НАДІЯ» для іммобілізації гідробіонтів в очисних спорудах (Саблій, 2013; Гвоздяк, 2019). Серед відомих носіїв вони мають найбільшу поверхню, що досягає 5 000 м^2 в 1 м^3 об'єму очисної споруди. До переваг носіїв «ВІЯ» порівняно з іншими носіями можна віднести:

– створення найкращих умов для утримування активного мулу в системі для збільшення концентрації та віку мулу, що має особливо велике значення для мулів, мікроорганізми яких мають малий період генерації, як-от нітрифікатори або анамокс-бактерії;

– збільшення стабільності роботи біореактора за низької концентрації органічних речовин і схильності активного мулу до спухання;

– відсутність явища спухання, зменшення об'ємів осадів, покращення їхніх седиментаційних властивостей, збільшення мінеральної частки;

– збільшення концентрації активної біомаси приводить до прискорення процесів біологічного очищення стічних вод, збільшення окисної потужності споруд і зменшення їхніх об'ємів (наприклад, аеротенка на 20–30%);

– створення всередині біологічної плівки умов для перебігу процесу денітрифікації, анамокс-процесу;

– велику поверхню адсорбції мікроорганізмів, а також малий гідравлічний опір потоку рідини, нерозчинність у воді, високу міцність, стійкість до мікробної деструкції, нешкідливість для організмів, малу вартість.

Для волокна носія «ВІЯ» питома поверхня становить 180 м^2/г (для інших волокон цей показник значно менший 26,1 м^2/г (табл. 3)). Дослідження показали, шо на волокнах «ВІЙ» іммобілізуються епібіонти: черепашкові амеби, коловертки, нематоди, які відіграють значну роль у створенні біоконвеєра. А в товщі носія зареєстровано гідробіонтів – індикаторів високого ступеня чистоти води (Саблій, 2013).

Висновки

Результати проведеного дослідження продемонстрували величезне розмаїття природних і штучних носіїв мікробіоти. Доведено, що різні методи іммобілізації мікроорганізмів потребують різних носіїв зі специфічними властивостями. Синтетичні носії мікроорганізмів отримують все більше

Таблиця 3

Порівняльна характеристика матеріалів – носіїв іммобілізованих мікроорганізмів (Саблій, 2013)

Показник	**Капронова джгутова нитка «ВІЯ»**	**Поліпропіленова нитка**	**Поліетиленова нитка**	**Пластмасова муфта**	**Йоржі зі скловолокна**	**Спінений полістирол**
1	2	3	4	5	6	7
D – діаметр, мм; H – висота, мм	D = 0,5–3,0	D = 0,4	D = 0,4	D = 42, H = 50	–	D > 3,0
Питома поверхня, $м^2/г$	180	26,1	26,1	–	–	–
Питома активна поверхня, $м^2/м^3$	5000	–	–	0–250	1 000–10 000	900
Питома маса носія, $кг/м^3$	0,22	–	–	–	–	35
Концентрація біомаси за сухою речовиною, г/г ($кг/м^3$)	3,1–3,8 (24–30)	–	–	– (26)	3,65–3,4 (15–30)	–
Марка	–	–	–	–	–	ПСВ, ПСВ-с*

*Примітка: * – полістирол самозатухаючий (містить домішки, які запобігають горінню).*

визнання та широке застосування в технологіях біологічного очищення стічних вод, значно впливають на екологію та біорізноманіття бактеріальної біоти, що іммобілізується на поверхні. Наприклад, поліуретанові носії забезпечують найкраще видалення люмінофору й азоту, тоді як поліетилен сприяє найшвидшому зниженню показника ХСК.

Встановлено, що носій повинен мати позитивний поверхневий заряд, оскільки поверхневий заряд бактеріальних клітин є негативним. На вірогідність нерівномірної колонізації носіїв впливає комбінація наявності гладкої поверхні та великої захищеної площі поверхні.

Викликає сумнів ідея про максимізацію площі поверхні носія як єдиний спосіб створення більш ефективних біоплівок. З'ясовано, що архітектура носія також має певний вплив на ефективність біоплівки. Носії, що мають гофровані поверхні, можуть підвищити стабільність та прикріплення біоплівки.

За головними якісними показниками та тривалістю експлуатації в реальних очисних спорудах найбільш перспективним носієм для майбутнього використання показала себе система «ВІЯ» з капронової текстурованої нитки.

Подальше впровадження в сучасні біотехнології очищення води систем для іммобілізації бактеріальної біоти й інших гідробіонтів надає можливість значно покращити та збільшити швидкість очищення стічних вод в очисних спорудах, а також значно прискорити процеси самоочищення води в малих річках (Rylsky et al., 2023; Burdenyuk et al., 2023), позитивно вплинути на екологію гідробіонтів водних екосистем.

Список використаної літератури

Гвоздяк П.І. Біохімія води. Біотехнологія води : автомонографія. Київ : Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2019. 228 с.

Жукова В.С. Застосування носіїв іммобілізованих мікроорганізмів для ефективного біологічного очищення стічних вод. *Екологічні біотехнології та біоенергетика :* матеріали Науково-практичного семінару, присвяченого 120-річчю Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського, м. Київ, 14 грудня 2018 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 31–34.

Саблій Л.А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод : монографія. Рівне : НУВГП, 2013. 291 с.

Цитлішвілі К.О. Екологія іммобілізованого азоттрансформуючого мікробіоценозу в системах очистки стічних вод : дис. … докт. філос. : 101. Харків, 2021. 187 с.

Al-Amshawee S.K., Yunus M.Y., Azoddein A.A. A novel microbial biofilm carrier for wastewater remediation. *IOP Conf. Ser.*: Mater. Sci. Eng., 2020a. 13 p. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/736/7/072006

Al-Amshawee S., Mohd Y., Mohd Y., Vo D.-V., Tran N. Biocarriers for biofilm immobilization in wastewater treatments: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2020b. Vol. 18(6). P. 1925–1945. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01049-y

Andersson S. Characterization of bacterial biofilms for wastewater treatment. Sweden, Stockholm : School of Biotechnology, Royal Institute of Technology, 2009. 71 p.

Armanu E.G., Volf I. Natural carriers for bacterial immobilization used in bioremediation. *Buletinul institutului politehnic din iaşi, Secţia Chimie şi Inginerie Chimică*. 2022. Vol. 68(72). № 3. P. 109–122. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7545779

Burdenyuk I., Masikevych A., Dombrovskyi K., Rylskyi O., Masykevich Y., Deyneka S., Tymchuk I. Sanitary, microbiological condition, and ecological state of surface water quality in the upper Siret River basin (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24(9). P. 55–63. https://doi.org/10.12912/27197050/172930

Dzionek A., Wojcieszyńska D., Guzik U. Natural carriers in bioremediation: a review. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2016. Vol. 19(5). P. 28–36. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.07.003

Freitas B. de O., Leite L. de S., Hoffmann M.T., Lamon A.W., Daniel L.A. Application of alternative carriers without protected surface in moving bed biofilm reactor for domestic wastewater treatment. Water Practice and Technology. 2022. Vol. 17(2). P. 544–554. https://doi.org/10.2166/wpt.2022.003

Hasegawa M., Amino N., Ishihara K. Wastewater treatment carrier, wastewater treatment carrier module, wastewater treatment carrier unit, and wastewater treatment device. Publication Number WO/2017/056232. Publication Date 06.04.2017. International Application № PCT/JP2015/077726. International Filing Date 30.09.2015. IPC C02F 3/06 2006.1, CPC C02F 2201/007 C02F 3/06 C02F 3/10 C02F 3/103 C02F 3/20. Y02W 10/10.

He J., Zhang W., Ren X., Xing L., Chen S., Wang C. Preparation of different activated sludge immobilized carriers and their organic wastewater treatment performance by microbial community. *Environmental Engineering Science*. 2019. Vol. 36. Is. 5. P. 604–613. https://doi.org/10.1089/ees.2018.0295

Hou L., Hu K., Huang F., Pan Z., Jia X., Liu W., Yao X., Yang Z., Tang P., Li J. Advances in immobilized microbial technology and its application to wastewater treatment: a review. *Bioresource Technology*. 2024. Vol. 413. P. 131518. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131518

Iurchenko V., Tkachenko S. Implementation of the sludge biotic index for control and optimization of the biological treatment process. *Environmental problems*. 2024. Vol. 9. № 3. P. 164–171. https://doi.org/10.23939/ep2024.03.164

Kriklavova L., Lederer T. The use of nanofiber carriers in biofilm reactor for the treatment of industrial wastewaters. *Nanocon 2010 :* Conference Proceedings, 2nd International Conference, 12–14 October 2010, Olomouc, Česká Republika. 6 p.

Moga I.C., Iordache O.I., Petrescu G., Pricop F., Dumitrescu I. Polyethylene based materials for biofilm carriers used in wastewater treatment. *IOP Conference Series :* materials science and engineering, 17–18 May 2018, Iasi, Romania. Vol. 374. 6 p. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012080

Ovelheiro B. 3D printed architected materials for improving biofilm carriers for wastewater treatment applications. USA : University of Massachusetts Amherst, 2020. 100 p.

Phan T.A., Pham T.N., Duong T.H., Nguyen H.M. Novel carrier for seafood wastewater treatment using moving bed biofilm reactor system. Environmental Engineering Research. 2023. Vol. 28(5). P. 220508. https://doi.org/10.4491/eer.2022.508

Rylsky O., Dombrovskiy K., Masikevych Y., Masikevych A., Malovanyy M. Evaluation of water quality of the Siret River by zooperiphyton organisms. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24(6). P. 294–302. https://doi.org/10.12911/22998993/163166

Sablii L., Zhukova V., Kozar M., Hrynevych A., Jaromin-Gleń K. Comparison biofilm characteristics on different types of carriers for wastewater treatment. *Environmental problems*. 2025. Vol. 10. № 1. P. 20–25. https://doi.org/10.23939/ep2025.01.020

Svobodová (Kriklavova) L., Lederer T. A review study of nanofiber technology for wastewater treatment. *Nanocon 2011 :* Conference Proceedings, 3rd International Conference, 21–23 September 2011, Brno, Czech Republic. 6 p.

Zhang X., You S., Ma L., Chen C., Li C. The application of immobilized microorganism technology in wastewater treatment. *MMECEB* 2015 *:* 2nd International conference on machinery, materials engineering, chemical engineering and biotechnology. 2015. P. 103–106. http://dx.doi.org/10.2991/mmeceb-15.2016.22

Zhao Y., Hussain A., Liu Y., Yang Z., Zhao T., Bamanu B., Su D. Electrospinning micro-nanofibers immobilized aerobic denitrifying bacteria for efficient nitrogen removal in wastewater. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 343. P. 118230. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118230

Zheng Q. Selection and optimization of carriers in biological wastewater treatment applications : master's thesis. Singapore : Nanyang Technological University, 2005. 141 p.

References

Ghvozdjak, P.I. (2019). Biokhimija vody. Biotekhnologhija vody (avtomonoghrafija) [Biochemistry of water. Biotechnology of water (automonography)]. Kyiv: Vydavnychyj dim "Kyievo-Moghyliansjka akademiia" [in Ukrainian].

Zhukova, V.S. (2018) Zastosuvannja nosijiv immobilizovanykh mikroorghanizmiv dlja efektyvnogho biologhichnogho ochyshhennja stichnykh vod [Application of immobilized microorganisms carriers for effective biological wastewater treatment]. *Ekologhichni biotekhnologhiji ta bioenerghetyka : materialy naukovo-praktychnogho seminaru prysvjachenogho 120-richchju KPI im. Ighorja Sikorsjkogho* [Ecological biotechnology and bioenergy: materials of the scientific and practical seminar dedicated to the 120th anniversary of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute]. Kyjiv: KPI im. Ighorja Sikorsjkogho, pp. 31–34 [in Ukrainian].

Cytlishvili, K.O. (2021) Ekologhija immobilizovanogho azottransformujuchogho mikrobiocenozu v systemakh ochystky stichnykh vod [Ecology of immobilized nitrogen-transforming microbiocenosis in wastewater treatment systems]. Dysertacija na zdobuttja naukovogho stupenja doktora filosofiji za specialjnistju 101 – Ekologhija [Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 – Ecology]. Kharkiv: Naukovo-doslidna ustanova "Ukrajinsjkyj naukovo-doslidnyj instytut ekologhichnykh problem" [in Ukrainian].

