

ISSN 2786-6955

UDC 57:577:60:602:614

BHT ¹ 2026

BIOTA. HUMAN. TECHNOLOGY

International Scientific Journal

Electronic Edition





BHT

2026 | 1

International Scientific Journal

This is an international open-access, peer-reviewed electronic journal founded by the T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”.

The Journal publishes original research papers, review articles and short communication papers in the fields of Biology and Biochemistry, Biotechnology and Bioengineering, Public Health, as well as in areas related to bioecological and biomedical aspects of the application of Food and Chemical technologies.

The journal Biota. Human. Technology is included in the List of specialized scientific publications of Ukraine (category “B”) in biological and technical sciences, in specialties **091 (Biology and biochemistry)**, **101 (Ecology)**, **161 (Chemical technologies and engineering)** (the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 220 of February 21, 2024), **181 (Food technologies)** (the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 582 of April 24, 2024).

Responsibility for facts, quotations, private names, enterprises and organizations titles, geographical locations etc. to be barred by the authors.

The Editorial Office and Board do not always share the views and thoughts expressed in the articles published.

The journal is governed by the provisions of an open permissive license [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](#)

Journal is indexed in databases and search engines:

Crossref ROAD WorldCat Simon Fraser University Library

V.I. Vernadskiy National Library of Ukraine DOAJ

Google Scholar ICI Journals Master List

Languages: English, Polish, Ukrainian

Frequency: 3 numbers a year

Founder: T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”

Publisher: T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”

Address of Editorial Office: 53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Tel. +38(067)507-8805 (Oleksandr Lukash)

Email: bht.journal.nuchc@gmail.com

EDITORIAL BOARD

Oleksandr V. LUKASH
(Editor-in-Chief)

Doctor of Biological Sciences, Professor, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium", Ukraine

Iryna M. KURMAKOVA
(Deputy Editor-in-Chief)

Doctor of Technical Sciences, Professor, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium", Ukraine

Olena S. BONDAR

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium", Ukraine

Vasyl V. HRUBINKO

Doctor of Biological Sciences, Professor, Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

Yuri O. KARPENKO

Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium", Ukraine

Natalia M. KURHALUK

Doctor of Biological Sciences, Professor Pomeranian University in Słupsk, Poland

Anatoliy LEVANETS

PhD in Biological Sciences, Senior Lecturer, North-West University, South Africa

Olga B. MEKHED

Doctor of Pedagogical Sciences, Ph.D. in Biological Sciences, Professor, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium", Ukraine

Halina M. TKACZENKO
(Deputy Editor-in-Chief)

Doctor of Biological Sciences, Professor, Pomeranian University in Słupsk, Poland

Natalia V. TKACHUK
(Deputy Editor-in-Chief, Managing Editor)

Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium", Ukraine

Tetiana V. MOROZOVA

Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor, State Scientific Institution "Institute of Ecological Restoration and Development of Ukraine", Ukraine

Magdalena PIEKUTOWSKA,

PhD Eng, Assistant Professor, Pomeranian University in Słupsk, Słupsk, Poland

Anita Y. SZIKURA

Ph.D. in Biological Sciences, Professor, Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University, Ukraine

Oleksandr I. YAKOVENKO

Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium", Ukraine

Liubov B. ZELENA

Ph.D. in Biological Sciences, Senior Research Fellow, D.K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, NAS of Ukraine, Ukraine

Foreword

from the Editor-in-Chief

There is no need to convince readers of the first our issue that the natural environment is created and maintained by living organisms, the totality of which is biota. The study of the diversity of living, which began since the day of Hippocrates, Aristotle, and Theophrastus, has not lost its relevance in the modern scientific world.

In the 21st century, the search for scientists in quite diverse - from inventory species diversity of ecosystems to the study of adaptation mechanisms of organisms and biota metagenomic studies.

The biota, for which there are no administrative boundaries, compensates for any environmental disturbances that do not exceed the threshold of destruction of the biota itself. This implies the need for international cooperation in various fields of living research. In order to bring together scholars who study different aspects of biotic potential of the environment and its conservation, we are launching the international scientific journal *Biota. Human. Technology*. We are the part of the Editorial Board of the Journal attracted scientists from different countries, who carry out scientific research in various fields of Biology and Biochemistry, Biotechnology and Bioengineering, Public Health, as well as in areas related to bioecological and biomedical aspects of the application of Food and Chemical technologies.

We expect from our potential authors original articles dedicated to the results of diverse studies of living matter at different levels of the organization - from molecular to biosphere. We welcome both experimental and review articles dedicated to the study of biodiversity of flora, fauna, and microbiota; the functioning of biological and ecological systems, including under the influence of stress factors; current issues in technologies related to healthy nutrition and chemistry; research integrity, including ethical aspects, transparency, and reproducibility of scientific results. The *BHT Journal* pages always have a place to cover the results of scientific discussions which were made by researchers from all the world.

Respectfully Yours,
Prof. O. Lukash



CONTENTS

PHYTOBIOTA ФІТОБІОТА

Vitalii Morskyi

**ANALYSIS OF THE ACCLIMATIZED ORNAMENTAL INTRODUCED
WOODY PLANTS FLORA OF CHERNIHIV'S GREEN INFRASTRUCTURE**

Vitaliй Морський

**АНАЛІЗ ФЛОРИ АКЛІМАТИЗОВАНИХ ДЕКОРАТИВНИХ ІНТРОДУКОВАНИХ
ДЕРЕВНИХ РОСЛИН ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЧЕРНІГОВА**

[in English]

-12-

Iryna Myshiliuk, Alina Zhuk

**ВИДОВА СТРУКТУРА ДЕНДРОФЛОРИ ЗАКЛАДІВ ДОШКІЛЬНОЇ ОСВІТИ
МІСТА ЧЕРНІВЦІ ЯК ЧИННИК ФОРМУВАННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ**

Iryna Myshiliuk, Alina Zhuk

**SPECIES COMPOSITION OF THE DENDROFLORA IN PRESCHOOL EDUCATIONAL
INSTITUTIONS IN CHERNIVTSI CITY AS A DRIVER OF ECOSYSTEM SERVICES**

[in Ukrainian]

-28-

ZOOBIOTA ЗООБІОТА

Ishtvan Zhelitski

**GROWTH AND SEXUAL DIMORPHISM OF CRANIOMETRIC MEASUREMENTS OF
THE RED FOX (*VULPES VULPES* L.) IN TRANSCARPATHIA**

Іштван Желіцькі

**РІСТ ТА СТАТЕВИЙ ДИМОРФІЗМ КРАНІОМЕТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
ЛИСИЦІ ЗВИЧАЙНОЇ (*VULPES VULPES* L.) НА ЗАКАРПАТТІ**

[in English]

-43-

 **ENVIRONMENTAL POLLUTION** 
STRESSES AND ORGANISMS' RESPONSE

**СТРЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ
ТА РЕАКЦІЯ ОРГАНІЗМІВ**

Лідія Полотнянко, Дмитрій Філоненко

**БІОХІМІЧНІ МАРКЕРИ ТОКСИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА
АДАПТАЦІЙНИХ РЕАКЦІЙ СТАВКОВИХ РИБ ЗА ДІЇ МІКОТОКСИНІВ**

Lidiia Polotnianko, Dmytrii Filonenko

**BIOCHEMICAL MARKERS OF TOXIC LOAD AND ADAPTATIVE
REACTIONS OF POND FISH TO MYCOTOXINS**

[in Ukrainian]

-51-

Юлія Ступак

**СЕЗОННА ДИНАМІКА ФЕНОФАЗ *ULMUS PUMILA* L. В СИСТЕМІ ЗАХИСНИХ
НАСАДЖЕНЬ М. ЧЕРНІГОВА (2023–2025 РР.)**

Yuliia Stupak

**SEASONAL DYNAMICS OF *ULMUS PUMILA* L. PHENOPHASES
IN THE PROTECTIVE STANDS OF CHERNIHIV
(2023–2025)**

[in Ukrainian]

-61-

Марина Ячна

**ЗМІНИ ДЕЯКИХ ПОКАЗНИКІВ ЛІПІДНОГО ОБМІНУ ТА АКТИВНОСТІ
ЛУЖНОЇ ФОСФАТАЗИ У КОРОПА ЛУСКАТОГО (*CYPRINUS CARPIO* L.)
ЗА УМОВ КОМБІНОВАНОГО ВПЛИВУ ГЕРБІЦИДІВ І СОЛЕЙ ЦИНКУ**

Maryna Yachna

**CHANGES IN SELECTED LIPID METABOLISM PARAMETERS AND ALKALINE
PHOSPHATASE ACTIVITY IN COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIO* L.)
UNDER COMBINED EXPOSURE TO HERBICIDES AND ZINC SALTS**

[in Ukrainian]

-73-

Тетяна Шарамок, Дмитро Журавльов, Ганна Тункіна

**ХРОНІЧНИЙ ВПЛИВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА РЕПРОДУКТИВНУ СИСТЕМУ
ТА ПЛОДЮЧІСТЬ *POECILIA RETICULATA***

Tetiana Sharamok, Dmytro Zhuravlov, Hanna Tunkina

**THE CHRONIC EFFECTS OF THE HEAVY METALS ON REPRODUCTIVE SYSTEM AND
FERTILITY OF *POECILIA RETICULATA***

[in Ukrainian]

-81-



MAN AND HIS HEALTH

ЛЮДИНА ТА ЇЇ ЗДОРОВ'Я

Liudmyla Khrokalo, Uliana Volova, Margaryta Skiba

**DEVELOPMENT OF SILVER-SNAIL MUCUS NANOSYSTEM AND
ITS INCORPORATION INTO A MULTIFUNCTIONAL
BURN-HEALING CREAM-GEL**

Людмила Хрокало, Уляна Волова, Маргарита Скиба

**РОЗРОБКА НАНОСИСТЕМИ СРІБЛА НА СЛИЗУ РАВЛИКА ТА
ЇЇ ВКЛЮЧЕННЯ ДО МУЛЬТИФУНКЦІОНАЛЬНОГО КРЕМ-ГЕЛЮ
ДЛЯ ЛІКУВАННЯ ОПІКІВ**

[in English]

-91-

*Nataliia Tkachuk, Liubov Zelena, Ivan Shkardybarda,
Dmytro Nikolaienko, Nataliia Demchenko*

**SANITARY-HYGIENIC, CLINICAL-IMMUNOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL RISKS
OF WET WIPES IN PUBLIC HEALTH CONTEXT**

*Наталія Ткачук, Любов Зелена, Іван Шкардибарда,
Дмитро Ніколаєнко, Наталія Демченко*

**САНІТАРНО-ГІГІЄНИЧНІ, КЛІНІКО-ІМУНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ
ВОЛОГИХ СЕРВЕТОК У КОНТЕКСТІ ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я**

[in English]

-100-

Ruslan Aminov

EFFECT OF LEECH EXTRACT ON LYMPHOCYTES IN THERMAL BURNS

Руслан Амінов

ВПЛИВ ЕСТРАКТУ П'ЯВКИ НА ЛІМФОЦИТИ ПРИ ТЕРМІЧНИХ ОПІКАХ

[in English]

-121-

Anna Apetsko, Natalia Kurhaluk, Halina Tkaczenko

RELATIONSHIP BETWEEN RUFFIER INDEX-DERIVED FITNESS LEVELS AND RESTING CARDIOVASCULAR PERFORMANCE IN YOUNG ADULTS

Анна Апецько, Наталія Кургалюк, Галина Ткаченко

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК РІВНЯ ФІЗИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ЗА ІНДЕКСОМ РУФ'Є З ПОКАЗНИКАМИ СЕРЦЕВО-СУДИННОЇ СИСТЕМИ У МОЛОДИХ ДОРОСЛИХ

[in English]

-128-

 **BIOTA AND ANTHROPOGENIC** 
TRANSFORMATION OF ECOSYSTEMS

**БІОТА ТА АНТРОПОГЕННА
ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕКОСИСТЕМ**

Наталія Бублієнко, Оксана Салавор, Оксана Ничик, Ольга Тогачинська

**КОМПЛЕКСНА УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ ПЛОДООВОЧЕВОГО ВИРОБНИЦТВА ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАНОВОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ**

Natalia Bublienko, Oksana Salavor, Oksana Nychyk, Olga Togachynska

**COMPLEX DISPOSAL OF FRUIT AND VEGETABLE WASTE
USING METHANE FERMENTATION**

[in Ukrainian]

- 141 -

**Андрій Котельчук, Олена Бондар, Ірина Курмакова,
Леонід Котельчук, Світлана Ткаченко**

**ЯКІСТЬ ПІДЗЕМНИХ ВОДОЗАБОРІВ НІЖИНСЬКОГО РАЙОНУ
ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ**

*Andrij Kotelchuk, Olena Bondar, Iryna Kurmakova,
Leonid Kotelchuk, Svitlana Tkachenko*

**QUALITY OF GROUNDWATER INTAKES OF VILLAGES NIZHYN DISTRICT
(CHERNIGIV REGION)**

[in Ukrainian]

- 150 -

Володимир Черкудінов, Юлія Зеленько

**ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НАФТОПРОДУКТІВ
ЗА ЕКОЛОГІЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ**

Volodymyr Cherkudinov, Yuliia Zelenko

**OPTIMIZATION OF ROAD TRANSPORTATION OF PETROLEUM PRODUCTS
ACCORDING TO ENVIRONMENTAL CRITERIA**

[in Ukrainian]

- 159 -



FOOD TECHNOLOGIES

AND HUMAN HEALTH

**ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ**

Oleksandr Batrachenko, Mykola Todorov

**DEVELOPMENT OF A RISK-BASED APPROACH TO
MEAT PRODUCT SAFETY**

Oleksandr Batrachenko, Mykola Todorov

**РОЗВИТОК РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ДО
БЕЗПЕЧНОСТІ М'ЯСНИХ ПРОДУКТІВ**

[in English]

- 170 -

Олександр Василик, Едуард Городецький

**ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДУБОВИХ МАТЕРІАЛІВ
І КОНТРОЛЬОВАНОЇ МІКРООКСИГЕНАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИТРИМКИ
УКРАЇНСЬКИХ ЧЕРВОНИХ ВИН**

Oleksandr Vasylyk, Eduard Gorodetsky

**USE OF ALTERNATIVE OAK MATERIALS AND CONTROLLED MICROOXIGENATION
IN THE AGEING TECHNOLOGY OF UKRAINIAN RED WINES**

[in Ukrainian]

-182-

 **CHEMICAL TECHNOLOGIES AND** 
BIOGEOCHEMICAL PROCESSES

**ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
БІОГЕОХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ**

Олена Кізюн, Валерій Зажигалов, Ігор Умно́в, Інна Трус

**ВПЛИВ УМОВ ПРОВЕДЕННЯ ФОТОКАТАЛІТИЧНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ
ПАРАЦЕТАМОЛУ ТА ДИКЛОФЕНАКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ TiO_2 І ZnO**

Olena Kiziun, Valery Zazhigalov, Igor Ymnov, Inna Trus

**THE INFLUENCE OF PHOTOCATALYTIC DEGRADATION CONDITIONS OF
PARACETAMOL AND DICLOFENAC USING TiO_2 AND ZnO**

[in Ukrainian]

- 197 -

Ярослав Поплавський, Віктор Янченко

СУЧАСНІ СТРАТЕГІЇ СИНТЕЗУ ЗАМІЩЕНИХ ВІНІЛСУЛЬФОНІВ

Yaroslav Poplavskiy, Viktor Yanchenko

MODERN SYNTHETIC STRATEGIES FOR SUBSTITUTED VINYL SULFONES

[in Ukrainian]

- 210 -

 **RESEARCH INTEGRITY** 
ДОБРОЧЕСНІСТЬ У ДОСЛІДЖЕННЯХ

Олександр Лукаш, Аніта Сікура, Ольга Мехед, Світлана Стрілець

**MANOVA ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОБРОЧЕСНОСТІ
МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Oleksandr Lukash, Anita Szikura, Olha Mekhed, Svitlana Strilets

**MANOVA AS A TOOL FOR ENSURING THE INTEGRITY OF
BIO-MEDICAL AND ENVIRONMENTAL RESEARCH**

[in Ukrainian]

- 226 -

 **INSTRUCTIONS FOR AUTHORS** 
КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ

- 236 -



ΡΗΥΤΟΒΙΟΤΑ

ΦΙΤΟΒΙΟΤΑ





Copyright (c) 2026 Vitalii Morskyi

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Vitalii Morskyi

ANALYSIS OF THE ACCLIMATIZED ORNAMENTAL INTRODUCED WOODY PLANTS FLORA OF CHERNIHIV'S GREEN INFRASTRUCTURE



Віталій Морський

АНАЛІЗ ФЛОРИ АКЛІМАТИЗОВАНИХ ДЕКОРАТИВНИХ ІНТРОДУКОВАНИХ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЧЕРНІГОВА

ABSTRACT

The study is focused on a comprehensive floristic evaluation of acclimatized ornamental introduced woody plants within the green infrastructure of Chernihiv.

The aim of the work is to assess the current state and determine the prospects for sustainable urban greening of Chernihiv in the context of climate change by analyzing the systematic, geographical, biomorphological and ecological structure of the flora of acclimatized ornamental introduced woody plants.

Methodology. The research was conducted during 2023–2025 across various functional zones of Chernihiv's green infrastructure. The object of study is the acclimatized ornamental introduced woody plants flora. The methodology integrated floristic inventorying (WFO standard), geographical analysis based on the homoclimatic principle, ecological assessment using USDA Hardiness Zones, and invasive risk evaluation following established regional criteria.

Scientific novelty. For the first time, a detailed analysis of the ornamental introduced flora of Chernihiv has been performed, accounting for the massive influx of modern cultivars in the 21st century. The study identifies specific biological indicators of regional climate warming (successful acclimatization of USDA Zone 6A-7A species) and establishes a correlation between the duration of a species' introduction and its invasive potential. The functional role of various functional zones as refugia for climate-resilient exotics is substantiated.

Conclusions. The flora is represented by 115 species, 2 subspecies, and 79 cultivars from 30 families, among which *Rosaceae* and *Fabaceae* predominate. Geographical structure is led by North American (34.78 %) and East Asian (25.22 %) groups. It was found that invasive potential is characteristic primarily of "legacy" species (pre-20th century), while modern cultivars remain ecologically safe. The thriving of taxa like *Sequoiadendron giganteum* and *Hibiscus syriacus* confirms a shift in climate boundaries. Future development of Chernihiv's green infrastructure, according to the 2016 Greening Concept, should prioritize technogenically resilient hybrids and climate-plastic exotics from the 5th and 6th USDA zones.

Key words: dendroflora of Chernihiv, green infrastructure, plant introduction, urban flora, USDA hardiness zones

АНОТАЦІЯ

Дослідження зосереджено на всебічній флористичній оцінці акліматизованих декоративних інтродукованих деревних рослин у межах зеленої інфраструктури Чернігова.

Метою роботи є оцінити сучасний стан та визначити перспективи сталого міського озеленення Чернігова в умовах змін клімату шляхом аналізу систематичної, географічної, біоморфологічної та екологічної структури флори акліматизованих декоративних інтродукованих деревних рослин.

Методологія. Дослідження проводилося протягом 2023–2025 років у різних функціональних зонах зеленої інфраструктури м. Чернігова. Об'єктом вивчення є флора акліматизованих декоративних інтродукованих деревних рослин. Методологія інтегрувала флористичну інвентаризацію (стандарт WFO), географічний аналіз на основі гомокліматичного принципу, екологічну оцінку за зонами зимостійкості USDA та оцінку інвазійного ризику за встановленими регіональними критеріями.

Наукова новизна. Вперше проведено детальний аналіз декоративної інтродукованої флори Чернігова з урахуванням масового припливу сучасних культиварів у XXI столітті. Виявлено специфічні біологічні індикатори регіонального потепління клімату (успішна акліматизація видів зон USDA 6A-7A) та встановлено зв'язок між тривалістю інтродукції виду та його інвазійним потенціалом. Обґрунтовано функціональну роль різних зон як рефугіумів для кліматично стійких екзотів.

Висновки. Флора представлена 115 видами, 2 підвидами та 79 сортами з 30 родин, серед яких переважають *Rosaceae* та *Fabaceae*. У географічній структурі лідирують північноамериканська (34,78 %) та східноазійська (25,22 %) групи. Встановлено, що інвазійний потенціал характерний переважно для «історичних» видів (до XX ст.), тоді як сучасні культивари залишаються екологічно безпечними. Процвітання таких таксонів, як *Sequoiadendron giganteum* та *Hibiscus syriacus*, підтверджує зміщення кліматичних меж. Майбутній розвиток зеленої інфраструктури Чернігова, згідно з Концепцією озеленення 2016 року, має базуватися на пріоритетному використанні техногенно стійких гібридів та кліматично пластичних екзотів 5-ї та 6-ї зон USDA.

Ключові слова: дендрофлора Чернігова, зелена інфраструктура, зони зимостійкості USDA, інтродукція рослин, урбанофлора

Introduction

Ornamental introduced woody plants in urban environments are non-native trees and shrubs intentionally planted for aesthetic appeal, providing crucial ecosystem services like air purification, temperature regulation, and biodiversity enhancement, while also offering structural beauty and habitat. Sjöman et al. (2024) identify a list of current and future challenges that can affect urban trees, including climate change (drought, heat, flooding, storms, wildfires), pests and pathogens, and urban development.

The careful species selection is vital to match urban stresses and avoid invasive potential (Opalko et al., 2025). In arid climate conditions, ornamental woody plants must tolerate an arid climate, high summer heat, low rainfall, and salinized soils, adapting by shortening vegetation periods; *Ulmus pumila* L., *Populus alba* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall, and *Maclura pomifera* (Raf.) C. K. Schneid. are highly resilient for mass planting, while other species need intensive care, with successful landscaping relying on selecting species with strong stress resistance for microclimate improvement, air purification, and aesthetic appeal (Kurbaniyazov et al., 2025). For Nordic urban green infrastructures, stress resistance (salt, drought, pollution) and genetic diversity are prioritized when selecting trees, with an emphasis on species that thrive in specific harsh urban conditions, such as paved areas (Sæbø et al., 2005).

In urban environments with moderate (temperate) climates, acclimatized introduced woody plants must balance aesthetic value with the ability to withstand unique man-made stressors while providing ecosystem services (Calfapietra et al., 2015; Vogt et al., 2017; Strashok et al., 2025). Global climate change stimulates migration, which increases the number of introduced plant species, as well as those with a status of rarity (Nuzhyna et al., 2023). Esperon-Rodriguez et al. (2024) demon-

strate how using urban tree inventories and climate risk metrics can aid in the identification of vulnerable species and locations at high climate risk to prioritise areas for monitoring and assist urban planning.

According to some authors, urban areas are richer in many soil nutrients compared to the surrounding semi-urban and rural habitats and thus facilitate the establishment of non-native plants in urban areas (Zhu & Carreiro, 2024). Results from other studies showed that most of the woody species of urban environment require sites medium-poor to medium-rich in nutrients (Horvat et al., 2024).

Sjöman et al. (2024) identify a list of current and future challenges that can affect urban trees, including climate change (drought, heat, flooding, storms, wildfires), pests and pathogens, and urban development.

Thus, a comprehensive flora analysis of acclimatized ornamental introduced woody plants is crucial for creating resilient urban landscapes in temperate zones. This involves taxonomic and biomorphological assessment to ensure structural diversity, ecological analysis to match species with specific urban microclimates, and chronological data to track long-term adaptation. Integrating this multi-faceted floristic evaluation enables proactive urban planning and the selection of plants that thrive amidst environmental shifts.

The green infrastructure of modern cities serves as a critical biological filter and a vital component of urban resilience (EUR-Lex, n.d.). In the context of the temperate zone, the city of Chernihiv represents a unique model for studying urban flora due to its historical green heritage and evolving environmental conditions. The structure of Chernihiv's urban flora and its native components were extensively documented by Zavyalova (2010, 2012a, 2012b), establishing a baseline for botanical diversity. Subsequent research by Pototska (2011) transitioned the focus toward the dendroflora, providing a comprehensive evaluation of gymnosperms and the general state of green spaces in the region.

The management and optimization of these resources have been addressed through various lenses, from the historical restoration of the Regional Botanical Garden (Karpenko & Pototska, 2012) to the development of the «Concept for the Chernihiv city greening» (Pototska, 2017). Recent scientific efforts have increasingly pivoted toward the challenges of the 21st century. Studies by Karpenko et al. (2023, 2025) and Pototska et al. (2025) have explored the ecosystem services provided by street plantings and the physiological adaptation of introduced trees to rapid climate shifts. Furthermore, the emergence of invasive strategies among ornamental species has highlighted the need for rigorous biosecurity management (Lukash et al., 2024a).

Despite this extensive body of work, there remains a critical need for a specialized floristic analysis focused specifically on acclimatized ornamental introduced woody plants. While general dendroflora is documented, a multifaceted analysis encompassing systematic, geographical, biomorphological, ecological, and chronological dimensions of these “immigrant” species has not been fully realized. Understanding the chronological success of past introductions in relation to their current ecological performance is essential for predicting the future stability of urban forests. Therefore, this study aims to fill this gap by providing a comprehensive floristic evaluation of introduced woody taxa, ensuring that Chernihiv’s green infrastructure remains functional and aesthetically valuable amidst ongoing climatic and anthropogenic transformations.

The aim of this study is to assess the current state and determine the prospects for sustainable urban greening of Chernihiv in the context of climate. To achieve this aim, the following objectives were defined:

- to inventory and update the systematic structure of introduced woody taxa in the city’s main green spaces;
- to analyze the species based on their geographical origin and biomorphological traits to identify dominant adaptive types;
- to perform an ecological assessment of the current state of these plants in relation to modern urban stressors (soil compaction, climate aridization);
- to conduct a chronological analysis of introduction periods to determine the long-term success and longevity of various species;

- to identify promising «future-proof» species for the optimization of Chernihiv’s green infrastructure under ongoing climate change.

Materials and methods

The study was conducted during 2023–2025 across the green infrastructure of Chernihiv (Northern Ukraine), encompassing various functional zones: natural-landscape cores (e.g. Regional Landscape Park “Yalivshchyna”, Boldyna Gora), street plantings, and residential areas. The object of the study is the flora of 105 taxa (species and cultivars) of ornamental introduced woody plants. Based on the research results using information sources (Marshall, 2009; Shynder et al., 2020; Davydov, 2020b; San-Miguel-Ayanz, 2021; Slyusar, 2021; Zaimenko et al., 2022; Ebben, 2025), the flora summary was compiled (Morskyi & Lukash, 2026).

The research methodology integrated several analytical approaches.

Floristic inventory. Species identification was performed using standard botanical methods, with nomenclature updated according to The World Flora Online (WFO, 2025).

The floristic analysis was conducted using the approaches outlined by Fiaschi et al. (2023).

Systematic and biomorphological analysis. Taxa were classified into families and life forms (trees, shrubs, vines) based on their habit and structural characteristics in urban conditions.

Geographical analysis. The geographical analysis of the flora was conducted by identifying chorological groups and range types according to the methodological principles developed by Kleopov (1990) for the deciduous forest zone. Additionally, the classical phytogeographical structuring approaches of A. I. Tolmachev were applied, following their modern interpretation and implementation in the study of regional Ukrainian floras by Yarova and Fedoronchuk (2015). Depending on their origin, species are divided into North American, East Asian, Western and Central European, and other groups.

Ecological and climate assessment. Tolerance to urban stressors (soil compaction, pollution, pH) was evaluated based on field observations using information sources (Marshall, 2009; Shynder et al., 2020; Davydov, 2020a; San-Miguel-Ayanz, 2021; Slyusar, 2021; Zaimenko et al., 2022; Ebben, 2025). Climate resilience was assessed according to the USDA Plant Hardiness Zones (USDA, 2023).

Chronological analysis. The timing of introduction was established through the documentation of the Municipal Enterprise “Zelenbud” of the Chernihiv City Council and the Educational and Scientific Station of the T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”, as well as oral reports and personal information.

Invasiveness of plant species was evaluated based on original field observations and the regional assessments by Zavyalova (2012) and Lukash et al. (2024a, 2024b), following the fundamental conceptual framework for naturalization and invasion stages defined by Richardson et al. (2000) and the standardized environmental impact classification proposed by Blackburn et al. (2014).

Strategic evaluation. The findings were synthesized with the framework of the “Concept for the Chernihiv city greening” (Karpenko et al., 2016) to formulate future management recommendations.

Results and discussion

Analysis of the systematic structure of the decorative introduced dendroflora of Chernihiv indicates a fairly high level of taxonomic diversity. The list of taxa (Table 1) includes 30 families, 70 genera, 115 species, 2 subspecies and 79 cultivars. The leading species richness are *Rosaceae* (27 species), *Fabaceae* (11 species), *Cupressaceae* (10 species) and *Pinaceae* (9 taxa).