Sablij, L.A. (2013) Fizyko-khimichne ta biologhichne ochyshhennja vysokokoncentrovanykh stichnykh vod: monoghrafija [Physico-chemical and biological purification of highly concentrated wastewater: monograph]. Rivne: NUVGhP [in Ukrainian].

Al-Amshawee, S.K., Yunus, M.Y., Azoddein, A.A. (2020a). A novel microbial biofilm carrier for wastewater remediation. *IOP Conf. Ser.*: Mater. Sci. Eng., 13. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/736/7/072006 [in English].

Al-Amshawee, S., Mohd, Y., Mohd Y., Vo D-V., Tran N. (2020b). Biocarriers for biofilm immobilization in wastewater treatments: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 1925–1945. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01049-y [in English].

Andersson, S. (2009). Characterization of bacterial biofilms for wastewater treatment. Sweden, Stockholm: School of Biotechnology, Royal Institute of Technology [in English].

Armanu, E.G., & Volf, I. (2022). Natural carriers for bacterial immobilization used in bioremediation. *Buletinul institutului politehnic din iaşi*, *Secţia Chimie şi Inginerie Chimică*, 68(72), 3, 109–122. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7545779 [in English].

Burdenyuk, I., Masikevych, A., Dombrovskyi, K., Rylskyi, O., Masykevich, Y., Deyneka, S., & Tymchuk, I. (2023). Sanitary, microbiological condition, and ecological state of surface water quality in the upper Siret River basin (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(9), 55–63. https://doi.org/10.12912/27197050/172930 [in English].

Dzionek, A., Wojcieszyńska, D., & Guzik, U. (2016). Natural carriers in bioremediation: a review. *Electronic Journal of Biotechnology*, 19(5), 28–36. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.07.003 [in English].

Freitas, B. de O., Leite, L. de S., Hoffmann, M.T., Lamon, A.W., & Daniel, L.A. (2022). Application of alternative carriers without protected surface in moving bed biofilm reactor for domestic wastewater treatment. Water Practice and Technology, 17(2), 544–554. https://doi.org/10.2166/wpt.2022.003 [in English].

Hasegawa, M., Amino, N., & Ishihara, K. (2017). Wastewater treatment carrier, wastewater treatment carrier module, wastewater treatment carrier unit, and wastewater treatment device. Publication Number WO/2017/056232. Publication Date 06.04.2017. International Application No. PCT/JP2015/077726. International Filing Date 30.09.2015. IPC C02F 3/06 2006.1, CPC C02F 2201/007 C02F 3/06 C02F 3/10 C02F 3/103 C02F 3/20. Y02W 10/10 [in English].

He, J., Zhang, W., Ren, X., Xing, L., Chen, S., & Wang, C. (2019). Preparation of different activated sludge immobilized carriers and their organic wastewater treatment performance by microbial community. *Environmental Engineering Science*, 36(5), 604–613. https://doi.org/10.1089/ees.2018.0295 [in English].

Hou, L., Hu, K., Huang, F., Pan, Z., Jia, X., Liu, W., Yao, X., Yang, Z., Tang, P., & Li, J. (2024). Advances in immobilized microbial technology and its application to wastewater treatment: a review. *Bioresource Technology*, 413, 131518. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131518 [in English].

Iurchenko, V., & Tkachenko, S. (2024). Implementation of the sludge biotic index for control and optimization of the biological treatment process. *Environmental problems*, 9(3), 164–171. https://doi.org/10.23939/ep2024.03.164 [in English].

Kriklavova, L., & Lederer, T. (2010). The use of nanofiber carriers in biofilm reactor for the treatment of industrial wastewaters. *Nanocon*. Olomouc, Česká Republika, 6 p. [in English].

Moga, I.C., Iordache, O.I., Petrescu, G., Pricop, F., & Dumitrescu, I. (2018). Polyethylene based materials for biofilm carriers used in wastewater treatment. *IOP Conference Series*: Materials Science and Engineering, 374. 6 p. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012080 [in English].

Ovelheiro, B. (2020). 3D printed architected materials for improving biofilm carriers for wastewater treatment applications. Environmental & Water Resources Engineering Masters Projects. USA: University of Massachusetts Amherst [in English].

Phan, T.A., Pham, T.N., Duong, T.H., & Nguyen, H.M. (2023). Novel carrier for seafood wastewater treatment using moving bed biofilm reactor system. Environmental Engineering Research, 28(5), 220508. https://doi.org/10.4491/eer.2022.508 [in English].

Rylsky, O., Dombrovskiy, K., Masikevych, Y., Masikevych, A., & Malovanyy, M. (2023). Evaluation of water quality of the Siret River by zooperiphyton organisms. *Journal of Ecological Engineering*, 24(6), 294–302. https://doi.org/10.12911/22998993/163166 [in English].

Sablii, L., Zhukova, V., Kozar, M., Hrynevych, A., & Jaromin-Gleń, K. (2025). Comparison biofilm characteristics on different types of carriers for wastewater treatment. *Environmental problems*, 10(1), 20–25. https://doi.org/10.23939/ep2025.01.020 [in English].

Svobodová (Kriklavova), L., & Lederer, T. (2011). A review study of nanofiber technology for wastewater treatment. *Nanocon*. Brno, Czech Republic, 6 p. [in English].

Zhang, X., You, S., Ma, L., Chen, C., & Li, C. (2015). The application of immobilized microorganism technology in wastewater treatment. *2nd International Conference on Machinery, Materials Engineering, Chemical Engineering and Biotechnology*, 103–106. http://dx.doi.org/10.2991/mmeceb-15.2016.22 [in English].

Zhao, Y., Hussain, A., Liu, Y., Yang, Z., Zhao, T., Bamanu, B., & Su, D. (2023). Electrospinning micro-nanofibers immobilized aerobic denitrifying bacteria for efficient nitrogen removal in wastewater. *Journal of Environmental Management*, 343, 118230. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118230 [in English].

Zheng, Q. (2005). Selection and optimization of carriers in biological wastewater treatment applications: master's thesis. Singapore: Nanyang Technological University [in English].

Отримано: 29.10.2025
Прийнято: 27.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 502.131.1:316.614.5
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.34

НАУКОВО-МЕТОДИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІНДЕКСУ ЕКОЛОГІЧНОЇ КУЛЬТУРИ ЯК ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗНИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ СУСПІЛЬСТВА

К. В. Чікірякін[1], О. В. Шестопалов[2]

У статті розглянуто концептуальні, теоретичні та методичні засади розроблення індексу екологічної культури (ІЕК) як інтегрального показника рівня сталого розвитку суспільства. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю врахування культурно-ціннісних і поведінкових чинників у процесах екологізації суспільства, оскільки сучасна парадигма сталого розвитку вимагає поєднання екологічних, економічних, соціальних і гуманітарних складників. Відсутність у науковій і практичній площині уніфікованих кількісних показників, які б комплексно характеризували рівень екологічної культури населення, ускладнює оцінювання ефективності державної екологічної політики, програм освіти для сталого розвитку та комунікаційних стратегій у сфері охорони навколишнього природного середовища. Метою статті є науково-методичне обґрунтування підходів до формування інтегрального індексу екологічної культури, що може бути використаний як інструмент кількісного оцінювання стану екологічної свідомості, поведінкових моделей і соціальної активності громадян у контексті реалізації цілей сталого розвитку. Методологічну основу дослідження становлять методи системного, порівняльного та структурно-функціонального аналізу, статуеточного моделювання, експертного оцінювання, контент-аналізу й соціологічного опитування. Застосування системного підходу дозволило визначити структуру індексу екологічної культури як багатовимірної системи, що охоплює п'ять взаємопов'язаних компонентів: когнітивний, який відображає рівень екологічних знань і поінформованості населення; ціннісно-емоційний, що характеризує ставлення до екологічних проблем і готовність діяти на користь довкілля; поведінковий, який фіксує екологічно орієнтовані практики в повсякденному житті; соціально-інституційний, пов'язаний із діяльністю органів влади, громадських організацій і бізнесу; комунікаційний, що охоплює інформаційні потоки, медіаактивність і просвітницькі кампанії. Наукова новизна одержаних результатів полягає у формуванні концептуальної моделі індексу екологічної культури, яка поєднує якісні соціологічні та кількісні статистичні параметри, а також у розробленні методики його побудови на основі нормалізації показників, зважування компонентів та інтеграції в єдину узагальнену оцінку. Доведено, що індекс екологічної культури може не лише виконувати функцію моніторингу стану екологічної культури в регіонах, а й слугувати аналітичним критерієм оцінювання ефективності державної політики у сфері

[1] аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: Kyrylo.Chikiriakin@mit.khpi.edu.ua
ORCID: 0009-0008-9945-4809
[2] кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)
e-mail: Oleksii.Shestopalov@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0001-6268-8638

екологічної освіти, інформаційної відкритості, розвитку громадянського суспільства й екологічного управління. Практична значущість дослідження полягає в можливості застосування індексу екологічної культури для порівняльного аналізу територій, розроблення регіональних програм підвищення екологічної культури, оцінювання результативності освітніх і комунікаційних проектів, формування системи індикаторів для національної звітності за Цілями сталого розвитку та вдосконалення механізмів управління у сфері довкілля. Отримані результати можуть бути використані органами державної влади, закладами освіти, науковими установами та громадськими організаціями для підвищення ефективності заходів із формування екологічно свідомого суспільства та реалізації стратегічних пріоритетів екологічної політики України в умовах європейської інтеграції.

Ключові слова: *екологічна культура, сталий розвиток, індекс, екологічна свідомість, культура сталості, соціальні практики.*

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL JUSTIFICATION OF THE ENVIRONMENTAL CULTURE INDEX AS AN INTEGRAL INDICATOR OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF SOCIETY

K. V. Chykyriakin, O. V. Shestopalov

The article examines the conceptual, theoretical, and methodological foundations for developing the Environmental Culture Index (ECI) as an integral indicator of the level of sustainable development of society. The relevance of the study is determined by the need to consider cultural, value-based, and behavioral factors in the processes of society's ecological transformation, since the modern paradigm of sustainable development requires the integration of environmental, economic, social, and humanitarian dimensions. The lack of unified quantitative indicators that comprehensively characterize the level of environmental culture among the population complicates the assessment of the effectiveness of state environmental policy, education programs for sustainable development, and communication strategies in the field of environmental protection. The purpose of the article is to provide a scientific and methodological rationale for the development of an integrated Environmental Culture Index that can be used as a tool for quantitative assessment of the state of environmental awareness, behavioral models, and civic engagement in the context of achieving the Sustainable Development Goals. The methodological basis of the study includes methods of system, comparative, and structural-functional analysis, statistical modeling, expert evaluation, content analysis, and sociological survey. The application of a systemic approach made it possible to define the structure of the ECI as a multidimensional system encompassing five interrelated components: the cognitive component, which reflects the level of environmental knowledge and awareness of the population; the value-emotional component, which characterizes attitudes toward environmental problems and willingness to act for the benefit of the environment; the behavioral component, which captures environmentally oriented practices in everyday life; the social-institutional component, related to the activities of government bodies, public organizations, and businesses; and the communication component, which covers information flows, media activity, and educational campaigns. The scientific novelty of the obtained results lies in the formation of a conceptual model of the Environmental Culture Index that combines qualitative sociological and quantitative statistical parameters, as well as in the development of a methodology for its construction based on indicator normalization, component weighting, and integration into a single generalized assessment. It has been proven that the ECI can serve not only as a tool for monitoring the state of environmental culture in different regions but also as an analytical criterion for assessing the effectiveness of state policy in the field of environmental education, information transparency, civil society development, and environmental governance. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the ECI for comparative regional analysis, developing regional programs to enhance environmental culture, evaluating the effectiveness of educational and communication projects, forming a system of indicators for national reporting on the Sustainable Development Goals, and improving environmental management mechanisms. The results obtained can be used by government authorities, educational institutions, research organizations, and non-governmental organizations to improve the effectiveness of measures aimed at fostering an environmentally conscious society and implementing the strategic priorities of Ukraine's environmental policy in the context of European integration.