A key feature of the modern green infrastructure is the significant saturation with ornamental cultivars (varieties), particularly within the genera *Spiraea*, *Physocarpus*, *Juniperus*, and *Thuja*. For instance, the genus *Spiraea* is represented by highly adaptive taxa such as *S. japonica* with numerous cultivars (*‘Goldmound’*,

‘Magic Carpet’, etc.), while the genus *Juniperus* demonstrates broad biomorphological diversity from prostrate forms (*J. horizontalis*) to upright columnar types (*J. scopulorum*). The presence of rare and highly decorative taxa like *Metasequoia glyptostroboides*, *Sequoiadendron giganteum*, and various *Magnolia* species indicates a high level of successful acclimatization and a shift toward increasing the bio-aesthetic potential of the city's green zones.

The systematic structure of Chernihiv's ornamental introduced dendroflora is characterized by a distinct dominance of several key families. The *Rosaceae* family acts as the absolute leader, represented by highly functional and decorative genera such as *Spiraea*, *Cotoneaster*, *Prunus*, and *Malus*. The *Cupressaceae* family forms the backbone of the city's evergreen coniferous infrastructure, while *Fabaceae* (notably *Robinia*, *Gleditsia*, and *Amorpha*) plays a crucial role in maintaining soil fertility through nitrogen fixation and ensuring high resistance to urban stressors. The *Sapindaceae* family is also significant, primarily through the wide use of *Acer* and *Aesculus* species.

A defining characteristic of the current flora is its extensive cultivar diversity. Taxa such as *Physocarpus opulifolius* (6+ cultivars) and *Thuja occidentalis* (6+ cultivars) demonstrate high intra-specific variety, which is critical for modern landscape design and architectural zoning. Furthermore, the successful cultivation of exotic “relicts” like *Sequoiadendron giganteum* and *Metasequoia glyptostroboides* in Chernihiv serves as a powerful indicator of either shifting climate zones or the creation of favorable microclimatic urban niches that allow for high levels of physiological adaptation.

Table 1

The list of the acclimatized ornamental introduced woody plants of the Chernihiv's green infrastructure flora

Families	Species, subspecies, cultivars
<i>Anacardiaceae</i> R.Br.	<i>Cotinus coggygria</i> Scop. <i>Rhus typhina</i> L.
<i>Araliaceae</i> Juss.	<i>Hedera helix</i> L.
<i>Berberidaceae</i> Juss.	<i>Berberis thunbergii</i> DC., <i>B. thunbergii</i> ‘Admiration’, ‘Atropurpurea Nana’, ‘Golden Rocket’, ‘Orange Rocket’, ‘Red Rocket’, ‘Maria’, ‘Green Ornament’
<i>Betulaceae</i> Gray	<i>Betula utilis</i> D.Don
<i>Bignoniaceae</i> Juss.	<i>Campsis radicans</i> (L.) Seem. ex Bureau <i>Catalpa bignonioides</i> Walter <i>C. bignonioides</i> ‘Nana’
<i>Buddlejaceae</i> K.Wilh.	<i>Buddleja davidii</i> Franch.

Families	Species, subspecies, cultivars
<i>Buxaceae</i> Dumort.	<i>Buxus sempervirens</i> L.
<i>Caprifoliaceae</i> Juss.	<i>Kolkwitzia amabilis</i> Graebn. <i>Lonicera caprifolium</i> L. <i>L. italica</i> Schm., <i>L. notha</i> Zabel, <i>L. tatarica</i> L. <i>Weigela florida</i> (Bunge) A.DC., <i>W. florida</i> 'Red Prince', 'Lucifer'
<i>Celastraceae</i> R.Br.	<i>Euonymus fortunei</i> (Turcz.) Hand.-Mazz., <i>E. fortunei</i> 'Emerald Gaiety'
<i>Cornaceae</i> Bercht. ex J.Presl	<i>Cornus alba</i> L., <i>C. alba</i> 'Elegantissima'
<i>Cupressaceae</i> Gray <i>Cupressaceae</i> Gray	<i>Juniperus chinensis</i> L., <i>J. chinensis</i> 'Kuriwao Gold', 'Stricta', 'Stricta' <i>J. horizontalis</i> Moench, <i>J. horizontalis</i> 'Prince of Wales', 'Lime Glow', 'Blue Chip' <i>J. × pfitzeriana</i> (Späth) P.A.Schmidt 'Old Gold', 'Daub's Frosted', 'Golden Saucer', 'Mint Julep' <i>J. sabina</i> L., <i>J. sabina</i> 'Tam No Blight', 'Tamariscifolia' <i>J. scopulorum</i> Sarg. 'Skyrocket' <i>J. virginiana</i> L., <i>J. virginiana</i> 'Hetz' <i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu & W.C.Cheng <i>Sequoiadendron giganteum</i> (Lindl.) J.Buchholz <i>Thuja occidentalis</i> L. <i>Th. occidentalis</i> 'Smaragd', 'Little Gem', 'Danica', 'Miky', 'Globosa', 'Woodwardii', 'Smaragd' <i>Thuja plicata</i> Donn ex D.Don
<i>Fabaceae</i> Juss.	<i>Amorpha fruticosa</i> L. <i>Caragana arborescens</i> Lam. <i>Cercis canadensis</i> L. <i>Colutea arborescens</i> L. <i>Cladrastis canadensis</i> Mill. <i>C. kentukea</i> (Dum.Cours.) Rudd (<i>Cladrastis lutea</i> Neogenyton) <i>Gleditsia triacanthos</i> L. <i>Laburnum anagyroides</i> Medik. <i>Robinia pseudoacacia</i> L., <i>R. pseudoacacia</i> 'Umbraculifera' <i>Robinia viscosa</i> Michx. ex Vent. <i>Wisteria frutescens</i> (L.) Poir.
<i>Fagaceae</i> Dumort.	<i>Quercus palustris</i> Münchh., <i>Q. palustris</i> 'Green Pillar' <i>Q. rubra</i> L.
<i>Hydrangeaceae</i> Dumort.	<i>Deutzia scabra</i> Thunb. <i>Hydrangea paniculata</i> Siebold, <i>H. paniculata</i> Siebold 'Pinky Winky', 'Polar Bear', 'Sandae Fraise', 'Vanille Fraise' <i>Philadelphus coronarius</i> L.
<i>Juglandaceae</i> DC. ex Perleb	<i>Juglans mandshurica</i> Maxim.
<i>Magnoliaceae</i> Juss.	<i>Liriodendron tulipifera</i> L. <i>Magnolia hybrida</i> Dippel 'Susan' <i>M. kobus</i> DC. <i>M. stellata</i> (Siebold & Zucc.) Maxim. 'Royal Star'
<i>Malvaceae</i> Juss.	<i>Hibiscus syriacus</i> L. <i>Tilia europaea</i> L., <i>T. europaea</i> 'Pallida', 'Zwarte Linde' <i>T. platyphyllos</i> Scop.
<i>Oleaceae</i> Hoffmanns. & Link	<i>Forsythia viridissima</i> Lindl. <i>Forsythia suspensa</i> (Thunb.) Vahl <i>Forsythia intermedia</i> Zabel <i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl, <i>F. angustifolia</i> 'Raywood' <i>F. pennsylvanica</i> Marshall <i>Ligustrum vulgare</i> L. <i>Syringa josikaea</i> J.Jacq. ex Rchb. <i>S. vulgaris</i> L.

Families	Species, subspecies, cultivars
<i>Phyllanthaceae</i> Martinov	<i>Securinega suffruticosa</i> (Pall.) Rehder
<i>Pinaceae</i> Spreng. ex Rudolphi	<i>Abies alba</i> Mill. <i>Larix decidua</i> (L.) Mill. <i>Picea abies</i> (L.) H.Karst. 'Nidiformis' <i>P. omorika</i> (Pančić) Purk. <i>P. pungens</i> Engelm., <i>P. pungens</i> 'Kaibab', 'Glauca' <i>Pinus banksiana</i> Lamb. <i>P. mugo</i> Turra 'Mughus', 'Varella' <i>P. nigra</i> J.F.Arnold subsp. <i>nigra</i> <i>P. strobus</i> L.
<i>Platanaceae</i> T.Lestib.	<i>Platanus hispanica</i> Münchh.
<i>Rosaceae</i> Juss.	<i>Amelanchier canadensis</i> (L.) Medik. <i>A. ovalis</i> Medik. <i>A. spicata</i> (Lam.) K.Koch <i>Chaenomeles japonica</i> (Thunb.) Lindl. ex Spach <i>C. speciosa</i> (Sweet) Nakai <i>Cotoneaster dammeri</i> C.K.Schneid., <i>C. dammeri</i> 'Major' <i>C. horizontalis</i> Decne. <i>C. acutifolius</i> Turcz. <i>C. × suecicus</i> G.Klotz 'Coral Beauty' <i>Dasiphora fruticosa</i> (L.) Rydb. (<i>Potentilla fruticosa</i> L.) <i>Malus hybrida</i> Loisel. 'Evereste' <i>M. toringo</i> Nakai 'Freja' <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim., <i>P. opulifolius</i> 'Dart's Gold', 'Red Baron', 'Red Esquire', 'Diabolo', 'Luteus', 'Midnight' <i>Prunus cerasifera</i> Ehrh., <i>P. cerasifera</i> 'Nigra' <i>P. cerasifera</i> subsp. <i>pissardii</i> (Carrière) Dostál
<i>Rosaceae</i> Juss.	<i>P. serotina</i> Ehrh. <i>P. serrulata</i> Lindl. 'Kanzan' <i>P. virginiana</i> L. <i>Pyracantha angustifolia</i> (Franch.) C.K.Schneid. <i>Rubus odoratus</i> L. <i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A.Braun, <i>S. sorbifolia</i> 'Sem' <i>Sorbus intermedia</i> Maly <i>S. quercifolia</i> hort. <i>Spiraea betulifolia</i> Pall. 'Island' <i>S. × cinerea</i> Zabel 'Grefsheim' <i>S. japonica</i> L.f., <i>S. japonica</i> 'Anthony Waterer', 'Candlelight', 'Golden Princess', 'Crispa', 'Goldmound', 'Magic Carpet' <i>S. vanhouttei</i> (Briot) Zabel
<i>Rutaceae</i> Juss.	<i>Phellodendron amurense</i> Rupr. <i>Ptelea trifoliata</i> L.
<i>Salicaceae</i> Mirb.	<i>Populus deltoides</i> W.Bartram ex Marshall <i>Salix alba</i> L. 'Chermesina <i>Salix integra</i> Thunb. 'Hakuro-Nishiki'
<i>Sapindaceae</i> Juss.	<i>Acer × freemanii</i> A.E.Murray 'Autumn Blaze', 'Celzam' <i>A. negundo</i> L., <i>A. negundo</i> 'Variegatum' <i>A. rubrum</i> L., <i>A. rubrum</i> 'Brandywine', 'Red Sunset', 'Redpointe', 'Sun Valley'
<i>Sapindaceae</i> Juss.	<i>A. saccharinum</i> L. <i>A. truncatum</i> Bunge 'Pacific Sunset' <i>Aesculus carnea</i> Zeyh. <i>A. hippocastanum</i> L.

Families	Species, subspecies, cultivars
Schisandraceae Blume	<i>Schisandra chinensis</i> (Turcz.) Baill.
Solanaceae Juss.	<i>Lycium barbarum</i> L.
Taxaceae Gray	<i>Taxus baccata</i> L., <i>T. baccata</i> 'Fastigiata Robusta'
Ulmaceae Mirb.	<i>Ulmus pumila</i> L.
Vitaceae Juss.	<i>Vitis amurensis</i> Rupr. <i>Parthenocissus quinquefolia</i> (L.) Planch

The analysis of the geographical structure of Chernihiv's ornamental introduced flora reveals a clear disproportion in the distribution of donor regions (Fig. 1). Species of North American origin are predominant (40 species; 34.78%), including *Robinia pseudoacacia*, *Gleditsia triacanthos*, *Acer saccharinum*, *Rhus typhina*, *Catalpa bignonioides*, *Prunus serotina*, *Sorbus quercifolia*, *Physocarpus opulifolius*, etc. This dominance aligns with the Zavyalova (2010) data and is scientifically grounded in the homoclimatic principle (Kuznetsov, 2008). According to Sjöman et al. (2024), the climatic parameters of Eastern North America (temperature amplitudes and precipitation patterns) closely mirror those of the temperate zone conditions, including Ukraine, providing these species with pre-adapted physiological mechanisms for successful naturalization.

Species of East Asian origin (29 species; 25.22%) serve as the second major pillar, contributing highly ornamental taxa such as *Magnolia kobus*, *Magnolia stellata*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Ginkgo biloba*, *Buddleja davidii*, *Weigela florida*, and *Hibiscus syriacus*. The predominance of introduced woody species of East Asian origin in the green infrastructure of Chernihiv is primarily attributed to the exceptionally high floristic diversity and broad ecological adaptations of the East Asian dendroflora as a whole. This phenomenon reflects the region's evolutionary history as a stable glacial refugium, which allowed for the preservation of numerous ancient lineages and the development of high adaptive plasticity (Marsh et al., 2009; Cires, 2018). Pototska (2012) highlights that Asian species often occupy specialized ecological niches in urban parks where they provide maximum aesthetic impact.

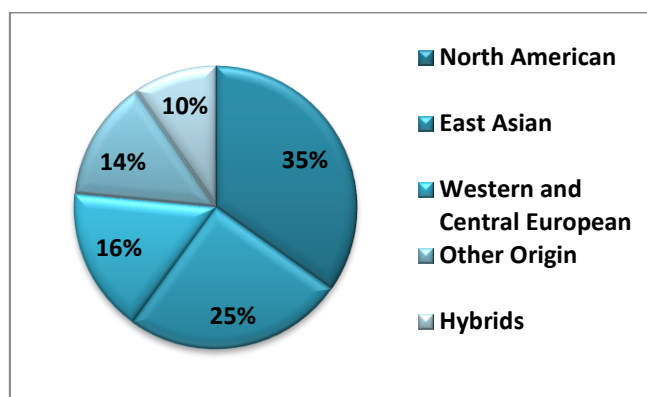


Fig. 1. Percentage distribution of geographical groups within the ornamental introduced dendroflora of Chernihiv.

The dominance of North American and East Asian species (combined 60%) highlights the effectiveness of the homoclimatic selection principle in urban greening

Crucially, the study identifies several minor geographical fractions, which, despite their low species count, add unique structural and biological diversity to the urban landscape: Western and Central European (*Juniperus sabina*, *Abies alba*, *Larix decidua*, *Laburnum anagyroides*, *Philadelphus coronaries*, *Tilia euro-*

paea, *T. platyphyllos*, *Syringa josikaea*, *Picea abies*, *P. omorika*, *Pinus nigra*), Balkan-Mediterranean (*Aesculus hippocastanum*, *Syringa vulgaris*, *Fraxinus angustifolia*), European-Siberian and Central Asian (*Caragana arborescens*, *Buxus sempervirens*, *Cotinus coggygria*, *Hedera helix*, *Colutea arborescens*), Far Eastern (*Schisandra*

chinensis, *Phellodendron amurense*, *Juglans mandshurica*), Himalayan and High-Mountain (*Betula utilis*).

The discussion also touches upon the increasing role of horticultural hybrids (11 taxa; about 10 %), such as *Juniperus × pfitzeriana*, *Acer × freemanii*, *A. truncatum*, *Platanus hispanica*, *Lonicera × notha*, *Aesculus carnea*, *Forsythia intermedia*, *Cotoneaster × suecicus*, *Malus hybrida* Loisel. ‘Evereste’, *Spiraea × cinerea*. These anthropogenic forms are prioritized in modern green infrastructure for their sterility and enhanced resistance to urban heat islands (Vogt et al., 2017). However, the invasive potential of certain North American species, such as *Acer negundo* and *Prunus serotina*, remains a point of concern (Lukash et al., 2024a). On the other hand, species that were

introduced at the end of the 20th century – the 21st century do not yet show invasive activity or “hide” it. For example, the *Robinia viscosa* artificial territorial isolation from natural plant communities (the default minimum population separation distance is 2 km: range 1.50–2.67 km) and very low generative potential in the conditions of introduction of the Chernihiv city’s green infrastructure do not allow this species to actively demonstrate invasive properties.

The chronological analysis of Chernihiv’s ornamental dendroflora reveals three distinct waves of introduction, each characterized by different ecological strategies and levels of biological risk. We have identified 3 introduction period in the Chernihiv city (Fig. 2).

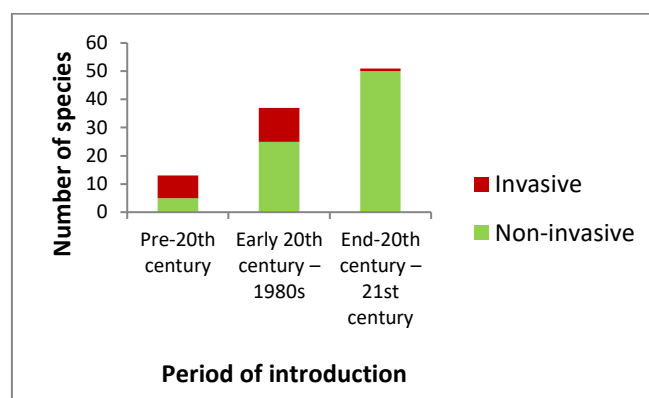


Fig. 2. Distribution of introduced woody species by periods of introduction and their invasive potential.

The height of the columns represents the total species richness, while the segments highlight the ratio of invasive to non-invasive taxa

1. The introduction “core” forming period (pre-20th century: mid-18th to late 19th centuries). This stage involves the establishment of historical species in Chernihiv – taxa with a long history of cultivation that formed the backbone of the urban landscape. Within this group, pioneer species such as *Robinia pseudoacacia*, *Acer negundo*, *Aesculus hippocastanum*, and *Syringa vulgaris* played a key role. These “pioneers” represent the first successfully introduced exotics, characterized by high ecological plasticity and the ability for rapid initial colonization of urban ecotopes. Critically, most currently identified invasive species belong to this early introduction group. Prolonged acclimatization (over 150 years of residence time) has allowed taxa like *Robinia pseudoacacia* and *Acer negundo* to fully overcome reproductive barriers and naturalize, often exhibiting aggres-

sive expansion into the spontaneous urban flora (Zavyalova, 2012a).

2. The Moderate introduction period (early 20th century – 1980s). This wave was dominated by functional resilience and mass-planting. Species like *Catalpa bignonioides*, *Quercus rubra*, *Fraxinus pennsylvanica*, *Rhus typhina*, and *Ulmus pumila* were introduced during this time. Today, many of these (marked “+” in the flora summary (Morskyi & Lukash, 2026) demonstrate high invasive potential, particularly *Quercus rubra* and *Fraxinus pennsylvanica*, which effectively outcompete native species in urban woodlands like “Yalivshchyna” (Karpenko et al., 2023; Lukash et al., 2024a).

According to a 2012 study by Karpenko and Pototska, the mid-20th century to 1980s in Chernihiv was characterized by a scientifically

driven approach to urban greening (Karpenko & Pototska, 2012). The establishment and development of the Chernihiv City Botanical Garden during this period were crucial for purposefully enriching the city's dendroflora (Karpenko & Pototska, 2012).

3. The Modern "cultivar explosion" (end-20th century – 21st century). The last 35 years are marked by a massive influx of decorative cultivars and exotic taxa (*Metasequoia*, *Sequoiadendron*, *Magnolia spp.*, and various cultivars of *Spiraea*, *Berberis*, and *Hydrangea*). Notably, none of the recently introduced cultivars currently demonstrate invasive potential. This is likely due to specialized breeding for sterility and their higher demands for maintenance. The successful presence of *Wisteria frutescens* and *Liriodendron* in Chernihiv is a direct result of recent climate warming, as noted by Karpenko et al. (2025).

The biomorphological structure of the acclimatized ornamental introduced woody plants flora of Chernihiv's green infrastructure (Fig. 3) ensuring multi-layered and structurally stable green infrastructure. The analysis reveals a balanced ratio between phanerophytes (trees) and nanophanerophytes (shrubs), with a minor but functional inclusion of lianes. Large trees (15–30 m) like *Quercus rubra*, *Acer saccharinum*, and *Gleditsia triacanthos* form the upper canopy and provide maximum shading. The middle layer (5–15 m) is dominated by highly decorative species such as *Catalpa bignonioides*, *Magnolia kobus*, and *Rhus typhina*. The lower layer (up to 2–3 m) consists of a wide variety of shrubs, primarily cultivars of *Spiraea*, *Berberis*, and *Physocarpus*, which are essential for architectural zoning.

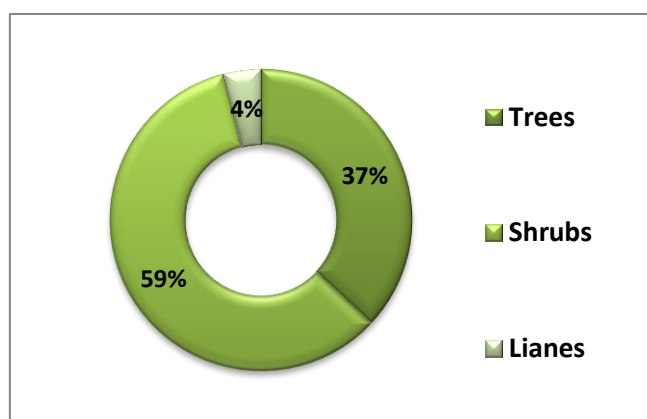


Fig. 3. Biomorphological structure of the introduced dendroflora of Chernihiv (calculated for 196 taxa, including 115 species, 2 subspecies and 79 cultivars). The dominance of shrubs (59%) reflects the modern trend towards high-density decorative landscaping using diverse cultivars

It should be noted the architectural diversity of crowns. A notable trend in Chernihiv's modern greening is the use of cultivars with specialized crown shapes. These range from columnar (*Juniperus scopulorum* 'Skyrocket', *Quercus palustris* 'Green Pillar') to globular (*Catalpa bignonioides* 'Nana', *Thuja occidentalis* 'Danica') and pendulous forms. This allows for precise landscaping in restricted urban spaces.

The acclimatized ornamental introduced woody plants flora of Chernihiv's green infrastructure characterized by phenological and aesthetic dynamics. The decorative appeal is maintained throughout the year. The early spring season is marked by the flowering of *Magnolia spp.* and *Prunus cerasifera*, while mid-summer is dominated by *Hibiscus syriacus* and

Buddleja davidii. Special attention is given to autumn coloration: taxa like *Rhus typhina*, *Acer rubrum*, *Cotinus coggygria*, and *Quercus rubra* provide vibrant red and gold accents, significantly enhancing the city's visual quality during the late vegetation period.

The structural beauty, e.g. winter ornamentation, of the dendroflora is supported by diverse bark textures (e.g., *Betula utilis*, *Phellodendron amurense*) and the persistence of fruits (e.g., *Symphoricarpos*, *Pyracantha*, *Catalpa* pods), ensuring that the green infrastructure remains aesthetically functional even during the dormant season.

Beyond their structural and ornamental roles, the introduced dendroflora of Chernihiv significantly enhances the city's green infra-

structure through its resource potential. According to Lukash et al. (2024b), the 18 of adventive tree and shrub species in the urban environment possesses medicinal properties. The integration of such multifunctional taxa into green spaces not only provides aesthetic and ecological benefits but also creates a valuable base for provisioning ecosystem services, further justifying the diversification of the city's green infrastructure dendrological assortment.

The analysis of ecological parameters indicates that Chernihiv's introduced flora is dominated by heliophytes (54 species; 47.0 %) and xeromesophytes (41 species; 35.7 %), representing a localized response to the «urban heat island» effect. This trend aligns with the findings of Calfapietra et al. (2015), who argued that urban environments act as a filter, favoring species with high transpiration efficiency.

Our findings regarding the prevalence of alkaliphilic species (*Syringa vulgaris*, *Gleditsia triacanthos*) corroborate the observations of Zavyalova (2010), who noted the high adaptive capacity of North American exotics in the carbonated soils of Polesia. This “alkaline shift” in urban environments, as discussed by Zhu & Carreiro (2024), provides a competitive niche for introduced taxa, while acidophilic species (*Acer rubrum*, *Abies alba*) remain confined to specialized park zones.

The exceptional gas tolerance of the North American fraction (e.g., *Thuja occidentalis*, *Picea pungens*, *Robinia pseudoacacia*) supports the plant selection for greening strategy proposed in the “Concept for the Chernihiv city greening” (Karpenko et al., 2016; Pototska, 2017). Furthermore, the use of pathogen-resistant cultivars (*Malus 'Evereste'*, *Aesculus × carnea*) represents a transition to “smart” green infrastructure, addressing the vulnerability of traditional urban trees to pests like the leaf miner, as highlighted in Karpenko et al. (2025).

Important are climate indicators – compliance with winter hardiness zones (USDA, 2023). The thriving of Zone 6A and 7A species (*Sequoiadendron giganteum*, *Hibiscus syriacus*, *Wisteria frutescens*) is the most significant point for discussion. Historically, such taxa were considered “risky” for Northern Ukraine. However, as demonstrated by Esperon-Rodriguez et al. (2022, 2024) and Karpenko et al. (2025), the shifting climate limits allow for the expansion of the decorative assortment. While the “iron fund” remains Zone 3–5 (e.g., *Thuja occidentalis*,

Abies alba, *Ulmus pumila*, *Aesculus hippocastanum*, *Acer × freemanii*), the integration of Zone 6–7 species marks a definitive biological marker of regional warming.

The spatial distribution of introduced woody plants in Chernihiv reflects a complex interplay between historical introduction efforts and contemporary ecological filtering.

Firstly, exotic refugia are a kind of “adaptive laboratories”. The concentration of rare exotics (*Metasequoia*, *Sequoiadendron*, *Wisteria*) in the “Yalivshchyna” park (Educational and Scientific Station of the T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”) is more than a botanical collection; it serves as a “testing ground” for climate resilience. The coexistence of these solitary “climate migrants” with massive naturalized communities of *Robinia pseudoacacia*, *Prunus serotina*, and *Prunus virginiana* suggests a dualistic role for such hubs: while they preserve high-value aesthetics, they also act as potential epicenters for biological invasions. In contrast, the use of *Cotinus coggygria* and *Lycium barbarum* on the Boldyna Gora and Yelets Gora slopes demonstrates a successful functional transition where ornamental plants fulfill critical anti-erosion roles, stabilizing the city's historical topography.

Secondly, invasive dendroflora corridors oppose ecological stability. The dominance of *Acer negundo* and *Amorpha fruticosa* in the Desna floodplains (Kordivka and Liskovytsia) highlights a significant management challenge. These riparian corridors facilitate the rapid spread of “legacy” species, which often outcompete native flora. This observation sparks a debate: should green infrastructure prioritize these highly adaptive “survivors” for their carbon sequestration, or should they be managed as threats to local biodiversity?

Thirdly, there is a shift towards “technogenic aesthetics”: In the city center, the replacement of traditional species with systematic group plantings of cultivars (*Thuja 'Smaragd'*, *Spiraea* hybrids) signals a shift toward high-density, low-maintenance landscaping. This trend reflects a pragmatic response to the harsh urban environment (soil compaction, radiant heat), where the reliability of a cultivar often outweighs the ecological benefits of a botanical species.

Fourthly, tree species provide peripheral reclamation of green infrastructure. The presence of *Ulmus pumila* along railways and *Lycium barbarum* in industrial zones (areas of the thermal power plant, former worsted and cloth mill and chemical fiber plant) underscores their role in technogenic stabilization. These hardy taxa act as “ecosystem engineers”, thriving where native species fail, thus providing essential green cover in degraded suburban peripheries.

Based on the results of this study and the comprehensive framework established in the “Concept for the Chernihiv city greening” (Karpenko et al., 2016), the enrichment of the city’s dendroflora should prioritize a transition from spontaneous naturalization to scientifically guided selection. Our analysis confirms that future prospects lie in the integration of highly decorative and technogenically resilient cultivars of the 5th and 6th USDA zones, which have already demonstrated successful acclimatization. Strategic enrichment should focus on expanding the use of climate-plastic taxa from the North American and East Asian fractions that provide maximum ecosystem services – such as thermal regulation and air purification – without posing an invasive risk. According to the 2016 Concept, prioritizing pathogen-resistant hybrids (e.g., *Aesculus × carnea*, *Acer × freemanii*) and relict exotics in protected microclimatic niches will not only increase biodiversity but also ensure the long-term biological stability of Chernihiv’s green infrastructure amidst ongoing climatic transformations.

Conclusions

The ornamental introduced dendroflora of Chernihiv’s green infrastructure is represented by 115 species, 2 subspecies, and 79 cultivars from 30 families. The systematic structure is

dominated by the *Rosaceae*, *Fabaceae*, and *Cupressaceae* families, which form the decorative and functional core of the city’s urban forest.

Geographical analysis reveals the dominance of North American (34.78 %) and East Asian (25.22 %) groups. The success of these “immigrant” species is scientifically grounded in the homoclimatic principle, where the climate of the donor regions matches the temperature and moisture regimes of Northern Ukraine.

Chronological monitoring identified three waves of introduction. It was established that invasive potential (e.g., *Acer negundo*, *Robinia pseudoacacia*, *Amorpha fruticosa*) directly correlates with the duration of stay in the region (the “lag phase”), while modern cultivars of the 21st century currently pose no biological risk.