Key words: *environmental culture, sustainable development, index, environmental awareness, environmental behavior, cultural sustainability, methodology.*

Вступ

У сучасних умовах глобальної екологічної нестабільності, що проявляється у зміні клімату, деградації природних екосистем, зростанні обсягів відходів і дефіциті природних ресурсів, питання культурних і поведінкових основ взаємодії людини із природою набуває ключового значення (Wamsler & Brink, 2018; Inglehart & Norris, 2019). Вичерпання природного потенціалу планети дедалі частіше розглядається не лише як наслідок економічної діяльності, а як відображення ціннісних орієнтацій, рівня екологічної свідомості та культури населення. Економічні чи технологічні інновації, попри їхню ефективність, не можуть забезпечити довготривалої рівноваги між розвитком і збереженням ресурсів без формування належного рівня екологічної культури, що передбачає усвідомлену, морально вмотивовану та соціально підтримувану поведінку людини щодо довкілля (Андрущенко і Лісовий, 2018).

Екологічна культура розглядається як інтегративне явище, що поєднує знання, цінності, традиції, соціальні норми та практики, спрямовані на гармонізацію відносин між людиною та природою. Саме тому в системі оцінювання сталого розвитку все більше уваги привертають не лише технічні чи політичні параметри, а й соціокультурні чинники, які визначають готовність суспільства до екологічно відповідальної поведінки, участі у природоохоронній діяльності та підтримки екологічних реформ (Van der Linden, 2017; Clayton & Myers, 2020).

У більшості міжнародних практик моніторингу сталого розвитку використовуються переважно кількісні показники – індикатори енергоспоживання, рівня викидів парникових газів, обсягів утворення і утилізації відходів, доступу до чистої води чи ефективності управління природними ресурсами. Проте ці індикатори не відображають глибинного рівня культурного засвоєння екологічних цінностей, який визначає стабільність, сталість і довготривалі результати будь-яких екологічних трансформацій. Без належного рівня екологічної культури навіть найсучасніші технології або управлінські рішення можуть втратити ефективність через низьку екологічну свідомість населення, байдужість до проблем довкілля чи недовіру до екологічних ініціатив (World …, 2022).

Саме цей аспект пропонується відобразити через індекс екологічної культури (далі – ІЕК) – узагальнений інтегральний показник, що дозволяє кількісно оцінити ступінь інтеграції екологічних знань, цінностей, мотивацій і поведінкових практик у суспільстві. ІЕК має стати важливим аналітичним інструментом у системі стратегічного планування сталого розвитку, оскільки він дозволяє відстежувати не лише матеріальні результати екологічної політики, а й рівень готовності соціуму до свідомої взаємодії із природним середовищем. Отже, формування науково обґрунтованої методики розрахунку індексу екологічної культури є необхідним кроком для побудови цілісної системи оцінювання сталості розвитку, що поєднує економічні, екологічні та культурно-ціннісні виміри прогресу людства.

Матеріал і методи

У науковій літературі останнього десятиліття (Wamsler & Brink, 2018; Inglehart & Norris, 2019; OECD, 2022; UNDP, 2023) екологічна культура дедалі частіше трактується як багатовимірний феномен, що поєднує раціонально-пізнавальні, емоційно-ціннісні, етичні, поведінкові та соціально-комунікативні компоненти взаємодії людини із природою. Її формування розглядається не як миттєвий процес чи результат навчання, а як наслідок тривалої еволюції суспільних практик, у яких екологічна відповідальність поступово трансформується з окремої поведінкової норми у фундаментальний елемент культурної ідентичності. Таким чином, екологічна культура виступає своєрідним індикатором зрілості суспільства, здатності гармонізувати розвиток технологічної цивілізації з екологічними межами планети.

Водночас більшість відомих індексів сталого розвитку – як-от Environmental Performance Index (Європейська …, 2021; OECD, 2022; UNDP, 2023), Human Development Index (UNDP, 2023) чи Sustainable Development Goals Index – не охоплюють соціокультурних і поведінкових вимірів (European …, 2021; OECD, 2022; UNDP, 2023), які безпосередньо визначають екологічну зрілість суспільства. Зазначені індикатори переважно фокусуються на вимірюванні стану довкілля, ресурсоефективності, рівня забруднення, управління природними ресурсами або політичної ефективності. Водночас культурні, освітні та поведінкові чинники, які є основою екологічної відповідальності, залишаються поза системою кількісної оцінки. Така

методологічна лакуна унеможливлює повне розуміння взаємозв'язку між соціальними настановами, екологічними знаннями та результатами екологічної політики.

Запропонований у статті підхід спрямований на усунення цього розриву шляхом поєднання соціокультурного й індексного аналізу (Dryzek, 2016). Соціокультурний підхід дозволяє розглядати екологічну культуру як складник загальної культури суспільства, що інтегрує моральні цінності, норми поведінки, традиції, соціальні практики й освітні впливи. Індексний підхід забезпечує можливість кількісної оцінки цього багатовимірного явища через інтегральний показник – індекс екологічної культури (далі – ІЕК), який поєднує якісні і кількісні параметри.

Метою дослідження є розроблення науково-методичних засад формування ІЕК як кількісного вимірювача культурно-ціннісного компоненту сталого розвитку (Бакуменко, 2019), що дозволяє оцінювати готовність суспільства підтримувати екологічні зміни. На відміну від існуючих міжнародних індексів, ІЕК спрямований не на фіксацію екологічних результатів, а на виявлення соціальних і культурних передумов цих результатів – знань, цінностей, поведінкових настанов та інституційних орієнтацій.

Методологічну основу дослідження становлять системний, індикаторний, індексний і соціокультурний підходи (OECD, 2022). У межах системного підходу екологічна культура розглядається як відкрита динамічна система, що функціонує у взаємодії з освітньою, економічною, політичною та інституційною підсистемами суспільства. Індикаторний підхід забезпечує обґрунтований добір кількісних і якісних параметрів, що репрезентують окремі виміри екологічної культури, а індексний – дозволяє інтегрувати їх у єдину шкалу вимірювання. Такий підхід дає можливість не лише оцінювати поточний стан екологічної культури, а й аналізувати динаміку змін у часовому та просторовому вимірах, порівнюючи різні регіони чи країни.

Структура ІЕК охоплює п'ять взаємопов'язаних компонентів:

– когнітивний (C) – рівень знань, обізнаність і розуміння екологічних процесів і проблем;

– ціннісно-емоційний (V) – система ставлень, мотивацій і емоційного сприйняття природи, що формує внутрішню готовність до екологічних дій;

– поведінковий (B) – фактичні екологічно орієнтовані практики в побуті, споживанні, транспорті, енергозбереженні та поводженні з відходами;

– соціально-інституційний (S) – рівень участі в колективних екологічних ініціативах, взаємодія з державними структурами, ступінь довіри до екологічних інститутів;

– комунікаційний (M) – інтенсивність і якість екологічних комунікацій, роль засобів масової інформації, соціальних мереж і громадських дискусій у поширенні екологічних цінностей.

Індекс екологічної культури визначається як середньозважене значення нормалізованих показників кожного з п'яти компонентів за шкалою від 0 до 10 балів, де 0–3,9 відповідає низькому рівню екологічної культури, 4,0–6,9 – середньому, а 7,0–10,0 – високому рівню. Вагові коефіцієнти (w1…w5) для кожного компонента визначаються експертним шляхом з урахуванням їхньої значущості в загальній структурі екологічної культури, а в подальших дослідженнях можуть уточнюватися емпірично залежно від соціально-культурного контексту, вибірки респондентів і регіональних особливостей (UNDP, 2020).

Запропонований підхід створює основу для розроблення універсального аналітичного інструменту, здатного поєднати кількісну точність статистичного вимірювання із глибиною соціокультурного аналізу, що є необхідним для комплексного розуміння та оцінювання процесів сталого розвитку у XXI столітті.

Результати та їх обговорення

Запропонована методика дозволяє інтегрувати культурно-поведінкові характеристики в систему оцінювання сталого розвитку (White et al., 2019), забезпечує більш повне відображення взаємозв'язку між соціальною свідомістю, ціннісними орієнтаціями та екологічною поведінкою населення. На відміну від традиційних екологічних індексів, які зосереджені переважно на оцінюванні стану природного середовища, використанні ресурсів чи рівні забруднення, індекс екологічної культури (ІЕК) спрямований на вимірювання потенціалу суспільства до підтримання екологічно відповідального способу життя. Він фіксує не стільки екологічні наслідки діяльності, скільки передумови сталого розвитку, пов'язані з екологічними знаннями, цінностями, мотиваціями та моделями поведінки громадян.

Для апробації методики розрахунку індексу екологічної культури (ІЕК) було проведено загальнонаціональне опитування N = 1 200 респондентів віком 18–65 років у п'яти макрорегіонах України: Захід, Центр, Схід, Південь, Північ (по n = 240 осіб у кожному регіоні). Вибірка сформована за квотами статі (52% жінок; 48% чоловіків), віку (18–29 – 24%; 30–44 – 31%; 45–59 – 27%; 60+ –18%) і освіти (вища – 34%; середня спеціальна – 41%; середня – 25%), що забезпечує репрезентативність дорослого населення країни за ключовими соціально-демографічними параметрами. Польові роботи відбувалися у травні – червні 2024 р. у змішаному форматі (онлайн-анкетування та паперові анкети через регіональні осередки), середній показник повернення становив 28%; дані зважено на основі офіційної демографічної структури для мінімізації дизайн-ефекту (очікувана стандартна похибка для N = 1200 ≈ ±2,8% за 95% ДІ).

Методика розрахунку ІЕК ґрунтується на системному поєднанні кількісних і якісних показників, що охоплюють когнітивний, ціннісно-емоційний, поведінковий, соціально-інституційний та комунікаційний компоненти. Кожен із них оцінюється на основі результатів соціологічних опитувань, експертних оцінок і статистичних даних, після чого проводиться нормалізація значень та інтеграція у єдиний індекс за допомогою вагових коефіцієнтів. Такий підхід дозволяє забезпечити об'єктивність і відтворюваність результатів, а також дає змогу простежити динаміку змін у часовому розрізі.

Розрахунок здійснювався у три етапи: (1) нормалізація кожної змінної у шкалі 0–10; (2) агрегація індикаторів у компонент за допомогою середнього арифметичного (за наявності пропусків використовувалася методика pairwise deletion з мінімумом двох валідних відповідей на компонент); (3) інтеграція п'яти компонентів із рівноваговими вагами (0,2 кожен) у фінальний показник ІЕК. Для контролю чутливості використовувалася специфікація з підвищеною вагою поведінкового компоненту; ефект на середній ІЕК виявився мінімальним, що підтверджує стабільність індексу.

Кожен із п'яти компонентів ІЕК – когнітивний (C), ціннісно-емоційний (V), поведінковий (B), соціально-інституційний (S) та комунікаційний (M) – вимірювався за батареєю індикаторів (3–6 запитань на компонент) зі шкалою відповідей, нормалізованою в діапазон 0–10. Для інтеграції компонентів використано індексний підхід:

$$\text{ІЕК} = (w_1C + w_2V + w_3B + w_4S + w_5M) / /(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5),$$

де w_i – вагові коефіцієнти компонентів.

У базовій специфікації застосовано рівновагові коефіцієнти w_i = 0,2, що відповідає першій валідаційній версії індексу. Внутрішню узгодженість батарей перевірено за α Кронбаха: C = 0,79; V = 0,76; B = 0,72; S = 0,74; M = 0,75. Експлораторний факторний аналіз засвідчив адекватність моделі (KMO = 0,81; критерій Бартлетта: x^2, p < 0,001). Чутливість індексу оцінено у специфікації з підвищеною вагою поведінкового компоненту (wB = 0,30): середнє значення ІЕК змінилося несуттєво (5,24 проти 5,20 у базовій моделі), що підтверджує стійкість інструменту до варіацій ваг.

Середнє значення ІЕК = 5,20, стандартне відхилення SD = 1,40, мінімум = 1,3, максимум = 8,9 (усі показники у шкалі 0–10). Розподіл рівнів індексу: низький (0–3,9) – 24% респондентів; середній (4,0–6,9) – 53%; високий (7,0–10,0) – 23%. Отримані значення свідчать про домінування середнього рівня екологічної культури з помірною дисперсією відповідей.