The successful acclimatization of species from USDA Zones 6A and 7A (*Sequoiadendron giganteum*, *Hibiscus syriacus*, *Wisteria frutescens*) serves as a definitive biological indicator of regional climate warming. This shift allows for the expansion of the urban assortment to include more warm-temperate flora.

The biomorphological structure is characterized by a prevalence of shrubs (59 %) over trees, reflecting a modern trend toward high-density, cultivar-based landscaping. Spatially, the Regional Landscape Park “Yalivshchyna” remains the primary hub for acclimatization, while central urban zones are increasingly being optimized with technogenically resilient hybrids.

According to the “Concept for the Chernihiv city greening” (2016), the strategic perspective for enriching the city’s green infrastructure lies in the targeted use of pathogen-resistant cultivars and climate-plastic exotics that maximize ecosystem services while maintaining high aesthetic value.

Подяки / Acknowledgements

Автор висловлює подяку студентам природничо-математичного факультету Національного університету імені Т.Г. Шевченка «Чернігівський колегіум»: Анастасії Буренок, Марині Любко, Юлії Олексієнко, Ярославу Попелю, Анні Радченко, Вікторії Шумській, Анастасії Змеу за технічну допомогу під час дослідження / The author expresses his gratitude to the students of the Faculty of the Natural Sciences and Mathematics of the T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»: Anastasia Burenok, Marina Liubko, Yulia Oleksienko, Yaroslav Popelo, Anna Radchenko, Viktoriia Shumska, Anastasia Zmeu for technical assistance during the research.

Фінансування / Funding

Дослідження не отримало зовнішньої фінансової підтримки / The research received no external financial support.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Дані та матеріали, використані та проаналізовані в дослідженні, доступні у автора за обґрунтованим запитом / The data and materials used and analyzed in the study are available from the authors upon reasonable request.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Немає конфлікту інтересів / There is no competing interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Генеративний штучний інтелект застосовувався під час кількісних обрахунків даних конспекту флори та для перевірки правопису англійською мовою. Після використання цього інструменту автор ретельно переглянув та відредагував вміст за потреби та несе повну відповідальність за остаточну опубліковану версію / Generative Artificial Intelligence was used during quantitative calculations of flora synopsis data and for spell checking in English. Following the application of this tool, the author thoroughly reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the final published version.

References

Blackburn, T. M., Essl, F., Evans, T., Hulme, P. E., Jeschke, J. M., Kühn, I., Kumschick, S., Marková, Z., Mrugała, A., Nentwig, W., Pergl, J., Pyšek, P., Rabitsch, W., Ricciardi, A., Richardson, D. M., Sendek, A., Vilà, M., Wilson, J. R. U., Winter, M., & Bacher, S. (2014). A unified classification of alien species based on the magnitude of their environmental impacts. *PLoS Biology*, 12(5), Article e1001850. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001850>

Calfapietra, C., Peñuelas, J., & Niinemets, Ü. (2015). Urban plant physiology: adaptation-mitigation strategies under permanent stress. *Trends in Plant Science*, 20(2), 72–75. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.11.001>

Cires, E. (2018). Diversity and distribution of tree species in Asia. *Asian Journal of Botany*, 1(2). 1–5. <https://doi.org/10.24294/ajb.v1i2.834>

Davydov, D. A. (2020a). *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim. (*Rosaceae*) on the Left Bank of Ukraine: distribution, ecological and coenotic peculiarities. *Scientific Bulletin of Natural Sciences (Biological Sciences)*, 28, 23–32. <https://doi.org/10.32999/ksu2524-0838/2020-28-2> (in Ukrainian)

Давидов Д. А. *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim. (*Rosaceae*) на Лівобережжі України: поширення та еколого-ценотичні особливості. *Природничий альманах. Серія: біологічні науки*. 2020. Т. 28. С. 23–32. <https://doi.org/10.32999/ksu2524-0838/2020-28-2>

Davydov, D. A. (2020b). Syntaxonomy of anthropogenic forest communities of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Biology and Ecology*, 6(1–2), 8–18. <https://doi.org/10.33989/2020.6.1-2.225015> (in Ukrainian)

Давидов Д. А. Синтаксономія антропогенних деревних угруповань Лівобережного Лісостепу України. *Біологія та екологія*. 2020. Т. 6, №1–2. С. 8–18. <https://doi.org/10.33989/2020.6.1-2.225015>

- Ebben, B. V. (2025). *Trees since 1862*. <https://www.ebben.nl/en/about-ebben/trees-since-1862/>
- Esperon-Rodriguez, M., Gallagher, R.V., Souverijns, N., Lejeune, Q., Schleussner, C.-F., & Tjoelker, M.G. (2024). Mapping the climate risk to urban forests at city scale. *Landscape and Urban Planning*, 248, Article 105090. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105090>
- Esperon-Rodriguez, M., Tjoelker, M. G., Lenoir, J., Baumgartner, J. B., Beaumont, L. J., Nipperess, D. A., Alfonzetti, M., Andrew, N. R., & Gallagher, R. V. (2022). Climate change increases global risk to urban forests. *Nature Climate Change*, 12(11), 950–955. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01465-8>
- EUR-Lex (n.d.). Document 52013DC0249. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Green Infrastructure (GI) – Enhancing Europe’s Natural Capital [Access to European Union law]. *European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52013DC0249>
- Fiaschi, T., Fanfarillo, E., Maccherini, S., Bacaro, G., Bonari, G., Foggi, B., Peruzzi, L., Pinzani, L., Rosati, L., Scoppola, A., Viciani, D., & Angiolini, C. (2023). Effectiveness of different metrics of floristic quality assessment: The simpler, the better? *Ecological Indicators*, 149, Article 110151. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110151>
- Horvat, E., Šipek, M., & Šajna, N. (2024). Urban hedges facilitate spontaneous woody plants. *Urban Forestry & Urban Greening*, 96(12), Article 128336. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128336>
- Karpenko, Yu. O., Aravin, P. A., Sverdlov, V. O., & Pototska, S. O. (2025). Introduced dendroflora of the Chernihiv City and its adaptation to climate change. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Agronomy and Biology*, 60(2), 45–52. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2025.2.5> (in Ukrainian)
Карпенко Ю. О., Аравін П. А., Свєрдлов В. О., Потоцька С.О. Інтродукована дендрофлора міста Чернігів та її адаптація до зміни клімату. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агронімія та біологія*. 2025. С. Т. 60, № 2. С. 45–52. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2025.2.5>
- Karpenko, Yu. O., Lukash, O. V., Pototska, S. O., Zhilina, T. M., Yakovenko, O. I., & Ivus, T. I. (2016). *Development of a Concept for the Chernihiv city greening (Research report)*. Т. Н. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium” (in Ukrainian)
Розробка концепції по озелененню міста Чернігова: звіт про НДР / Ю. О. Карпенко та ін.; Нац. ун-т «Чернігівський колегіум» ім. Т. Г. Шевченка. Чернігів: [б. в.], 2016. 460 с.
- Karpenko, Yu. O., & Pototska, S. O. (2012). Chernihiv Regional Botanical Garden: history of creation, development, decline and restoration. *Plant Introduction*, (4), 59–63. <https://plantintroduction.org/index.php/pi/article/download/375/357> (in Ukrainian)
Карпенко Ю. О., Потоцька С. О. Чернігівський обласний ботанічний сад: історія створення, розвитку, занепаду та відновлення. *Інтродукція рослин*. 2012. № 4. С. 59–63. <https://plantintroduction.org/index.php/pi/article/download/375/357>
- Karpenko, Yu., Pototska, S., & Sverdlov, V. (2023). Vascular plants of the spontaneous flora of the regional landscape park «Yalivschina» (Chernihiv city). *Biota. Human. Technology*, 3, 7–18. <https://doi.org/10.58407/bht.3.22.1> (in Ukrainian)
Карпенко Ю., Потоцька С., Свєрдлов В. Вищі рослини спонтанної флори регіонального ландшафтного парку «Ялівщина» (м. Чернігів). *Biota. Human. Technology*. 2023. № 3. С. 7–18. <https://doi.org/10.58407/bht.3.22.1>
- Kleopov, Yu. D. (1990). Analysis of the flora of deciduous forests of the European part of the USSR. *Naukova Dumka* (in Russian)
Клеопов Ю.Д. Анализ флоры широколиственных лесов европейской части СССР. Киев: Наук. думка, 1990. 352 с.
- Kurbaniyazov, B., Matmuratov, M., Nagashybaeva, A., & Perdebaeva, G. (2025). Bioecological features of ornamental woody plants in the conditions of the city of Nukus. *BIO Web of Conferences*, 41, Article 01016. https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2025/41/bioconf_incobest2025_01016/bioconf_incobest2025_01016.html

Kuznetsov, S. (2008). Conceptional aspects of the introduction of trees and shrubs in modern conditions in Ukraine. *Plant Introduction*, 40, 29–33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2561439> (in Ukrainian).

Кузнєцов С. І. Концептуальні аспекти інтродукції дерев та кущів у сучасних умовах в Україні. *Інтродукція рослин*. 2008. № 40. С. 29–33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2561439>

Lukash, O., Miroshnyk, I., Morskyi, V., Stupak, Y., Aravin, M., Shakhnazarian, O., Sliuta, A., Sazonova, O., Strilets, S., & Szikura, A. (2024a). Ecological strategies of ornamental invasive tree and shrub species in Chernihiv's green Infrastructure. *Taiwan Journal of Forest Science*, 39(4), 241–252. [https://doi.org/10.7075/TJFS.202412_39\(4\).0006](https://doi.org/10.7075/TJFS.202412_39(4).0006)

Lukash, O., Stupak, Yu., Morskyi, V., & Aravin, M. (2024b). Adventive tree and shrub plant species with medicinal properties in the Chernihiv city's green infrastructure. *Biota. Human. Technology*, 1, 9–18. <https://doi.org/10.58407/bht.1.24.1>

Marsh, S. T., Brummitt, N. A., de Kok, R. P. J., & Utteridge, T. M. A. (2009). Large-scale patterns of plant diversity and conservation priorities in South East Asia. *Blumea – Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants*, 54(1-3), 103–108. <https://doi.org/10.3767/000651909X474159>

Marshall, P. (2009). The problem of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) in Southern New England. Ecophysiology, site restriction, and historical land-use change. *Journal of Sustainable Forestry*, 28, 108–131. <https://doi.org/10.1080/10549810802626423>

Morskyi, V. & Lukash, O. (2026). *The acclimatized ornamental introduced woody plants flora of Chernihiv's green infrastructure: summary*. Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/F2BBCD>

Nuzhyna, N. V., Ivanova, I. Y., & Gaidarzhy, M. M. (2023). Introduced plant species in the urban environment of the temperate-continental climate zone under conditions of global warming. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 14(4), 539–545. <https://doi.org/10.15421/022378>

Opalko, O., Kucher, N., Konopelko, A., & Opalko, A. (2025). Environmental stresses and adaptation processes of woody plants in the current urbanized environment. *Journal of Native and Alien Plant Studies*, 21, 34–64. <https://doi.org/10.37555/2707-3114.21.2025.346418>

Pototska, S. O. (2014). Analysis of the current state of dendroflora and prospects for optimization of plantings in Chernihiv city. *Nature of Western Polesia and Adjacent Territories*, (11), 225–231. <http://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/4567> (in Ukrainian).

Потоцька С. О. Аналіз сучасного стану дендрофлори та перспективи оптимізації насаджень міста Чернігова. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. 2014. № 11. С. 225–231. <http://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/4567>

Pototska, S. O. (2012). Comparative analysis of dendroflora of green spaces in Chernihiv. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University: Series: Biology*, (33), 64–70. <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/2266> (in Ukrainian).

Потоцька С. О. Порівняльний аналіз дендрофлори зелених насаджень міста Чернігова. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Біологія*. 2012. № 33. С. 64–70. <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/2266>

Pototska, S. O. (2017). Dendrological aspects of the «Concept for the Chernihiv city greening». *Scientific Notes of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*, (69), 35–40. <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/8054> (in Ukrainian).

Потоцька С. О. Дендрологічні аспекти «Концепції озеленення міста Чернігова». *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Біологія*. 2017. № 69. С. 35–40. <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/8054>

Pototska, S. O. (2011). *Natural and cultivated dendroflora of the Chernihiv city* [Doctoral dissertation summary, Kyiv]. <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0411U007380/> (in Ukrainian).

Потоцька С. О. Природна і культивована дендрофлора міста Чернігова: автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00. 05. / Нац. бот. сад ім. М. М. Гришка НАН України. Київ, 2011. 20 с.

Pototska, S. O., Aravin, P. A., Karpenko, Yu. O., & Sverdlov, V. O. (2025). Ecosystem services of street green spaces in Chernihiv in conditions of climate change. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, (11), 303–313. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.32> (in Ukrainian).

Потоцька С. О., Аравін П. А., Карпенко Ю. О., Свєрдлов В. О. Екосистемні послуги вуличних зелених насаджень м. Чернігова в умовах кліматичних змін. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 11. С. 303–313. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.32>

Richardson, D. M., Pyšek, P., Rejmánek, M., Barbour, M. G., Panetta, F. D., & West, C. J. (2000). Naturalization and invasion of alien plants: Concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, 6(2), 93–107. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x>

San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds). (2021). *European atlas of forest tree species*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/776635>

Sæbø, A., Borzan, Ž., Ducatillion, C., Hatzistathis, A., Lagerström, T., Supuka, J., García-Valdecantos, J. L., Rego, F., & Slycken, J. V. (2005). The Selection of Plant Materials for Street Trees, Park Trees and Urban Woodland. In C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, J. Schipperijn (Eds.), *Urban Forests and Trees*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27684-X_11

Shynder, O. I., Negrash, Yu. M., Glukhova S. A., Doyko N. M., Rak O. O. (2020). Adventitious species of the genus *Lonicera* (*Caprifoliaceae*) in the flora of Right-Bank Ukraine. *Scientific Notes of NaUKMA. Biology and Ecology*, (3), 58–65. <https://doi.org/10.18523/2617-4529.2020.3.58-65> (in Ukrainian)

Шиндер О. І., Нєграш Ю. М., Глухова С. А., Дойко Н. М., Рак О. О. Адвентивні види роду *Lonicera* (*Caprifoliaceae*) у флорі Правобережної України. *Наукові записки НаУКМА. Біологія і екологія*. 2020. № 3. С. 58–65. <https://doi.org/10.18523/2617-4529.2020.3.58-65>

Sjöman, H., Watkins, H., Kelly, L. J., Hiron, A., Kainulainen, K., Martin, K. W., & Antonelli, A. (2024). Resilient trees for urban environments: the importance of intraspecific variation. *Plants, People, Planet*, 6(6), 1180–1189. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10518>

Slyusar, G. V. (2021). *Biological features of Schisandra chinensis (Turcz.) Baill. during introduction in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine* [Doctoral dissertation summary, Kyiv]. https://nbg.kyiv.ua/files/site/page_file//tfile3b17ca3fb452ac59a6e3f2f36667c00e.pdf (in Ukrainian).

Слюсар Г. В. Біологічні особливості *Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill. за інтродукції в Правобережному Лісостепу України: автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00. 05. / Нац. бот. сад ім. М. М. Гришка НАН України. Київ, 2021. 20 с.

Strashok, O., Bidolakh, D., & Ziemiańska, M. (2025). Ecosystem benefits of urban woody plants for sustainable green space planning: a case study from Wroclaw. *Scientific Reports*, 15(1), Article 10999. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95581-y>

Toscano, S., Romano, D., Lazzeri, V., Leotta, L., & Bretzel, F. (2025). How can plants used for ornamental purposes contribute to urban biodiversity? *Sustainability*, 17(9), Article 4061. <https://doi.org/10.3390/su17094061>

USDA. (2023). *Plant Hardiness Zone Map*. <https://planthardiness.ars.usda.gov/>

Vogt, J., Gillner, S., Hofmann, M., Tharang, A., Dettmann, S., Gerstenberg, T., Schmidt, C., Gebauer, H., Riet, K.V., Berger, U., & Roloff, A. (2017). Citree: a database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning*, 157, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.005>

WFO (2025). Plant List. In *World Flora Online. Version 2023.06*. Retrieved September 04, 2023, from <https://wfo.plantlist.org/taxon/wfo-0000781866-2025-12>

Yarova, O. A., & Fedoronchuk, M. M. (2015). The geographic analysis of the flora of Biloozersky National Nature Park (Ukraine). *Thaiszia – Journal of Botany*, 25(1), 15–20. https://www.upjs.sk/public/media/11851/015-020_Yarova_Fedoronchuk-upr.pdf

Zaimenko, N. V., Skrypchenko, N. V., Ivanytska, B. O., Venediktova, T. B., Kovalska, N. P., Karpiuk, U. V., Stasiv, T. G., & Liu, D. (2022). Peculiarities of the distribution of assimilates in the organs of *Schisandra chinensis* plants under different soil and climatic conditions. *Biosystems Diversity*, 30(4), 423–429. <https://doi.org/10.15421/012241>

Zavyalova, L. V. (2010). Systematic structure of Chernihiv urban flora. *Ukrainian Botanical Journal*, 67(1), 71–78. <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/30141>

Зав'ялова Л. В. Систематична структура урбанофлори Чернігова. *Український ботанічний журнал*. 2010. Т. 67, № 1. С. 71–78. <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/30141>

Zavyalova, L. V. (2012a). Aboriginal fraction of Chernihiv urban flora. *Ukrainian Botanical Journal*, 69(6), 853–862. <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/174984>

Зав'ялова Л. В. Аборигенна фракція урбанофлори Чернігова. *Український ботанічний журнал*. 2012. Т. 69, № 6. С. 853–862. <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/174984>

Zavyalova, L. V. (2012b). *Urban flora of Chernihiv* [Doctoral dissertation summary, Kyiv]. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000035982>

Зав'ялова Л. В. Урбанофлора Чернігова: автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00. 05. / Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. Київ, 2012. 20 с.

Zhu, W. X., & Carreiro, M. M. (2024). Temporal and spatial variations in nitrogen transformations in deciduous forest ecosystems along an urban–rural gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(2), 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.09.013>

Received: 06.02.2026. **Accepted:** 03.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Morskyi V. Analysis of the acclimatized ornamental introduced woody plants flora of Chernihiv's green infrastructure. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. P. 12-27. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.1>

Cite this article in APA style as:

Morskyi, V. (2026). Analysis of the acclimatized ornamental introduced woody plants flora of Chernihiv's green infrastructure. *Biota. Human. Technology*, (1), 12–27. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.1>

Information about the author:

Morskyi V. [in Ukrainian: **Морський В.**], Ph. D. student¹, Head of the enterprise², email: vitaliymorskoy.cn@gmail.com
ORCID: 0009-0000-2465-6731

¹Department of Ecology, Geography and Nature Management, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

²Municipal Enterprise “Zelenbud” of the Chernihiv City Council
168-A Mykhayla Hrushevskoho Avenue, Chernihiv, 14034, Ukraine

UDC 711.57:712.4](477.85-25]:502/504

DOI: 10.58407/bht.1.26.2



Copyright (c) 2026 Iryna Myshiliuk, Alina Zhuk

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Ірина Мишілюк, Аліна Жук

**ВИДОВА СТРУКТУРА ДЕНДРОФЛОРИ ЗАКЛАДІВ ДОШКІЛЬНОЇ ОСВІТИ
МІСТА ЧЕРНІВЦІ ЯК ЧИННИК ФОРМУВАННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ**

Iryna Myshiliuk, Alina Zhuk

**SPECIES COMPOSITION OF THE DENDROFLORA IN PRESCHOOL EDUCATIONAL
INSTITUTIONS IN CHERNIVTSI CITY AS A DRIVER OF ECOSYSTEM SERVICES****АНОТАЦІЯ**

Мета роботи. Інвентаризація деревних насаджень закладів дошкільної освіти (ЗДО) міста Чернівці та аналіз впливу видової структури й стану дендрофлори на потенціал надання регулювальних екосистемних послуг у межах різних планувальних рішень озеленення.

Методологія. Проведено інвентаризацію зелених насаджень із формуванням геопросторової бази даних. Здійснено таксономічний і структурний аналіз, оцінку санітарного стану дерев. Статистичний аналіз та візуалізацію виконано у середовищі Rstudio. Моделювання обсягів депонування вуглецю, перехоплення зливових опадів та очищення повітря, а також їх монетарну оцінку проведено за алгоритмами моделі i-Tree Eco.

Наукова новизна. Вперше сформовано верифікований геопросторовий реєстр дендрофлори ЗДО м. Чернівці, що створює основу для системного моніторингу та прийняття науково обґрунтованих рішень у сфері озеленення. Проаналізовано зелені насадження обмеженого користування, що залишаються малодослідженими, порівняно з іншими категоріями зеленої інфраструктури міста. Розширено уявлення про їх роль у формуванні регулювального потенціалу урбоекосистеми та аргументовано, що екологічна ефективність визначається не лише кількісними параметрами фітомаси, а й структурно-функціональною організацією насаджень.

Висновки. Встановлено, що дендрофлора 41 ЗДО (3527 екземплярів) характеризується високим видовим різноманіттям (67 видів), проте значною кількісною нерівномірністю: 47,1 % загальної кількості формують лише чотири види – *Thuja occidentalis*, *Betula pendula*, *Picea abies*, *Prunus cerasus*. Кількісний аналіз ефективності різних типів озеленення підтвердив наявність екосистемних компромісів. Декоративні хвойні насадження забезпечують максимальне кумулятивне депонування вуглецю (138 т CO₂-екв.), але мають найнижчу вартість екосистемних послуг в розрахунку на одне дерево. Плодові насадження демонструють найвищу індивідуальну продуктивність та кращий гідрологічний ефект (2,58 м³/дерево). Обґрунтовано необхідність створення структурно неоднорідних насаджень для забезпечення сезонної стабільності регулювальних екосистемних послуг.

Ключові слова: зелені насадження дошкільних закладів, регулювальні послуги, інвентаризація, деревні породи, м. Чернівці

ABSTRACT

Purpose of the work. An inventory of woody plantings in preschool educational institutions (PEIs) in Chernivtsi city and an assessment of how species composition and dendroflora condition affect the capacity to deliver regulating ecosystem services across different green space planning configurations.

Methodology. A tree inventory was conducted to build a geospatial database. Taxonomic and structural analyses were performed, and tree vitality was assessed. Statistical processing and visualization were carried out in RStudio. Carbon sequestration, stormwater interception, and air purification, including their monetary valuation, were modeled using i-Tree Eco algorithms.

Scientific novelty. For the first time, a verified geospatial registry of dendroflora in PEIs of Chernivtsi has been developed, providing a foundation for systematic monitoring and evidence-based decision-making in urban greening. This study analyzes restricted-use green spaces, which remain under-researched relative to other categories of urban green infrastructure. It expands current understanding of their role in shaping the regulating potential of the urban ecosystem and substantiates that ecological efficiency is determined not only by quantitative phytomass parameters but also by the structural and functional organization of the plantings.

Conclusions. The study reveals that while the dendroflora of 41 PEIs (3527 specimens) exhibits high species richness (67 species), it suffers from significant quantitative unevenness: 47.1 % of the total tree stock is dominated by only four species – *Thuja occidentalis*, *Betula pendula*, *Picea abies*, and *Prunus cerasus*. Quantitative analysis of various landscaping configurations confirms the presence of ecosystem trade-offs. Ornamental coniferous plantings provide the maximum cumulative carbon sequestration (138 t CO₂-eq.) but yield the lowest economic value per individual tree. Conversely, fruit tree plantings demonstrate the highest individual productivity and superior hydrological benefits (2.58 m³ per tree). These findings substantiate the need to develop structurally heterogeneous plantings that integrate both deciduous and evergreen species to ensure the seasonal stability of regulating ecosystem services.

Key words: preschool green spaces, regulating services, tree inventory, woody species, Chernivtsi city

Вступ

Зелену інфраструктуру міст світова наукова спільнота розглядає як визначальний елемент адаптації урбанізованих територій до кліматичних змін і забезпечення комфортного середовища життєдіяльності (Gill et al., 2007; Kucheryavuj et al., 2025). У сучасній урбоекології ефективність функціонування зелених зон операціоналізується через концепцію екосистемних послуг, які слугують інтегральним показником якості міського середовища (de Manuel et al., 2021; Vasutynska, 2021; Stange et al., 2022; Miroshnyuk, 2023). Деревні рослини в місті виконують насамперед регульовальні функції: формування мікроклімату, депонування вуглецю, перехоплення атмосферних опадів, абсорбцію поллютантів, зниження рівня шуму тощо. Однак ефективність виконання цих функцій не є константою, а напряду корелює з видовою структурою насаджень, їх фізіологічними параметрами, віком, станом (Salmond et al., 2016; Francini et al., 2021; Liang & Huang, 2023).

З-поміж усіх категорій зелених насаджень обмеженого користування території закладів дошкільної освіти (ЗДО) займають особливе місце, адже формують відкриті простори тривалого перебування найвразливішої групи населення – дітей. Відтак, вимоги до цих зелених зон виходять за межі суто естетичних. Пріоритетними стають санітарно-гігієнічні властивості (бар'єрна функція, фітонцидна активність) та безпека (відсутність алергенних, травмонебезпечних і отруйних видів, аварійних дерев). Водночас озеленення передбачає створення сприятливих умов для всебічного розвитку дітей та підвищення якості освітнього середовища. Проте, на відміну від паркових зон, дендрофлора ЗДО часто формувалася стихійно або за застарілими нормативами (Mулnikova et al., 2025), що породжує наукову проблему

невідповідності існуючих насаджень екологічним викликам сьогодення. Активні урбанізаційні процеси й обмеженість зелених зон обумовлюють важливість обліку існуючих насаджень на територіях ЗДО та необхідність формування наукового підґрунтя для їхньої оптимізації.

Попри значний масив праць українських науковців, присвячених дослідженню озеленення освітніх закладів, більшість із них фокусується на педагогічному аспекті (Voiko et al., 2021; Maksymova, 2025) або загальному благоустрої (Kosyk & Andriienko, 2020; Omelianova & Strelchuk 2021; Dementieva et al., 2023). Питання взаємозв'язку видової структури та стану насаджень на територіях ЗДО з потенціалом надання екосистемних послуг залишається недостатньо вивченим.

Відповідно до даних Чернівецького міського управління освіти, оприлюднених станом на грудень 2025 року на офіційному вебресурсі (<https://osvita.cv.ua/navchalni-zaklady/zaklady-doshkilnoj-osvity/>), у місті Чернівці функціонує 59 закладів дошкільної освіти. Зазначена мережа характеризується неоднорідністю за організаційно-правовим статусом і включає як самостійні комунальні заклади, так і дошкільні підрозділи, що структурно входять до складу закладів загальної середньої освіти, а також установи приватної форми власності.

Зазначена кількість і різноманітність ЗДО зумовлюють значну варіабельність площ, планувальної структури та характеру озеленення їхніх територій. Це, своєю чергою, формує різні за складом і станом дендрофлористичні комплекси, котрі відрізняються функціональною роллю й екологічною ефективністю. У такому контексті актуалізується необхідність комплексної оцінки деревних насаджень ЗДО не лише з позицій кількісних і таксономічних показників, але й з урахуванням їхньої здатності

забезпечувати регульовальні екосистемні послуги.

З огляду на зазначене, мета дослідження полягала в інвентаризації деревних насаджень закладів дошкільної освіти міста Чернівці та аналізі впливу видової структури й стану дендрофлори на потенціал надання регульовальних екосистемних послуг у межах різних планувальних рішень озеленення.

Матеріали та методи дослідження

У зв'язку з безпековими обмеженнями воєнного стану та політикою окремих закладів щодо заборони відеофіксації, поетапну інвентаризацію зелених насаджень проведено на території 41 ЗДО з 59 наявних у м. Чернівці.

На етапі польових обстежень здійснено первинну ідентифікацію деревних і чагарникових рослин. Просторове розміщення насаджень задокументовано методом цифрової панорамної фотофіксації з охопленням 360° для повного уявлення про структуру озеленення кожного об'єкта.

На основі результатів вимірювання сантиметровою стрічкою обхвату на висоті 1,3 м від рівня ґрунту для кожного екземпляру обчислено діаметр стовбура за формулою: $D = L / \pi$, де D – діаметр; L – обхват стовбура на висоті 1,3 м; π – 3,14. Висоту виміряно із застосуванням додатка Trees V 5.0 на платформі Android. Вік дерев з'ясовано в адміністрації ЗВО або, за відсутності документальних даних, оцінено орієнтовно, за допомогою емпіричної формули: $L = K \times C$, де L – вік дерева, K – видоспецифічний коефіцієнт корекції, а C – обхват стовбура на висоті 1,3 м.

Стан насаджень визначено візуально за комплексом морфологічних ознак (розвиток крони, наявність хвороб, шкідників та механічних пошкоджень) відповідно до нормативної 3-бальної шкали (State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy of Ukraine, 2001): 1 – добрий, 2 – задовільний, 3 – поганий стан.