Результати апробації методики на вибірці з 1 200 респондентів, проведеної у 2024 р., свідчать, що середній рівень ІЕК в Україні становить 5,2 бала з 10 можливих, що відповідає середньому рівню екологічної культури.

Структурний профіль ІЕК демонструє такі середні значення компонентів: когнітивний C = 5,6 (SD = 1,5); ціннісно-емоційний V = 5,4 (SD = 1,4); поведінковий B = 5,1 (SD = 1,6); соціально-інституційний S = 4,8 (SD = 1,5); комунікаційний M = 5,3 (SD = 1,5). Найнижчі показники зафіксовано в соціально-інституційному вимірі, що відображає обмежену довіру до інституцій і низьку залученість до колективних екологічних практик.

Найвищі показники зафіксовано в західних регіонах (5,7), що пояснюється більш активним розвитком екологічних ініціатив, поширеністю громадських рухів і екопросвітницьких програм. Найнижчі результати спостерігаються у східних регіонах (4,7), де вищий рівень урбанізації поєднується з нижчою довірою до екологічних інституцій і слабшою участю населення у природоохоронній діяльності.

За регіональною ознакою середні значення ІЕК становлять: Захід – 5,7 (95% ДІ: 5,6–5,9); Центр – 5,4 (5,3–5,6); Північ – 5,3

(5,1–5,5); Південь – 5,0 (4,8–5,2); Схід – 4,7 (4,5–4,9). Міжрегіональні відмінності статистично значущі (ANOVA: F (4,1195) = 11,8; p < 0,001), з найвищими значеннями на Заході та найнижчими – на Сході.

Вікові групи демонструють очікуваний градієнт: 18–29 років – 5,8; 30–44 – 5,4; 45–59 – 5,0; 60+ – 4,3 (ANOVA: F (3,1196) = 13,2; p < 0,001), що вказує на більш високий рівень екологічної культури в молодших когорт. За статтю фіксується невелика, але значуща різниця: жінки – 5,3, чоловіки – 5,1 (t (1198) = 2,06; p = 0,04). Освітній рівень корелює з індексом: вища освіта – 5,8; середня спеціальна – 5,2; середня – 4,6 (F (2,1197) = 15,4; p < 0,001).

Поглиблений аналіз компонентів показав, що найбільший вплив на загальний результат мають когнітивний і поведінковий компоненти (Van der Linden, 2017; Leiserowitz et al., 2021), які відображають рівень поінформованості та реальну участь громадян у практиках раціонального споживання, сортування відходів, енергозбереження тощо. Водночас соціально-інституційний компонент продемонстрував найслабші позиції, що зумовлено низьким рівнем довіри до державних екологічних структур, недостатньою координацією між владою, бізнесом і громадськими організаціями, а також нерозвиненістю системи заохочення до екологічно відповідальної поведінки.

Отримані результати підтверджують, що індекс екологічної культури може ефективно застосовуватися як інструмент моніторингу соціальних трансформацій (Zero …, 2020; UNDP, 2023), що відображають зміни у ставленні громадян до природи, рівні екологічної свідомості та готовності до участі у сталому розвитку. Окрім того, ІЕК є аналітичним індикатором ефективності освітніх програм, громадських ініціатив і державної екологічної політики, адже дозволяє оцінювати їхній вплив на формування нових соціокультурних моделей поведінки.

Сукупність кількісних показників, описових статистик і міжгрупових порівнянь підтверджує валідність та практичну застосовність ІЕК як інтегрального культурно-поведінкового індикатора сталого розвитку: індекс чутливо відображає регіональні та соціально-демографічні відмінності й залишається стабільним за альтернативних схем вагових коефіцієнтів.

У ширшому міжнародному контексті запропонований підхід дає змогу розглядати ІЕК як культурно-ціннісний аналог відомих інтегральних показників, як-от Human Development Index (HDI) чи Environmental Performance Index (EPI), які охоплюють переважно соціально-економічні й екологічні аспекти розвитку. ІЕК може стати їх логічним доповненням, інтегруючи соціокультурний вимір, що забезпечує більш цілісне розуміння сталості розвитку суспільства та його здатності гармонійно співіснувати із природним середовищем.

Дослідження має типові обмеження перехресного зрізу: самооцінний характер відповідей, можливий вплив соціальної бажаності та відсутність панельної динаміки. Запропонована методика передбачає подальшу верифікацію вагових коефіцієнтів на більших масивах даних та міжрегіональне порівняння в довшій часовій перспективі.

Висновки

Розроблений індекс екологічної культури (ІЕК) є науково обґрунтованим інтегральним показником, що відображає рівень культурного засвоєння екологічних цінностей у суспільстві та ступінь інтеграції екологічної свідомості в повсякденні практики громадян. Його концептуальна основа поєднує принципи системного, соціокультурного та поведінкового підходів, що дозволяє розглядати екологічну культуру не лише як результат освіти чи виховання, а як комплексну характеристику соціального розвитку. Структура ІЕК базується на п’яти взаємопов’язаних компонентах – когнітивному, ціннісно-емоційному, поведінковому, соціально-інституційному та комунікаційному, – кожен із яких відображає окремий вимір екологічної культури. Когнітивний компонент характеризує рівень знань і розуміння екологічних процесів, ціннісно-емоційний – глибину особистісного ставлення до природи та мотивацію до збереження довкілля, поведінковий – реальні дії, спрямовані на екологізацію побуту та споживання. Соціально-інституційний компонент пов’язаний з участю громадян у суспільних екологічних ініціативах, довірою до державних і громадських інституцій, а комунікаційний – з рівнем поширення екологічних знань, ефективністю інформаційно-просвітницької діяльності та медіаактивністю у сфері довкілля.

ІЕК має подвійне значення: з одного боку, він є діагностичним інструментом, що дає змогу визначити рівень екологічної культури населення, виявити сильні

та слабкі сторони у структурі екологічних знань, цінностей і поведінкових практик; з іншого – виступає аналітичним індикатором сталого розвитку, який демонструє готовність суспільства підтримувати екологічні зміни, ухвалювати екологічно орієнтовані рішення та брати участь у реалізації політики сталого розвитку. Отже, ІЕК не лише фіксує поточний стан культурно-поведінкових орієнтацій, а й дає можливість прогнозувати динаміку соціальних зрушень у сфері екологічної свідомості.

Емпіричні результати дослідження підтверджують статистичну надійність і валідність ІЕК як інтегрального показника. Отримані коефіцієнти внутрішньої узгодженості (α Кронбаха 0,72–0,79) та факторна структура (KMO = 0,81; $p < 0,001$) засвідчили стабільність інструменту. Середнє значення ІЕК становить 5,2 бала (SD = 1,4) за діапазону від 1,3 до 8,9, що свідчить про помірний рівень екологічної культури населення із чітко вираженими регіональними та соціально-демографічними відмінностями. Виявлені відмінності за віком, освітою і регіоном ($p < 0,001$) демонструють чутливість індексу до соціальних контекстів, що підтверджує його аналітичну придатність для практичних досліджень.

Практична застосовність ІЕК підтверджена можливістю його використання для оцінювання ефективності екологічної освіти, інформаційних кампаній та програм громадської участі. Індекс може бути інтегрований у державні системи моніторингу сталого розвитку як показник соціокультурного виміру екологічної політики, а також використаний у муніципальних стратегіях для виявлення територій із низьким рівнем екологічної культури та планування цільових просвітницьких заходів.

Упровадження ІЕК в систему державного моніторингу сталого розвитку відкриває нові можливості для оцінювання ефективності екологічної освіти, просвітницьких програм, комунікаційних стратегій і участі громадськості в ухваленні екологічних рішень. Завдяки інтеграції цього індексу в національні статистичні й аналітичні системи можна забезпечити комплексну оцінку не лише стану навколишнього середовища, а й глибини соціокультурних трансформацій (European …, 2021; OECD, 2022), що супроводжують екологічну модернізацію суспільства.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення вагових коефіцієнтів складників ІЕК (Wamsler & Brink, 2018) для різних соціально-демографічних груп, регіонів і культурних контекстів, а також на розроблення методів адаптації цього показника до міжнародних систем моніторингу. Важливо також здійснити верифікацію індексу в міжрегіональних і міждержавних порівняннях, що дозволить визначити місце України у глобальному культурно-екологічному просторі та сформувати науково обґрунтовані рекомендації для підвищення рівня екологічної культури населення. Отже, ІЕК може розглядатися як науково підтверджений, статистично надійний і практично застосовний індикатор сталого розвитку, який поєднує культурні, поведінкові та соціальні виміри екологічної свідомості.

У перспективі ІЕК може стати невід'ємним елементом комплексної системи оцінювання сталого розвитку, забезпечувати гуманітарний вимір екологічної політики та сприяти формуванню ціннісних орієнтацій, необхідних для переходу до екологічно збалансованого майбутнього.

Список використаної літератури

Андрущенко В.П., Лісовий В.С. Екологічна культура як основа сталого розвитку. Київ : Інститут філософії НАН України, 2018. 280 с.

Бакуменко В.Д. Екологічна свідомість молоді: соціологічний аналіз. Харків : ХНУ, 2019. 244 с.

Європейська Комісія. Спеціальне опитування Eurobarometer 516: Ставлення європейців до кліматичних змін. Брюссель : ЄК, 2021. 87 с. [Електронний ресурс]. URL: https://europa.eu/eurobarometer/surveys (дата звернення 15.10.2025).

Організація економічного співробітництва та розвитку (OECD). Environmental Policy Instruments and Cultural Change: EPIC Database. Париж : OECD Publishing, 2022. 88 p. https://doi.org/10.1787/82b01f02-en

Програма розвитку ООН (UNDP). Доповідь про людський розвиток 2020: Наступний рубіж – людський розвиток в антропоцені. Нью-Йорк : ООН, 2020. 394 с. https://doi.org/10.18356/9789210055161

Програма розвитку ООН (UNDP). Звіт про цілі сталого розвитку 2023 р. Нью-Йорк : ООН, 2023. 178 с. https://doi.org/10.18356/9789213585559

Clayton S., Myers G. Conservation psychology: Understanding and promoting human care for nature. 3rd ed. Oxford : Wiley-Blackwell. 2020. P. 392. https://doi.org/10.1002/9781119493309

Dryzek J.S. The politics of the earth: Environmental discourses. 4th ed. Oxford : Oxford University Press, 2016. 352 p. [Електронний ресурс]. URL: https://global.oup.com/academic/product/the-politics-of-the-earth-9780198851745?cc=ua&lang=en& (дата звернення 15.10.2025).

Inglehart R., Norris P. Cultural backlash: Trump, Brexit, and authoritarian populism. Cambridge : Cambridge University Press, 2019. P. 463. https://doi.org/10.1017/9781108595841

Leiserowitz A., Maibach E., Rosenthal S. Climate change in the American mind: Public support for climate and energy policies. New Haven, CT : Yale University, 2021. 45 p. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/6SGEW

Van der Linden S. The social-psychological determinants of climate change risk perceptions. *Nature Climate Change.* 2017. № 7(9). P. 703–708. https://doi.org/10.1038/nclimate3357

Wamsler C., Brink E. Mindsets for sustainability: Integrating inner dimensions into transformative learning and practice. *Sustainability Science.* 2018. № 13. P. 1125–1137. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0646-2

White K., Habib R., Hardisty D. How to SHIFT consumer behaviors to be more sustainable. *Journal of Marketing.* 2019. № 83(3). P. 22–49. https://doi.org/10.1177/0022242919825649

World Values Survey Association. World Values Survey Wave 7 (2017–2022): Official data release. Madrid : WVSA, 2022. https://doi.org/10.14281/18241.18

Zero Waste Europe. Bio-waste management in Europe: Good practices and policy options. Brussels : ZWE. 2020. P. 56. https://doi.org/10.5281/zenodo.3750482

References

Andrushchenko, V.P., & Lisovyi, V.S. (2018). Ekolohichna kultura yak osnova staloho rozvytku [Environmental culture as the basis of sustainable development]. Kyiv: Instytut filosofii NAN Ukrainy [in Ukrainian].

Bakumenko, V.D. (2019). Ekolohichna svidomist molodi: sotsiolohichnyi analiz [Environmental awareness of youth: sociological analysis]. Kharkiv : KhNU [in Ukrainian].

Yevropeiska Komisija [European Commission]. (2021). Spetsialne opytuvannia Eurobarometer 516: Stavlennia yevropeitsiv do klimatchnykh zmin [Special Eurobarometer 516: Europeans' attitudes towards climate change]. Brussels: EC. [Electronic resource] URL: https://europa.eu/eurobarometer/surveys (access date 15.10.2025) [in Ukrainian].

Orhanizatsiia ekonomichnoho spivrobitnytstva ta rozvytku (OECD) [Organisation for Economic Co-operation and Development]. (2022). Environmental policy instruments and cultural change: EPIC database. Paris: OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/82b01f02-en [in English].

Prohrama rozvytku OON (UNDP) [United Nations Development Programme] (2020). Dopovid pro liudskyi rozvytok 2020: Nastupnyi rubizh – liudskyi rozvytok v antropotseni [Human Development Report 2020: The next frontier – human development in the Anthropocene]. New York: United Nations. https://doi.org/10.18356/9789210055161 [in Ukrainian].

Prohrama rozvytku OON (UNDP) [United Nations Development Programme]. (2023). Zvit pro tsili staloho rozvytku 2023 roku [Sustainable Development Goals Report 2023]. New York: United Nations. https://doi.org/10.18356/9789213585559 [in Ukrainian].

Clayton, S., & Myers, G. (2020). Conservation psychology: Understanding and promoting human care for nature (3rd ed.). Oxford: Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781119493309 [in English].

Dryzek, J.S. (2016). The politics of the earth: Environmental discourses (4th ed.). Oxford: Oxford University Press. [Electronic resource] URL: https://global.oup.com/academic/product/the-politics-of-the-earth-9780198851745 (access date 15.10.2025) [in English].

Inglehart, R., & Norris, P. (2019). Cultural backlash: Trump, Brexit, and authoritarian populism. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108595841 [in English].

Leiserowitz, A., Maibach, E., & Rosenthal, S. (2021). Climate change in the American mind: Public support for climate and energy policies. New Haven, CT: Yale University. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/6SGEW [in English].

Van der Linden, S. (2017). The social-psychological determinants of climate change risk perceptions. Nature Climate Change, 7(9), 703–708. https://doi.org/10.1038/nclimate3357 [in English].

Wamsler, C., & Brink, E. (2018). Mindsets for sustainability: Integrating inner dimensions into transformative learning and practice. Sustainability Science, 13, 1125–1137. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0646-2 [in English].

White, K., Habib, R., & Hardisty, D. (2019). How to SHIFT consumer behaviors to be more sustainable. Journal of Marketing, 83(3), 22–49. https://doi.org/10.1177/0022242919825649 [in English].

World Values Survey Association (2022). World Values Survey Wave 7 (2017–2022): Official data release. Madrid: WVSA. https://doi.org/10.14281/18241.18 [in English].

Zero Waste Europe (2020). Bio-waste management in Europe: Good practices and policy options. Brussels: ZWE. https://doi.org/10.5281/zenodo.3750482 [in English].

Отримано: 28.10.2025
Прийнято: 24.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 598.2: 591.5 (477.64)
DOI https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.35

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВІДЛЯКУВАЧА РУКОКРИЛИХ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ РИЗИКІВ ЇХ ЗІТКНЕНЬ З ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ

В. С. Яненко[1], А. В. Клепко[2]

У статті представлено результати двоетапного біоакустичного тестування вітчизняного ультразвукового відлякувача типу «СуперКіт-1000», спрямованого на оцінку його ефективності для мінімізації ризику зіткнення рукокрилих із вітроенергетичними установками (ВЕУ). Актуальність зумовлена необхідністю пошуку дієвих технічних рішень для зниження смертності рукокрилих на ВЕС, які б дозволили мінімізувати економічні втрати від повної зупинки турбін. Експериментальні дослідження проводилися протягом 2023–2024 років із використанням біоакустичного детектора Echo Meter Touch 2 Pro та програмного забезпечення для спектрального аналізу. Методика включала чергування періодів роботи та вимкнення «СуперКіт-1000» для забезпечення статистичної достовірності порівняння активності тварин.

Первинні польові випробування (2023 р.) показали, що сигнали пристрою у діапазонах 34–37 кГц та 44–48 кГц не перекривають основні ехолокаційні частоти нетопира пігмея (Pipistrellus pygmaeus, 56–72 кГц). Це підтвердило відсутність помітного впливу на поведінку цього виду та довело неефективність неадаптованих відлякувачів. На другому етапі (2024 р.) після технічної модифікації виробником, пристрій було налаштовано на діапазон 23–30 кГц, адаптований під частоти вразливого виду – вечірниці рудої (Nyctalus noctula). У результаті зафіксовано зниження акустичної активності виду: кількість реєстрацій у зоні дії увімкненого відлякувача знизилася до 7 випадків проти 12 випадків у контрольні періоди вимкнення приладу за однакові проміжки часу.

Важливим результатом дослідження стало визначення фізичних обмежень методу: встановлено, що ефективна дальність поширення ультразвукового сигналу становить до 15–20 метрів, після чого інтенсивність хвиль критично знижується. Це свідчить про те, що ультразвукові відлякувачі можуть бути ефективними лише як локальний засіб захисту (наприклад, для захисту гондоли), але не покривають площу обертання ротора сучасних турбін.

Отримані результати підтверджують потенційну ефективність ультразвукового відлякувача як допоміжного технічного засобу. Авторами доведено, що ефективність дії пристрою має чіткий видоспецифічний характер і залежить від точного співпадіння частотного налаштування з піковими частотами ехолокації цільових видів. Запропоновано впровадження багаточастотного режиму генерації

[1] аспірант кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: yanenko2028@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1190-725X
[2] доктор біологічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: klepko@nubip.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7061-453X

сигналів та розробку адаптивних алгоритмів роботи пристроїв на основі попереднього моніторингу фауни конкретної ВЕС. Рекомендовано поєднання ультразвукових систем із режимом curtailment (зупинка турбін у пікові години), що забезпечить максимальний рівень захисту біорізноманіття.

Ключові слова: *моніторинг, екологічна оцінка, збереження біорізноманіття, рукокрилі, відлякувач, вітроенергетика.*

RESULTS OF TESTING AN ULTRASONIC BAT DETERRENT FOR FURTHER APPLICATION AT WIND POWER PLANTS

V. S. Yanenko, A. V. Klepko

The article presents the results of a two-stage bioacoustic testing of the domestically manufactured ultrasonic deterrent «SuperCat-1000», aimed at assessing its effectiveness in minimizing the risk of bat collisions with wind turbines (WTs). The relevance of this study is driven by the need to identify effective technical solutions to reduce bat mortality at wind power plants (WPPs), while minimizing the economic losses associated with complete turbine shutdowns. Experimental research was conducted during 2023–2024 using the Echo Meter Touch 2 Pro bioacoustic detector and spectral analysis software. The methodology involved alternating periods with the "SuperCat-1000" switched on and off to ensure statistically reliable comparisons of animal activity. The initial field trials (2023) showed that the device signals in the 34–37 kHz and 44–48 kHz ranges did not overlap with the main echolocation frequencies of the Pipistrellus pygmaeus, 56–72 kHz. This confirmed the absence of any noticeable effect on the behavior of this species and demonstrated the ineffectiveness of non-adapted deterrent devices. During the second stage (2024), following technical modifications by the manufacturer, the deterrent was retuned to the 23–30 kHz range, which corresponds to the echolocation frequencies of a vulnerable species – the Common Noctule (Nyctalus noctula). As a result, a decrease in the acoustic activity of this species was recorded: the number of bat passes within the active zone of the operating deterrent decreased to 7, compared to 12 passes during control periods when the device was turned off, over equal time intervals.

An important outcome of the study was the identification of the physical limitations of the method: the effective propagation distance of the ultrasonic signal was determined to be 15–20 meters, beyond which wave intensity decreases critically. This indicates that ultrasonic deterrents can be effective only as localized protection tools (e.g., for nacelle-level mitigation), but they cannot cover the full rotor-swept area of modern wind turbines.

The findings confirm the potential of ultrasonic deterrents as auxiliary technical mitigation tools. The authors demonstrated that the device's effectiveness is strongly species-specific and depends on the precise alignment of the emitted frequencies with the peak echolocation frequencies of target species. The implementation of multi-frequency signal generation modes and the development of adaptive operational algorithms based on preliminary site-specific fauna monitoring are proposed. It is recommended to combine ultrasonic systems with curtailment strategies (turbine shutdown during peak risk periods) to ensure maximum biodiversity protection.

The article presents the results of a two-stage bioacoustic testing of an ultrasonic deterrent device of the «SuperCat-1000» type, aimed at assessing its effectiveness for minimizing the risk of bat collisions with wind energy installations. The primary tests showed that the signal of the device within the range of 34–37, 44–48 kHz does not overlap the main echolocation frequencies of the pygmy pipistrelle Pipistrellus pygmaeus (56–72 kHz), which confirms the absence of a noticeable influence on the behaviour of this species. After modification (adjustment of the range to 23–30 kHz), the device was adapted to the frequencies of the Nyctalus noctula. As a result, a decrease in its activity was recorded: the number of registrations within the action zone of the deterrent decreased from twelve (during periods when the device was turned off) to seven (during periods when the device was turned on) for equal time intervals. The obtained results confirm the potential effectiveness of ultrasonic deterrent devices as a local technical means for minimizing the influence of wind energy installations on bats. It is noted that the effectiveness of the device has a species-specific character and depends on the frequency adjustment, signal intensity, environmental conditions, and spatial activity of the animals. The introduction of a multi-frequency mode adapted to the echolocation ranges of specific bat species occurring in the area of wind energy installations, as well as further testing of the device under various altitudes and weather conditions, is proposed. The combination of ultrasonic systems with operational restrictions of wind turbines and preliminary monitoring of the local fauna is recommended.

Key words: *monitoring, environmental assessment, biodiversity conservation, bats, repellent, wind energy.*

Вступ

Активне розгортання вітроенергетичних проєктів в Україні супроводжується зростанням антропогенного навантаження на популяції рукокрилих, що входять до складу чутливих груп фауни та виконують важливу екосистемну функцію природного контролю комах-фітофагів. Однією з ключових проблем є зіткнення рукокрилих із лопатями ВЕУ, особливо в період активної міграції та під час інтенсивного полювання на комах. Попри впровадження стандартних заходів мінімізації впливу (зупинка чи гальмування ВЕУ в пікові години активності), рівень загибелі рукокрилих залишається високим, що вимагає пошуку додаткових технічних рішень.

Розробка систем відлякування рукокрилих у межах вітрових електростанцій (ВЕС) є відносно новим напрямком, у якому досі немає усталених практик в Україні. Частина досліджень зосереджена на використанні ультрафіолетового (УФ) освітлення, як потенційного відлякувального чинника. Польовий експеримент на Гаваях засвідчив зниження активності кажанів на 44% при застосуванні тьмяного УФ-світла, попри збільшену кормову базу (Gorresen et al., 2015). Натомість, випробування безпосередньо поблизу ВЕУ продемонстрували відсутність статистично значущого ефекту, а, в окремих випадках, навіть тенденцію до приваблення тварин (Cryan et al., 2022). Національна лабораторія відновлюваної енергії зазначає, що гіпотеза про використання ультрафіолетового світла для порушення візуальної привабливості ВЕУ для кажанів залишається непідтвердженою та непереконливою на практиці (National……, 2024). Це свідчить про неоднозначність УФ-методу та необхідність глибшого аналізу видоспецифічної реакції.

Найбільшу увагу в наукових працях приділяють ультразвуковим відлякувачам, однак результати випробувань залишаються фрагментарними. У Пенсильванії у перший рік роботи системи зафіксовано зниження смертності на 21–51%, але у наступний сезон статистично значущого ефекту не виявлено (Arnett et al., 2013). Подальша апробація імпульсних систем від General Electric показала складність їхнього налаштування та відсутність переваг над простішими стаціонарними відлякувачами (AWWI …, 2018). У штаті Іллінойс середній рівень зниження смертності становив 29%, але ефективність суттєво коливалась залежно від виду та року спостережень (Romano et al., 2019). Таким чином, ультразвукові технології демонструють потенціал, але залишаються нестабільними у практичному застосуванні.