Просторово-атрибутивні дані про кожне дерево та кущ були внесені до геоінформаційної бази з використанням авторського програмного засобу CVTREES. У такий спосіб сформовано верифікований геопросторовий реєстр насаджень, придатний для інтеграції з ГІС-порталом міста та комплексного статистичного опрацювання.

Статистичне опрацювання даних та візуалізацію результатів виконано з використанням мови програмування R (версія 4.3.0) у середовищі RStudio. Для імпорту даних, їх очищення та агрегації використовувалися пакети екосистеми tidyverse, зокрема readxl для зчитування таблиць первинних даних та dplyr для маніпуляцій з даними. Візуалізацію результатів виконано засобами пакету ggplot2.

Кількісну й монетарну оцінку потенціалу екосистемних послуг зелених насаджень проведено з використанням застосунку i-Tree MyTree (v. 2.0), який базується на алгоритмах моделі i-Tree Eco, розробленої Лісовою службою Міністерства сільського господарства США (USDA Forest Service). Методика розрахунків базується на використанні алометричних рівнянь, які встановлюють статистичний зв'язок між морфометричними параметрами дерева та його біомасою із урахуванням видових коефіцієнтів. Монетарні показники екосистемних послуг наведено в доларах США з метою забезпечення порівнюваності результатів та уникнення впливу коливань національної валюти.

Результати дослідження та обговорення

У ході інвентаризації деревних насаджень на територіях 41 ЗДО м. Чернівці виявлено 67 видів деревних і чагарникових рослин, представлених 3527 екземплярами. Таксономічна структура дендрофлори характеризується відносно високою різноманітністю й охоплює 47 родів, 22 родини, 14 порядків, 2 класи та 2 відділи. Відділ Pinophyta представлений класом Pinopsida, що включає види родин Pinaceae та Cupressaceae. Абсолютну більшість становлять представники відділу Magnoliophyta класу Magnoliopsida.

На рівні порядків провідне положення належить порядку Rosales: 20 видів, близько 30 % видового складу. Субдомінантами виступають Sapindales, Fagales та Pinales (по 8 видів кожен), які формують структурну основу насаджень і визначають їх середовищевий потенціал. Решта порядків представлені обмежено, від 1 до 5 видів кожен.

На рівні родин домінує Rosaceae, представлена 19 видами. Серед них переважають плодіві культури (*Malus domestica* Borkh.,

Prunus cerasus L., *P. armeniaca* L., *Pyrus communis* L.), що свідчить про традиційний підхід до озеленення дитячих закладів, який поєднує декоративні й утилітарні функції. Значну частку становлять також декоративно-квітучі чагарники цієї родини (*Spiraea* sp., *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach, *Sorbus aucuparia* L.), які сприяють формуванню сенсорного та естетичного середовища, важливого для розвитку дітей.

Другу за чисельністю позицію посідає родина Sapindaceae (6 видів), яка включає головні тіньютворюючі дерева – представників родів *Acer* L. та *Aesculus* L. Родина Pinaceae представлена п'ятьма видами з родів *Larix* Mill., *Picea* Dietr. і *Pinus* L. Помітну роль у структурі насаджень відіграють також родини Salicaceae (*Populus* L., *Salix* L.), Betulaceae (*Alnus* Mill., *Betula* L., *Carpinus* L., *Corylus* L.) і Oleaceae (*Fraxinus* L., *Syringa* L., *Forsythia* Vahl) які характеризуються високою стійкістю до умов урбанізованого середовища та сприяють формуванню сприятливого мікроклімату на територіях закладів.

Родини *Malvaceae*, *Fagaceae*, *Cupressaceae* репрезентовані трьома видами кожна; *Viburnaceae*, *Magnoliaceae*, *Hydrangeaceae*, *Fabaceae* – двома. Лише по одному виду

представлено в родинях *Vitaceae*, *Simaroubaceae*, *Platanaceae*, *Paulowniaceae*, *Moraceae*, *Juglandaceae*, *Grossulariaceae*, *Bignoniaceae* й *Anacardiaceae*.

З точки зору походження, дендрофлора ЗДО сформована поєднанням аборигенних видів (*Tilia cordata* Mill., *Betula pendula* Roth, *Quercus robur* L., *Carpinus betulus* L.), які є стійкими до місцевих кліматичних умов, та численних інтродуцентів. Серед останніх виділяються як типові для міського озеленення види (*Thuja occidentalis* L., *Aesculus hippocastanum* L., *Juglans regia* L.), так і інвазійні: *Acer negundo* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Rhus typhina* L. Їх наявність потребує контролю та поступової заміни на види з вищою декоративною й екологічною цінністю.

Кількість екземплярів на території ЗДО варіюється в широкому діапазоні від 11 до 189 залежно від розмірів ділянки та плану озеленення; кількість видів – від 6 до 28. На основі розрахунку внеску домінуючого виду виділено три групи насаджень (рис. 1). Виразним переважанням екземплярів виду характеризуються зелені зони дев'яти закладів.



Рис. 1. Співвідношення загальної кількості дерев і видового багатства ЗДО

Здебільшого це однопородні алейні насадження на основі *Betula pendula*, *Picea abies* або живоплоти з використанням *Thuja occidentalis*. Територія частини закладів (ЗДО № 38, ЗДО № 39) зберігає структуру традиційного плодового саду, де домінан-

тами виступають *Prunus cerasus* та *Malus domestica*. Найбільш численною виявилася група насаджень, де частка домінуючого виду становить 20–35 %, що відображає типову для міського середовища практику організації зелених просторів. Вона охоплює

19 ЗДО і характеризується значною диференціацією підходів до формування зелених зон.

Група насаджень без вираженого домінування якогось одного виду охоплює 13 ЗДО. Ці об'єкти демонструють ефективність використання простору із забезпеченням видового багатства й таксономічного різноманіття навіть за умови помірної загальної кількості дерев. Водночас відсутність чітко вираженого монодомінанта у ЗДО № 1 і ЗДО № 22 демонструє радше стихійний характер формування насаджень, що поєднують старовікові дерева з різноманітними молодими посадками.

Структура насаджень визначається не лише загальною кількістю дерев і рівнем видового багатства, а й участю окремих видів, які формують ядро дендрофлори більшості об'єктів. Такий розподіл не випадковий, а являє собою результат типізації проектних рішень минулих часів і сучасної тенденції до спрощення експлуатаційного догляду за насадженнями.

Встановлено 10 найпоширеніших деревних порід, які визначають просторову організацію та функціональні характеристики зелених зон ЗДО м. Чернівці (рис. 2). Найбільшою чисельністю вирізняються *Thuja occidentalis* і *Betula pendula*, виявлені на території 90 % об'єктів.

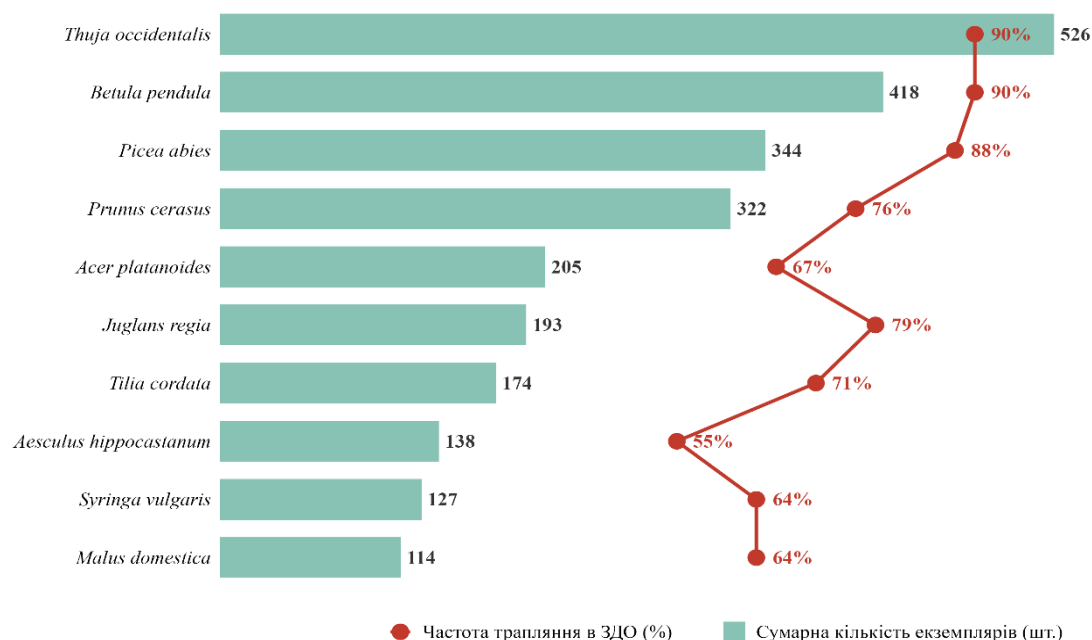


Рис. 2. Сумарна чисельність і частота трапляння домінантних деревних видів

Понад 300 екземплярів *Picea abies* і *Prunus cerasus* виявлено на території 88 % і 76 % закладів відповідно. Стійкий базовий асортимент деревних рослин зелених зон ЗДО у місті представлений обмеженою кількістю видів, серед яких *Acer platanoides* L., *Juglans regia* L., *Tilia cordata*, *Aesculus hippocastanum* L., *Syringa vulgaris* L., *Malus domestica*. Такий видовий склад вказує на збереження історично сформованого кістяка озеленення, характерного для насаджень радянського періоду. Зокрема, плодові дерева й досі складають майже третину домінуючого асортименту. Про типові підходи до створення зелених просторів освітніх закладів

свідчить близький до зафіксованого нами асортимент деревних порід, описаний для ЗДО у м. Дніпро (Mylnikova et al., 2025), м. Чернігів (Pototska, 2021), с. Степанівка Херсонської області (Dementieva et al., 2023).

Навіть у насадженнях із відносно високим видовим багатством спостерігається нерівномірний розподіл видів за чисельністю екземплярів. Значна частина дендрофлори представлена малочисельними видами, які зростають поодинокими або невеликими групами, що відображає як історію поетапного озеленення територій ЗДО, так і фрагментарний характер інтродукції окремих деревних рослин. *Aronia*

melanocarpa (Michx.) Elliott, *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach, *Cupressus sempervirens* L., *Deutzia scabra* Thunb., *Fagus sylvatica* L., *Liriodendron tulipifera* L., *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud., *Platanus × acerifolia* (Aiton) Willd., *Prunus triloba* Lindl., *Ribes nigrum* L., *Spiraea* sp., *Tilia platyphyllos* Scop. представлені лише в одиничному екземплярі на території одного з закладів кожний. *Prunus tomentosa* Thunb., *Populus tremula* L., *Picea glauca* (Moench) Voss також виявлені у складі дендрофлори одного закладу кожний, проте в кількох екземплярах.

Аналіз спектра малочисельних видів (рис. 3) засвідчив, що їх частка у складі зелених зон більшості ЗДО не перевищує 20 %, однак на окремих об'єктах вона зростає до 30–40 %. Заклади з низьким видовим багатством зазвичай характеризуються або повною відсутністю, або мінімальною часткою малопоширених видів, що вказує на спрощену структуру насаджень і домінування обмеженого набору традиційних видів. Така структура потенційно знижує екологічну стійкість зелених насаджень і їхню функціональну багатоконпонентність.



Рис. 3. Розподіл ЗДО за кількістю видів деревних рослин і часткою малопоширених видів. Стопівчики – загальна кількість видів; лінія тренду – частка видів, що трапляються рідко (< 20 % закладів)

Водночас відмічено локальне збагачення асортименту за рахунок декоративних інтродуцентів та екзотів, наприклад *Forsythia* spp., *Juniperus* spp., *Magnolia* spp., *Acer rubrum* L., *Catalpa bignonioides* Walter, *Hibiscus syriacus* L., *Prunus serrulata* Lindl., *Rosa odorata* (Andrews) Sweet, *Salix integra* Thunb., *Wisteria sinensis* (Sims) DC. Вибір цих та багатьох інших видів спрямований на поступову трансформацію територій ЗДО у інтерактивний навчально-виховний простір (Boiko et al., 2021; Maksymova, 2025; Montalvan Castilla et al., 2025; Zhu & Carter, 2025).

Наявність квітучих, декоративно-листяних видів і рослин із виразною архітектонікою крони сприяє формуванню візуально

привабливого, психологічно комфортного середовища, що позитивно впливає на здоров'я, емоційний стан дітей та розвиває їхнє естетичне сприйняття природи (Puhakka et al., 2019; Montalvan Castilla et al., 2025; Zhu & Carter, 2025). Однак наразі їх залучення до складу зелених відкритих просторів ЗДО м. Чернівці має несистемний характер, що виявляє відсутність єдиної концепції озеленення, де декоративність гармонійно поєднувалася б із екологічною стійкістю та функціональною ефективністю насаджень.

Санітарний стан дендрофлори ЗДО м. Чернівці за результатами інвентаризації загалом оцінюється як добрий. До цієї категорії віднесено 86,6 % (понад 3000 екземплярів)

обстежених дерев, що відображає належний рівень догляду та підтримання зелених насаджень. Однак окремі види виявляють підвищену вразливість із різних причин (рис. 4). Навіть у межах домінуючого та базового асортименту зелених насаджень ЗДО значна частка дерев перебуває у стані функціонального ослаблення.

Зокрема, частка екземплярів *Aesculus hippocastanum* у задовільному та поганому стані сягає 54 %. Така тенденція узгоджується з результатами наших попередніх досліджень вуличних насаджень історичної частини міста, де на окремих вулицях усі зафіксовані дерева

цього виду перебували в незадовільному стані (Zhuk & Myshiliuk, 2025). Спільним лімітуючим чинником в обох випадках виступає ураження каштановою мінуючою міллю (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimic, 1986), що спричиняє передчасну дефоліацію та виснаження дерев. Водночас той факт, що у ЗДО майже половина каштанів зберігає добрий стан, на відміну від вуличних посадок, вказує на синергичний ефект шкідника та урбаністичного навантаження. Менша загазованість і відсутність засолення ґрунтів у межах ЗДО, ймовірно, сприяють тривалішій опірності біотичному стресу.