Окремі дослідження були спрямовані на порівняльну оцінку різних технологій впливу на поведінку кажанів. Зокрема, порівняння ультразвукових та радарних систем показало значно вищу ефективність акустичного впливу (приблизно 80% зниження активності), тоді як радар не спричиняв жодних змін у поведінці тварин (Gilmour et al., 2020). Експерименти у контрольованих умовах підтвердили, що ультразвукові відлякувачі можуть змінювати траєкторію польоту у рукокрилих, а їх реакція є різною залежно від виду, статі та сезону (Fritts et al., 2024). Це піднімає питання про необхідність адаптивних, видоспецифічних систем відлякування замість універсальних рішень.

Паралельно з технологічними підходами активно розвивається напрям обмеження роботи турбін (гальмування або зупинка). Польові дані з Хорватії засвідчили зниження смертності на 78% при зупинці або зміні режиму роботи турбін у періоди високої активності кажанів (Rnjak et al., 2023). Додатковим перспективним напрямом досліджень є оцінка впливу безпілотних літальних апаратів: стандартні мультикоптерні дрони мали виражений відлякувальний ефект, тоді як легкі LTA-платформи (БПЛА легші за повітря) не впливали на поведінку тварин (Roswag et al., 2025). Глобальний огляд сучасних практик підтверджує, що саме обмеження «curtailment» (гальмування чи тимчасова зупинка ВЕС) залишаються оптимальною стратегією зі зменшення смертності, тоді як ефективність акустичних і оптичних відлякувачів поки що залишається дискусійною (Voigt et al., 2025).

Метою роботи є оцінка біоакустичних параметрів ультразвукового відлякувача типу «СуперКіт-1000» та визначення його потенціалу для подальшої інтеграції у систему мінімізації ризику зіткнень рукокрилих з вітроенергетичними установками (ВЕУ).

Для досягнення мети поставлено завдання:

1. Здійснити біоакустичне вимірювання частотного спектра випромінювання пристрою «СуперКіт-1000».

2. Порівняти параметри сигналу відлякувача з діапазонами ехолокаційних сигналів рукокрилих, характерних для фауни України.

3. Зафіксувати наявність або відсутність поведінкової реакції різних видів рукокрилих у зоні дії пристрою.

4. Провести повторне випробування удосконаленої версії відлякувача, адаптованої під *Nyctalus noctula*, для визначення видоспецифічної реакції.

5. Окреслити перспективи доопрацювання конструкції та частотних характеристик пристрою для потенційного використання у межах вітроенергетичних об'єктів.

Матеріал і методи

Випробування відлякувача «СуперКіт-1000» (рис. 1; виробник ФОП Паламарчук Сергій Миколайович) проводилися з використанням біоакустичного модуля Echo Meter Touch 2 Pro, який дозволяє фіксувати ультразвукові сигнали з частотою до 192 кГц і високою роздільною здатністю часово-частотного аналізу. Записи виконувалися з використанням програмного забезпечення Echo Meter Touch та Kaleidoscope Lite із візуалізацією хвильових форм та побудовою сонограм для подальшого аналізу частотного спектра.

Перший етап експерименту (серпень 2023 року). Польові дослідження проведено в лісостеповій зоні на межі агроландшафту та соснового лісового масиву, поблизу якого розташовані невеликі водойми. Обрана ділянка характеризується сприятливими умовами для концентрації рукокрилих. У межах радіуса 20 км вітроенергетичні установки відсутні, що виключало вплив техногенних ультразвукових перешкод.

Дослідження здійснювали з 21:15 до 23:00 у серпневу ніч 2023 року за сприятливих погодних умов (температура повітря +22 °C, безвітряно, без опадів).

Відлякувач «СуперКіт-1000» розміщували на висоті 1 м над поверхнею ґрунту, а детектор – на відстані 5 м від джерела ультразвуку.

Для визначення дальності поширення сигналу проводили серію тестів на різних дистанціях – 2, 5, 10, 15, 20, 25 і 30 метрів. На кожній із точок фіксували рівень інтенсивності сигналу та частотний діапазон.

Отримані дані аналізували спектрографічно, визначаючи реальний частотний діапазон роботи пристрою, стабільність сигналу та його затухання з відстанню.

Другий етап експерименту (липень 2024 року). З метою оцінки поведінкової реакції рукокрилих у зоні дії пристрою проведено короткотривале дослідження у міських умовах (м. Київ). Експеримент виконувався на 7-му поверсі житлової будівлі (орієнтовна висота 22 м) у нічний період із 21:30 до 23:30.

Тестували модифіковану версію відлякувача «СуперКіт-1000», налаштовану на частотний діапазон 23–30 кГц, який частково перекриває ехолокаційний спектр вечірниці рудої (*Nyctalus noctula*) – виду, що трапляється в межах діючої Овідіопольської ВЕС. Вечірниця руда за візуальними спостереженнями (під час сутінок) здійснює переміщення на висоті 15–100 метрів, що в зоні ризику лопастей ВЕУ, саме тому обрано *Nyctalus noctula* для проведення експерименту.

а) б)

Рис. 1. Відлякувач «СуперКіт-1000»: а) версія 2023 року, випромінювання частот 34–37, 44–48 кГц; б) версія 2024 року із зміненою частотою 23–30 кГц та більшою ємністю елементів живлення

Для підвищення ефективності пристрою виробником було збільшено потужність випромінювання та ємність акумулятора, що подовжило тривалість безперервної роботи.

Записи проводилися з чергуванням 10-хвилинних інтервалів увімкнення та вимкнення відлякувача, що дозволило оцінити зміну активності рукокрилих у присутності та відсутності звукового впливу.

Фіксацію сигналів рукокрилих здійснювали за допомогою Echo Meter Touch 2 Pro, а ідентифікацію видів – за допомогою внутрішньої бібліотеки програмного забезпечення, яка дозволяє автоматично розпізнавати види за характеристиками ультразвукових сигналів.

Методика досліджень не передбачала вилову тварин або прямого контакту з ними та відповідала вимогам Європейської конвенції про захист хребетних тварин, що використовуються для експериментальних і наукових цілей (1986) та стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2005 (2006).

Результати

Випробування №1 (2023 рік). За результатами спектрографічного аналізу встановлено, що пристрій «СуперКіт-1000» випромінює змінний ультразвуковий сигнал у двох діапазонах – 34–37 кГц та 44–48 кГц, із почерговим перемиканням між ними кожні 5–10 секунд. На момент перемикання спостерігалося короткочасне зниження інтенсивності сигналу, що добре фіксувалося в інтерфейсі програми Echo Meter Touch Pro (рис. 2).

Паралельно в межах ділянки реєструвалась активність рукокрилих, зокрема виду нетопир пігмей (*Pipistrellus pygmaeus*), ехолокаційні сигнали якого перебувають у діапазоні 56–72 кГц. Частотне розділення сигналів відлякувача та цього виду свідчить про відсутність прямого накладання, а отже, відлякувач не впливав на активність *Pipistrellus pygmaeus*, який фіксувався протягом усього періоду спостережень.

Таким чином, сигнал «СуперКіт-1000» лише частково перекриває діапазони ехолокації окремих видів рукокрилих. Ймовірно, для частини видів це може створювати акустичний дискомфорт у безпосередній близькості до джерела сигналу, що потенційно призводить до уникнення зони дії приладу.

Проте отримані результати свідчать, що протестована версія пристрою не охоплює основний спектр частот, характерних для більшості видів рукокрилих фауни України. Отже, універсальне застосування таких пристроїв наразі є обмеженим, а ефективність їх роботи потребує індивідуального підбору

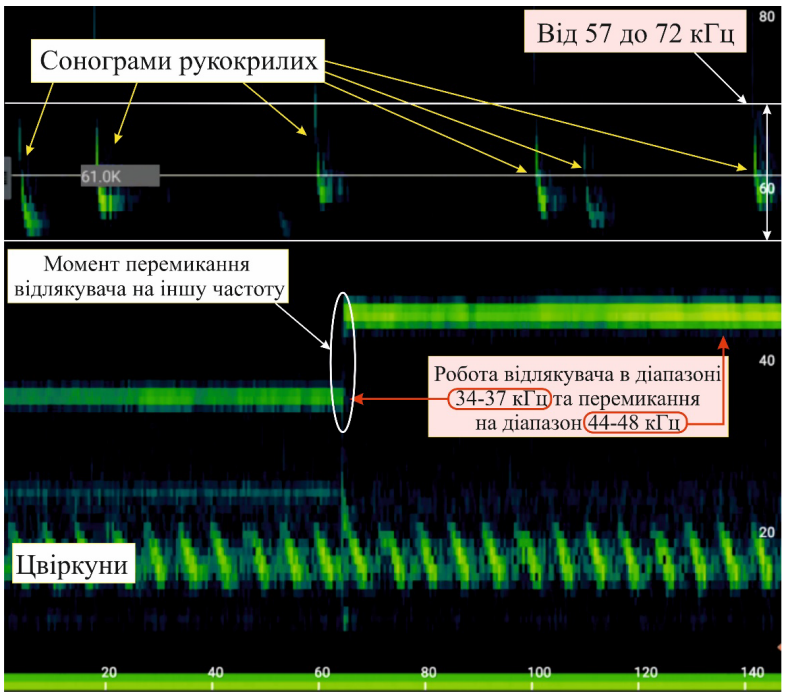


Рис. 2. Інтерфейс програми Echo Meter з ввімкненим відлякувачем та фіксацією нетопира пігмея (*Pipistrellus pygmaeus*)

частотного діапазону залежно від видового складу та біотопічних умов території.

Випробування №2 (2024 рік). Після аналізу попередніх результатів розробником було вдосконалено пристрій, зокрема, налаштований на постійне випромінювання у діапазоні 23–30 кГц, що відповідає частотам ехолокації виду вечірниця руда *Nyctalus noctula* – одного з найбільш уразливих видів у межах зон розташування ВЕС. Удосконалений прилад також характеризувався збільшеною потужністю та тривалістю автономної роботи (рис. 3).

У ході випробувань із використанням Echo Meter Touch Pro зафіксовано 19 сонограм вечірниці рудої *Nyctalus noctula* у період з 21:30 до 23:30. Із них:

– під час роботи відлякувача зареєстровано 7 записів, у яких спостерігалося значне зменшення кількості імпульсів;

– у періоди вимкнення пристрою (через кожні 10 хвилин) – 12 повноцінних записів, що вказує на підвищення активності виду у відсутність акустичного впливу.

Окремо проведено тест на дальність поширення сигналу. Максимальна ефективна зона дії пристрою становила до 15 м, на 20 м сигнал фіксувався слабко, а на 25 м і більше – не реєструвався.

Отримані результати свідчать, що ультразвуковий відлякувач «СуперКіт-1000», налаштований на частоти 23–30 кГц, знижує активність *Nyctalus noctula* у межах своєї дії. Це підтверджує потенційну можливість використання таких пристроїв як додаткового засобу зменшення ризику зіткнень рукокрилих із ВЕУ.

Водночас, ефективність відлякування залежить від потужності сигналу, висоти встановлення та типу середовища. З огляду на обмежену дальність дії (15–20 м), доцільним є проведення подальших довготривалих випробувань у різних типах ландшафтів, зокрема на мачтах і гондолах ВЕУ. Такі дослідження мають здійснюватися поза межами постійних оселищ рукокрилих, щоб уникнути негативного впливу на червонокнижні види.

Обговорення

Отримані результати біоакустичних випробувань ультразвукового відлякувача типу «СуперКіт-1000» свідчать про його роботу у високочастотному діапазоні 34–37 кГц та 44–48 кГц, який частково перекривається з діапазонами ехолокації окремих видів рукокрилих, однак не збігається з типовими частотами *Pipistrellus pygmaeus* (56–72 кГц). Це узгоджується з даними первинного експерименту 2023 року, коли в зоні дії пристрою активність цього виду залишалася стабільною, що свідчить про відсутність уникнення.

Додаткові тести 2024 року, проведені у міських умовах (м. Київ, 7 поверх, висота

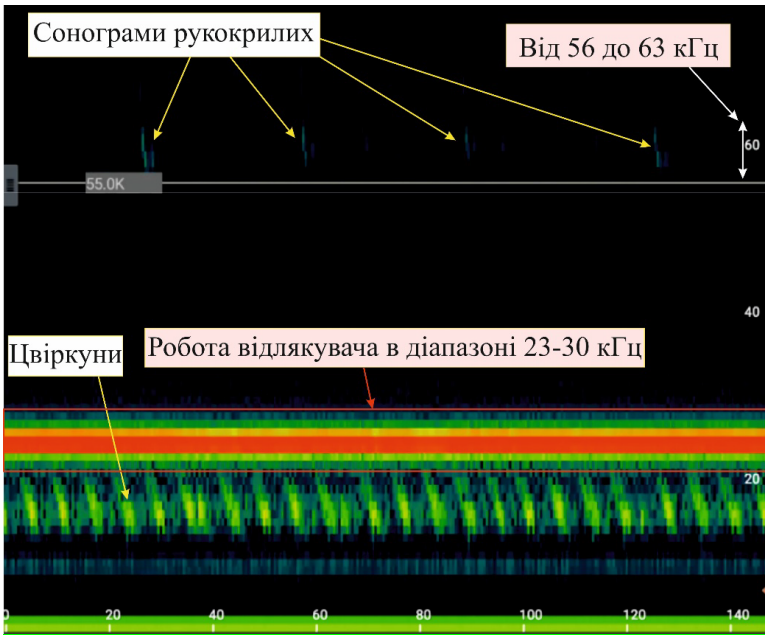


Рис. 3. Інтерфейс програми Echo Meter з ввімкненим відлякувачем (частота 23–30 кГц) та фіксацією нетопира пігмея (*Pipistrellus pygmaeus*)

22 м), виявили короткочасне зниження активності *Nyctalus noctula* у періоди безпосереднього вмикання пристрою на оновленій частоті відлякувача 23–30 кГц. Це може свідчити про потенційну ефективність приладу в зоні високої просторової активності виду, чутливого до низько- та середньочастотних ультразвукових сигналів. Водночас відновлення активності через 5–10 хвилин після вимкнення відлякувача вказує на тимчасовий характер ефекту.

Випробування на дальність поширення сигналу (до 30 м) показали поступове зниження інтенсивності ультразвуку вже після 15–20 м, що відповідає загальновідомим закономірностям затухання високочастотних хвиль у повітрі. Національна лабораторія відновлюваної енергії також визначила, що швидке загасання високочастотного ультразвуку є однією з основних причин змінної ефективності відлякувачів біля ВЕУ (National…., 2024). Таким чином, зона потенційного впливу пристрою в реальних умовах може обмежуватись радіусом до 20 м, чого є недостатньо для використання на конструкційних елементах сучасних турбін та є потреба тестувати потужніші відлякувачі, які охоплюватимуть більшу площу навколо ВЕУ.

Порівняння з результатами досліджень в інших країнах, показує, що ефективність ультразвукових відлякувачів суттєво варіює залежно від виду, середовища та конструкційних особливостей відлякувачів. Польові тести в Пенсильванії продемонстрували зниження смертності кажанів на 21–51%, але з великою річною мінливістю (Arnett et al., 2013), а дослідження К. Кінз'є та В. Романо виявили видоспецифічний ефект, найбільш помітний для великих мігруючих видів (Kinzie & Miller, 2018; Romano et al., 2019). Наприклад, С. Вівер та ін. підтвердили високу ефективність відлякувачів, які значно знижують смертність *Lasiurus cinereus* на 78,4% та *Tadarida brasiliensis* на 54,5% (Weaver et al., 2020). Водночас, Дж. Клерк та ін. встановили, що ультразвукові відлякувачі можуть подвоювати смертність високочастотних *Lasiurus borealis* і не мають універсальної ефективності для всіх видів, що підкреслює ризики неадаптованих рішень (Clerc et al., 2025). Подібні тенденції фіксувалися й у контрольованих експериментах, які підтверджують, що реакція кажанів залежить не лише від частоти, а й від інтенсивності сигналу та тривалості впливу (Fritts et al., 2024; Gilmour et al., 2020). Дослідження Л. Гілмур та ін. додатково показало загальне зниження активності кажанів на 30% у зоні дії відлякувача та суттєве зменшення прольотів для *Myotis* spp., *Nyctalus* spp. та *Eptesicus* spp. за рахунок маскування ехолокації (Gilmour et al., 2021).

Результати 2023–2024 років свідчать, що частотний діапазон «СуперКіт-1000» частково накладається на зону чутливості видів, що потенційно можуть гинути від зіткнень з лопатями ВЕУ в Україні (*Nyctalus noctula*, *Eptesicus serotinus*, *Vespertilio murinus*). Це відкриває потенціал для адаптації пристрою як елемента комплексної системи мінімізації ризиків зіткнення. Водночас для підвищення ефективності необхідна технічна модернізація – зокрема, створення багаточастотних модулів, здатних адаптуватися до видового складу місцевої фауни, виявленого під час моніторингу.

Як технологічну альтернативу, З. Зенг та А. Шарма представили нове та бюджетне рішення: ультразвуковий тональний генератор на основі аеродинамічних свистків (замість крихких електронних перетворювачів) (Zeng & Sharma, 2023). Ця конструкція, що використовує принцип резонансу Гельмгольца і охоплює діапазон 20–50 кГц, пропонує простішу в обслуговуванні альтернативу.

Д. Рн'як, С. Войгт та Дж. Клерк наголошують на обмеженій ефективності технологічних відлякувачів порівняно з «curtailment» – заходи тимчасової зупинки або гальмування ВЕУ (Rnjak et al., 2023; Voigt et al., 2024; Clerc et al., 2025). С. Войгт та ін. визначили, що «curtailment» протягом періодів високого ризику для рукокрилих має вищу ефективність аніж ультразвукові відлякувачі (Voigt et al., 2025). Однак застосування таких пристроїв у поєднанні з коригуванням режиму роботи турбін може значно зменшити ризик загибелі рукокрилих у нічний період активності.

Отже, результати двоетапного випробування ультразвукового відлякувача «СуперКіт-1000» в разі правильного його встановлення підтверджують його безпечність для більшості видів рукокрилих та подальшу придатність для модифікації під потреби вітроенергетичних об'єктів. Наступні етапи дослідження мають бути спрямовані на перевірку ефективності пристрою безпосередньо на ВЕУ та визначенні видоспецифічних реакцій у різних регіонах України.

Висновки

1. Первинне тестування ультразвукового відлякувача «СуперКіт-1000» показало, що сигнал пристрою у діапазоні 34–37 та 44–48 кГц не перекриває основні ехолокаційні частоти *Pipistrellus pygmaeus* (56–72 кГц). Активність цього виду залишалася стабільною в зоні дії пристрою, що свідчить про відсутність негативного впливу на його поведінку та полювання.

2. Друге випробування на частотах відлякувача 23–30 кГц підтвердило короткочасну поведінкову реакцію *Nyctalus noctula* на сигнал «СуперКіт-1000» (зниження кількості реєстрацій з 12 до 7 між періодами вимкнення та ввімкнення відповідно).

3. Тест на дальність поширення сигналу показав значне зниження інтенсивності ультразвуку після 15–20 м, що визначає практичний радіус дії пристрою. Це дозволяє розглядати його як придатний для встановлення на критичних елементах ВЕУ (гондолах або щоглах), але вимагає використання кількох модулів чи підвищення потужності таких відлякувачів.

4. Для підвищення ефективності ультразвукового відлякувача доцільно впровадити багаточастотний режим, який дозволить охопити чутливі діапазони конкретних видів рукокрилих, які зустрічаються в межах ВЕС (залежить від регіону). Такий режим має бути встановлений на основі даних попереднього моніторингу.

5. Використання ультразвукових відлякувачів має розглядатися як допоміжний технологічний захід у поєднанні з управлінськими методами керування роботою ВЕУ (обмеження обертання лопатей у пікові періоди активності рукокрилих), що може суттєво знизити рівень їхньої смертності.

6. Перед впровадженням подібних пристроїв на ВЕС рекомендовано здійснювати, щонайменше, річний акустичний моніторинг місцевих популяцій рукокрилих, з врахуванням сезонних і видових відмінностей, для оптимального налаштування частотного діапазону.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на:

– розширені польові випробування при різних погодних умовах та на різних висотах;

– визначення видоспецифічних реакцій рукокрилих у різних регіонах України;

– тестування ефективності приладу безпосередньо на ВЕУ в реальних умовах експлуатації.

Список використаної літератури

Arnett E. B., Hein C. D., Schirmacher M. R., Huso M. M., Szewczak J. M. Evaluating the effectiveness of an ultrasonic acoustic deterrent for reducing bat fatalities at wind turbines. *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8. №. 6. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065794.

AWWI technical report: Evaluating a commercial-ready technology for raptor detection and deterrence at a wind energy facility in California. American Wind Wildlife Institute, 2018. 96 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.awwi.org/resources/dtbird-technical-report/ (дата звернення: 27.09.2025).

Clerc J., Huso M., Schirmacher M., Hein C. Ultrasonic deterrents provide no additional benefit over curtailment in reducing bat fatalities at an Ohio wind energy facility. *PLoS ONE*. 2025. Vol. 20. №. 5. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318451.

Cryan P. M., Gorresen P. M., Straw B. R., Thao S., DeGeorge E. Influencing Activity of Bats by Dimly Lighting Wind Turbine Surfaces with Ultraviolet Light. *Animals*. 2022. Vol. 12. №. 1. https://doi.org/10.3390/ani12010009.

Fritts S., Guest E., Weaver S., Hale A., Morton B., Hein C. Experimental trials of species-specific bat flight responses to an ultrasonic deterrent. *Peer J*. 2024. Vol. 12. e16718. https://doi.org/10.7717/peerj.16718.

Gilmour L. R. V., Holderied M. W., Pickering S. P., Jones G. Comparing acoustic and radar deterrence methods as mitigation measures to reduce human-bat impacts and conservation conflicts. *PLoS ONE*. 2020. Vol. 15. №. 2. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228668.

Gilmour L. R. V., Holderied M. W., Pickering S. P., Jones G. Acoustic deterrents influence foraging activity, flight and echolocation behaviour of free-flying bats. *Journal of Experimental Biology*. 2021. Vol. 224. №. 20. https://doi.org/10.1242/jeb.242715.

Gorresen P. M., Cryan P. M., Dalton D. C., Wolf S., Bonaccorso F. J. Ultraviolet vision may be widespread in bats. *Acta Chiropterologica*. 2015. Vol. 17. №. 1. P. 193–198. https://doi.org/10.3161/15081109ACC2015.17.1.017.

Kinzie K. W., Miller M. F. Ultrasonic Bat Deterrent Technology: Technical Report. Niskayuna : General Electric Company, 2018. 12 p. [Електронний ресурс]. URL: https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Kinzie-Rominger-2018.pdf (дата звернення: 17.10.2025).

National Renewable Energy Laboratory. Using ultraviolet light to deter bats from wind turbines : short science summary. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2024. [Електронний ресурс]. URL: https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/summaries/NREL-Wind-ECO-Wind-UV-Light-Bat-Deterrent.pdf (дата звернення: 17.10.2025).

Rnjak D., Janeš M., Križan J., Antonić O. Reducing bat mortality at wind farms using site-specific mitigation measures: a case study in the Mediterranean region, Croatia. *Mammalia*. 2023. Vol. 87. №. 3. P. 211–220. https://doi.org/10.1515/mammalia-2022-0100.

Romano W. B., Skalski J. R., Townsend R. L., Kinzie K. W., Coppinger K. D., Miller M. F. Evaluation of an Acoustic Deterrent to Reduce Bat Mortalities at an Illinois Wind Farm. *Wildlife Society Bulletin*. 2019. Vol. 43. №. 4. P. 608–618. https://doi.org/10.1002/wsb.1025.

Roswag A., Roswag M. S., Fietz J., Taefi T. T. Advancing bat monitoring: Assessing the impact of unmanned aerial systems on bat activity. *PLoS ONE*. 2025. Vol. 20. №. 1. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314679.

Voigt C. C., Bernard E., Huang J. C.-C., Frick W. F., Kerbiriou C., MacEwan K., Mathews F., Rodríguez-Durán A., Scholz C., Webala P. W., Welbergen J., Whitby M. Toward solving the global green–green dilemma between wind energy production and bat conservation. *BioScience*. 2024. Vol. 74. P. 240–252. https://doi.org/10.1093/biosci/biae023.

Voigt C. C., Scholz C., Klein H. Wind turbines displace bats from drinking sites. *Biological Conservation*. 2025. Vol. 302. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.110968.

Weaver S. P., Hein C. D., Simpson T. R., Evans J. W., Castro-Arellano I. Ultrasonic Acoustic Deterrents Significantly Reduce Bat Fatalities at Wind Turbines. *Global Ecology and Conservation*. 2020. Vol. 24. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01099.

Zeng Z., Sharma A. Aerodynamic-whistles-based ultrasonic tone generators for bat deterrence. *Physics of Fluids*. 2023. Vol. 35. №. 9. https://doi.org/10.1063/5.0160564.

References

Arnett, E.B., Hein, C.D., Schirmacher, M.R., Huso, M.M., & Szewczak, J.M. (2013). Evaluating the effectiveness of an ultrasonic acoustic deterrent for reducing bat fatalities at wind turbines. *PLoS ONE*, 8(6). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065794 [in English].

AWWI technical report. (2018). *Evaluating a commercial-ready technology for raptor detection and deterrence at a wind energy facility in California*. American Wind Wildlife Institute. [Electronic resource] URL: https://www.awwi.org/resources/dtbird-technical-report/ (access date 27.09.2025) [in English].

Clerc, J., Huso, M., Schirmacher, M., & Hein, C. (2025). Ultrasonic deterrents provide no additional benefit over curtailment in reducing bat fatalities at an Ohio wind energy facility. *PLoS ONE, 20(5)*. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318451 [in English].

Cryan, P.M., Gorresen, P.M., Straw, B.R., Thao, S., & DeGeorge, E. (2022). Influencing Activity of Bats by Dimly Lighting Wind Turbine Surfaces with Ultraviolet Light. *Animals*, 12(1), 1009. https://doi.org/10.3390/ani12010009 [in English].

Fritts, S., Guest, E., Weaver, S., Hale, A., Morton, B., & Hein, C. (2024). Experimental trials of species-specific bat flight responses to an ultrasonic deterrent. *PeerJ*, 12. https://doi.org/10.7717/peerj.16718 [in English].

Gilmour, L.R.V., Holderied, M.W., Pickering, S.P., & Jones, G. (2020). Comparing acoustic and radar deterrence methods as mitigation measures to reduce human-bat impacts and conservation conflicts. *PLoS ONE*, 15(2). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228668 [in English].

Gilmour, L.R.V., Holderied, M.W., Pickering, S.P., & Jones, G. (2021). Acoustic deterrents influence foraging activity, flight and echolocation behaviour of free-flying bats. *Journal of Experimental Biology*, 224(20). https://doi.org/10.1242/jeb.242715 [in English].

Gorresen, P.M., Cryan, P.M., Dalton, D.C., Wolf, S., & Bonaccorso, F.J. (2015). Ultraviolet vision may be widespread in bats. *Acta Chiropterologica*, 17(1), 193–198. https://doi.org/10.3161/15081109ACC2015.17.1.017 [in English].

Kinzie, K.W., & Miller, M.F. (2018). *Ultrasonic Bat Deterrent Technology: Technical Report*. Niskayuna: General Electric Company. [Electronic resource] URL: https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Kinzie-Rominger-2018.pdf (access date 17.10.2025) [in English].

National Renewable Energy Laboratory. (2024). *Using ultraviolet light to deter bats from wind turbines: short science summary*. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. [Electronic resource] URL: https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/summaries/NREL-Wind-ECO-Wind-UV-Light-Bat-Deterrent.pdf (access date 17.10.2025) [in English].

Rnjak, D., Janeš, M., Križan, J., & Antonić, O. (2023). Reducing bat mortality at wind farms using site-specific mitigation measures: a case study in the Mediterranean region, Croatia. *Mammalia*, 87(3), 211–220. https://doi.org/10.1515/mammalia-2022-0100 [in English].

Romano, W.B., Skalski, J.R., Townsend, R.L., Kinzie, K.W., Coppinger, K.D., & Miller, M.F. (2019). Evaluation of an Acoustic Deterrent to Reduce Bat Mortalities at an Illinois Wind Farm. *Wildlife Society Bulletin*, 43(4), 608–618. https://doi.org/10.1002/wsb.1025 [in English].

Roswag, A. et al. (2025). Advancing bat monitoring: Assessing the impact of unmanned aerial systems on bat activity. *PLoS ONE*, 20(1). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314679 [in English].

Voigt, C.C., Bernard, E., Huang, J.C.-C., Frick, W.F., Kerbiriou, C., MacEwan, K., Mathews, F., Rodríguez-Durán, A., Scholz, C., Webala, P.W., Welbergen, J., & Whitby, M. (2024). Toward solving the global green-green dilemma between wind energy production and bat conservation. *BioScience*, 74(4), 240–252. https://doi.org/10.1093/biosci/biae023 [in English].

Voigt, C.C., Scholz, C., & Klein, H. (2025). Wind turbines displace bats from drinking sites. *Biological Conservation*, 302. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.110968 [in English].

Weaver, S.P., Hein, C.D., Simpson, T.R., Evans, J.W., & Castro-Arellano, I. (2020). Ultrasonic Acoustic Deterrents Significantly Reduce Bat Fatalities at Wind Turbines. *Global Ecology and Conservation*, 24. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01099 [in English].

Zeng, Z., & Sharma, A. (2023). Aerodynamic-whistles-based ultrasonic tone generators for bat deterrence. *Physics of Fluids*, 35(9). https://doi.org/10.1063/5.0160564 [in English].

Отримано: 28.10.2025
Прийнято: 05.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

ЗМІСТ

БІОЛОГІЯ

І. Г. Власов. Аутекологічні та фітоценотичні особливості *Echinops exaltatus* schrad Західного Поділля……7

Л. М. Головатюк, О. В. Кратко, Т. О. Головатюк. Морфометрична характеристика судин мікрогемоциркуляторного русла слизової оболонки товстої кишки при ураженні піддослідних тварин тетрахлорметаном……15

А. Г. Гонтар, Т. С. Шарамок. Вплив фунгіцидів на смертність хижого клопа *Macrolophus pygmaeus*……22

М. Ю. Євтушенко, В. О. Демченко, Н. А. Демченко, В. М. Клименко. Огляд потенційних змін у репродуктивній функції риб Дніпровсько-Бузького лиману за дії важких металів в умовах підриву Каховської ГЕС……33

І. І. Ковальчук. Аналіз поведінки службових собак в умовах воєнних дій: досвід України……46

В. Ю. Мамченко. Біологічні та поведінкові особливості рятувально-пошукових собак……54

І. П. Онищук. Вплив шумового навантаження на адаптаційний потенціал здобувачів вищої освіти в умовах навчального середовища……69

М. М. Світельський, Н. С. Бордюг, О. Ф. Дунаєвська, О. М. Алпатова, І. М. Сокульський. Комплексна оцінка продуктивності та фармакопейних показників кореневої маси *Valeriana officinalis* L. при різних дозах мінеральних добрив в умовах полісся України……81

В. І. Щербак, Н. Є. Семенюк, О. А. Давидов, Ю. С. Шелюк. Просторово-часова динаміка альгоугруповань в експериментальних умовах……91

ГЕОГРАФІЯ

А. О. Гетьманенко, В. В. Яворська. Теоретико-методичні засади суспільно-географічного аналізу рекреаційно-туристичного потенціалу регіону……104

О. О. Ляшкова, В. І. Тригуб. Просторова організація медичного туризму в Україні, сучасний стан і тенденції……115

М. І. Хіміч. Оцінка природного аграрного потенціалу Івано-Франківської області……127

ХІМІЯ

Н. В. Кусяк, К. П. Свиридюк, О. В. Ходюк, А. П. Кусяк, П. П. Горбик. Сорбційні характеристики нанорозмірного Fe_3O_4 щодо імуноглобуліну людини IG……140

В. В. Листван. Модифікований метод Вільямсона у синтезі нових тіоетерів……150

АГРОНОМІЯ

Huang Chaolin, R. A. Yaroshchuk. Analysis of the benefits of green manure returning and its application in ecological farms……159

О. Г. Гудзенко, О. О. Іжболдін. Вплив передпосівної обробки насіння на біометричні показники й урожайність зерна гороху після різних попередників……175

В. В. Гура, В. О. Боровик, О. С. Дробіт. Особливості успадкування тривалості періоду вегетації сої овочевої гібридами F_3-F_4 за різних умов вирощування……183

О. М. Зубко, С. І. Бердін, М. О. Романенко. Вплив глибини й способу основного обробітку ґрунту на насіннєву продуктивність сої в північно-східному Лісостепу України……194

В. П. Іващук, К. С. Небаба. Вплив регуляторів росту й мінерального живлення на формування структурних елементів урожаю кукурудзи на зерно……202

В. В. Кецкало. Сорти салату посівного листкового *Lactuca sativa L. var. secalina* закордонної селекції та реалізація їх генетичного потенціалу в правобережному Лісостепу України..... 210

В. В. Осадчук, В. В. Мойсієнко. Оптимізація елементів технології вирощування гарбуза голозерного для виробництва олії в умовах Полісся..... 220

В. З. Панчишин, Б. В. Матвійчук, А. А. Мелешко, Л. А. Журавська, Л. М. Безверха. Вивчення параметрів листкової поверхні та залежностей індивідуальної продуктивності сої (*Glicine hispida*) залежно від сорту, протруєння та передпосівної інокуляції в умовах Полісся України..... 229

Л. А. Сергєєв, Т. Ю. Марченко, І. М. Когут, С. В. Почколіна, В. Д. Марченко. Урожайний потенціал сортів сочевиці залежно від елементів агротехнології за кліматичних змін..... 241

Я. Г. Цицюра. Системний аналіз головних компонент впливу тривалого застосування редьки олійної як проміжного сидерату на індекс якості ґрунту..... 250

ЕКОЛОГІЯ

I. V. Khomiak. Prospects and risks of using lunar regolith to form isolated ecosystems..... 270

Ю. С. Вакал, С. В. Мацак, Є. І. Безбородова. Комплексне дослідження гідрохімічних показників річки Сумка в межах Сумського регіону..... 279

О. О. Єфремова, Н. Г. Міронова, А. О. Дячук, О. П. Матеюк, С. М. Шевченко. Удосконалення системи управління твердими побутовими відходами у Хмельницькій області як чинника екологічної безпеки з урахуванням досвіду Північного Рейну-Вестфалії (Німеччина)..... 289

О. Є. Іванченко, Ю. Л. Рибак, А. М. Пугач, Г. Є. Токарчук. Особливості ландшафтної організації та видове різноманіття деревних насаджень парку воїнам АТО м. П'ятихатки Дніпропетровської області..... 302

О. В. Іщук, О. М. Василенко. Оцінка екологічного стану річки Сейм у контексті транскордонного забруднення..... 316

Ю. О. Карпенко, В. О. Свердлов. Параметри навколишнього середовища як базові компоненти формування звітних документів стратегічної екологічної освіти технічної документації територіальних громад..... 328

О. М. Крайнюков, І. А. Кривицька, В. Л. Самохвалова, Б. Ю. Матісько, В. М. Філатов. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів у межах Берестинського району Харківської області..... 337

В. О. Пінчук, Ю. В. Подоба, О. В. Тертична. Екологічні перспективи утилізації стічної води тваринництва..... 347

О. Ф. Рильський, Ю. Ю. Петруша, К. О. Домбровський. Носії для іммобілізації мікробіоти в технологіях очищення стічних вод..... 359

К. В. Чікірякін, О. В. Шестопалов. Науково-методичне обґрунтування індексу екологічної культури як інтегрального показника сталого розвитку суспільства..... 374

В. С. Яненко, А. В. Клепко. Оцінка ефективності ультразвукового відлякувача рукокрилих для мінімізації ризиків їх зіткнень з вітроенергетичними установками..... 383