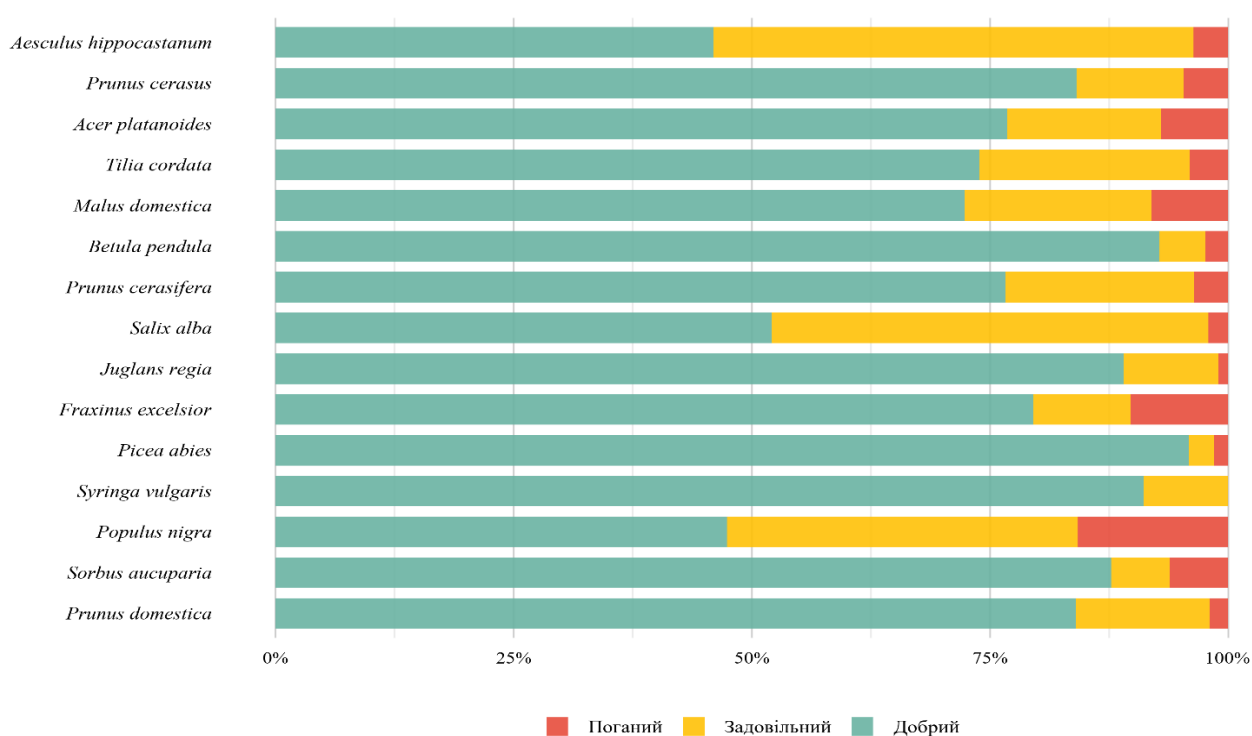


Рис. 4. Розподіл за категоріями життєвого стану видів з найбільшою часткою ослаблених дерев у насадженнях ЗДО

Окрему групу ризику формують види, численні екземпляри яких досягли сеньної стадії. Насамперед, це *Populus nigra* та *Salix alba*, у яких частка ослаблених екземплярів сягає близько 50 %, а також окремі представники родини Rosaceae (*Prunus cerasus*, *P. cerasifera*, *P. domestica*, *Malus domestica*), зниження стійкості яких пов'язане з природним старінням насаджень і, ймовірно, відсутністю належного агротехнічного захисту від фітопатогенів.

Наявність дерев *Acer platanoides*, *Tilia cordata*, *Betula pendula*, *Sorbus aucuparia* L., *Juglans regia* у поганому стані має, як правило,

локальний характер, однак впливає на загальну оцінку їхньої функціональної надійності. *Picea abies* та *Syringa vulgaris* характеризуються відносно високою часткою дерев у доброму стані.

В окремих закладах виявлені ознаки видалення сухостою, викорчовування старих, хворих та аварійних дерев. Пні в сумарній кількості 10 штук були зафіксовані у шести закладах.

У ході інвентаризації виявлено потенційний просторовий ресурс для проведення ремонтних посадок та реконструкції насаджень. Першочерговим резервом для озеле-

нення є локації, на яких зафіксовано пні та місця, підготовлені для посадки. Наприклад, у ЗДО № 10 вже зарезервовано місця для посадки *Quercus robur* L. і *Acer japonicum* Thunb.; у ЗДО № 43 – *Pinus mugo* Turra; у ЗДО № 50 – *Picea abies*, *P. glauca*, *Pinus sylvestris* і *Q. robur*. Сумарна кількість місць під посадку нових дерев становить 43, із них 24 підготовлено на території ЗДО № 27.

Другим етапом реновації має стати заміна дерев у поганому стані. Найбільша кількість посадкових місць (понад 50) звільниться після видалення аварійних екземплярів *Prunus cerasus*, *Malus domestica* та *Acer platanoides*. Загальний потенціал для

нових насаджень без розширення площі зелених зон становить близько 110 дерев.

Ефективне використання цього просторового ресурсу вимагає розуміння особливостей впливу видового складу та структури насаджень на їхню функціональну ефективність. Для обґрунтування доцільності певних типів озеленення проаналізовано залежність між дендрологічною структурою й обсягом окремих екосистемних послуг.

Як модельні об'єкти обрано заклади з контрастними характеристиками насаджень (табл. 1), що ілюструють озеленення з високим видовим багатством, високою часткою плодкових дерев, а також вираженим домінуванням декоративних хвойних порід.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика потенціалу регулювальних екосистемних послуг у ЗДО з різними типами озеленення

Показник	ЗДО № 43	ЗДО № 39	ЗДО № 49
Структурні характеристики насаджень			
Загальна кількість дерев, шт.	127	40	184
Кількість видів, шт.	28	6	16
Домінуючий вид	<i>Picea abies</i>	<i>Prunus cerasus</i>	<i>Thuja occidentalis</i>
Частка домінуючого виду, %	13	43	54
Тип озеленення	багатовидовий	фруктовий сад	декоративний хвойний
Екосистемні послуги за рік			
Загальна секвестрація вуглецю, кг CO ₂ -екв.	3867,51	1104,55	4264,69
Питома секвестрація вуглецю, кг CO ₂ -екв./дерево	30,45	27,61	23,18
Вартість поглинання CO ₂ , дол. США	503,11	143,69	554,8
Загальне перехоплення атмосферних опадів, м ³	291,36	103,25	323,22
Питоме перехоплення атмосферних опадів, м ³ /дерево	2,29	2,58	1,76
Зменшення поверхневого стоку, м ³	16,43	5,82	18,22
Вартість регуляції стоку, дол. США	38,78	13,74	43,02
Загальне очищення повітря, кг	36,57	12,67	39,71
Питоме очищення повітря, кг/дерево	0,29	0,32	0,22
Вартість очищення повітря, дол. США	56,05	19,41	60,84
Сумарна вартість екосистемних послуг, дол. США	597,92	176,84	658,66
Питома сумарна вартість екосистемних послуг, дол. США/дерево	4,7	4,4	3,6
Кумулятивні показники			
Запаси вуглецю в біомасі, т CO ₂ -екв.	130,68	39,08	138,01
Кумулятивна вартість депонування вуглецю, дол. США	17001,56	5084,66	17954,1

Аналіз отриманих даних демонструє, що структурна організація зеленої зони ЗДО № 43 багатовидового типу забезпечує збалансоване надання окремих регулювальних екосистемних послуг. Зокрема, відмічено високий рівень секвестрації вуглецю (~ 3,9 т CO₂-екв./рік) та об'єм перехоплення атмосферних опадів (~ 291 м³/рік). Отримані результати узгоджуються з твердженням про підвищену функціональну стійкість різновікових і різновидових насаджень, які здатні компенсувати зниження активності окремих компонентів за рахунок структурної різноманітності (Jovanović et al., 2025). Сумарна річна вартість наведених регулювальних послуг насадження оцінюється в ~ 598 дол. США, а кумулятивна вартість лише однієї послуги депонування вуглецю ~ 17 000 дол. США.

Маловидове фруктове насадження ЗДО № 39, сформоване переважно з *Prunus cerasus* (43 % від загальної кількості дерев), за абсолютними показниками екосистемних послуг очікувано поступилося більшим об'єктам через незначну кількість дерев. Зокрема, загальна секвестрація вуглецю склала ~ 1,1 т CO₂-екв./рік, а перехоплення опадів – ~ 103 м³/рік.

Однак аналіз питомої ефективності виявив приховану перевагу цього типу озеленення. У перерахунку на один структурний елемент саме цей об'єкт продемонстрував найвищі результати серед досліджуваних насаджень. Питоме очищення повітря сягнуло ~ 0,32 кг/дерево, що на 10–45 % перевищує відповідні показники решти насаджень.

Такий результат, імовірно, зумовлений морфофізіологією роду *Prunus* L. Шорстка поверхня та зубчастий край листя створюють мікротурбулентність, що сприяє кращому осадженню дрібнодисперсних часток порівняно з гладкою хвоєю або листям деяких декоративних порід (Sæbø et al., 2012). Максимальне значення також було зафіксоване для показника перехоплення атмосферних опадів, який становить 2,58 м³/дерево.

Отже, хоча сумарна монетизація послуг цього насадження найнижча серед порівнюваних (~ 177 дол. США/рік), воно ефективно виконує проєктовану санітарно-гігієнічну функцію, працюючи як ефективний біофільтр на локальному рівні.

Насадження декоративного хвойного типу ЗДО № 49, де частка *Thuja occidentalis* становить 54 %, продемонструвало найвищу сумарну річну вартість екосистемних послуг – ~ 659 дол. США/рік. Насадження забезпечує максимальні обсяги секвестрації вуглецю (~ 4,3 т CO₂-екв./рік), ефективне зменшення поверхневого стоку (18,22 м³/рік) і найвищі показники очищення повітря (39,71 кг/рік). Це вірогідно пояснюється високою щільністю посадки та вічнозеленими листям, що забезпечує цілорічний потенціал перехоплення аерополутантів та атмосферних опадів.

На відміну від листопадних видів, які втрачають цю здатність у зимовий період, насадження *Thuja occidentalis* продовжують виконувати бар'єрну функцію, осаджуючи тверді частки на поверхні хвої (Sæbø et al., 2012). Наявність функціонально активного асиміляційного апарату протягом року також сприяє подовженню періоду секвестрації вуглецю, оскільки вічнозелені види можуть підтримувати фотосинтетичну активність за сприятливих світлових і температурних умов ранньої весни та пізньої осені (Pallardy, 2008). Високий кумулятивний запас вуглецю в біомасі (~ 138 т CO₂-екв.) свідчить про значний довгостроковий внесок у регуляцію вуглецевого балансу міського середовища.

Однак, попри лідерство за валовими показниками, питома ефективність окремих дерев у декоративному хвойному насадженні виявилася найнижчою серед досліджуваних об'єктів (3,6 дол. США/дерево).

Аналіз отриманих результатів крізь призму теорії компромісів екосистемних послуг (Rodríguez et al., 2006) виявив диференціацію підходів до формування екологічної ефективності насаджень спеціального користування на території освітніх закладів.

Зафіксовано просторовий компроміс між валовим обсягом послуг та їх питомою ефективністю. Декоративне хвойне насадження ЗДО № 49 реалізує підхід, орієнтований на максимізацію біомаси. Воно забезпечує найвищі сумарні показники депонування вуглецю (~ 138 т CO₂-екв.) завдяки значній кількості дерев (184 шт.). Однак це досягається ціною зниження індивідуальної продуктивності, що підтверджується найнижчою питомою вартістю послуг (3,6 дол. США/дерево). Це свідчення того, що в густих монокультурах визначальним є ефект

масштабу, а не індивідуальна продуктивність. Натомість плодове насадження ЗДО № 39 демонструє вищу індивідуальну функціональну віддачу (4,4 дол. США/дерево) за меншої кількості екземплярів, що вказує на ефективність використання просторового ресурсу.

На рівні гідрологічного регулювання простежується морфологічний компроміс, зумовлений архітектонікою рослин. Питоме перехоплення опадів для *Prunus cerasus* (2,58 м³/дерево) суттєво перевищує показник *Thuja occidentalis* (1,76 м³/дерево). Це узгоджується з літературними даними про те, що компактна пірамідальна крона хвойних є менш ефективною пасткою для опадів порівняно з розлогою кроною листяних порід, яка максимізує площу горизонтальної проєкції (Xiao et al., 2000).

Функціональна диференціація розглянутих типів озеленення ілюструє також темпоральний компроміс. Листяні насадження забезпечують високий рівень регульовальних процесів у вегетаційний період, тоді як хвойні види підтримують тривале виконання бар'єрних і депонуючих функцій, компенсуючи сезонні паузи листяних порід (Sæbø et al., 2012).

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що екосистемна ефективність озеленення територій ЗДО детермінується не лише кількісними параметрами насаджень, а передусім видовою структурою та характером домінування. Розуміння виявлених екосистемних компромісів обґрунтовує доцільність переходу від стихійно сформованих або монофункціональних насаджень до структурно різноманітних типів озеленення.

Підхід передбачає цілеспрямоване поєднання видів із різною архітектонікою крон та феноритмікою розвитку, що дозволяє гармонізувати максимізацію регульовальних послуг із жорсткими вимогами безпеки та санітарно-гігієнічної якості освітнього середовища, забезпечуючи стабільність функціонування зеленої інфраструктури протягом усього року.

Висновки

За результатами інвентаризації насаджень 41 ЗДО м. Чернівці сформовано верифікований геопросторовий реєстр, що містить 3527 дерев і чагарників 67 видів. Основу

насаджень формують представники родин Rosaceae, Sapindaceae та Pinaceae.

Дендрофлора ЗДО сформована поєднанням стійких аборигенних видів та широкого спектру інтродуцентів. Ядро складають чотири види, на які припадає майже половина загальної кількості дерев: *Thuja occidentalis* (14,9%), *Betula pendula* (11,6%), *Picea abies* (10,6%) і *Prunus cerasus* (9,7%), що свідчить про значну уніфікацію видового складу насаджень.

Виявлено структурну неоднорідність зелених зон ЗДО. Виділено три типи насаджень. Монодомінантні представлені переважно алейними посадками *Betula pendula* і живоплотами з *Thuja occidentalis*. Найчисельнішу групу складають насадження з помірним домінуванням. Решту віднесено до полідомінантних комплексів без вираженого домінанта. Встановлено найпоширеніші види, які формують просторовий каркас територій, – *Thuja occidentalis* (трапляється у 90% закладів) і *Picea abies* (88%)

Санітарний стан дендрофлори загалом оцінено як добрий (86,6% здорових дерев), що вказує на належний рівень догляду. Однак ідентифіковано вразливість окремих видів. Зокрема, понад 50% екземплярів *Aesculus hippocastanum* перебувають у ослабленому стані через ураження *Cameraria ohridella*, що знижує їхню функціональну цінність і естетичну привабливість. До групи ризику також віднесено сенільні екземпляри *Populus nigra* й *Salix alba*, які потребують заміни з міркувань безпеки.

Порівняльний аналіз трьох контрастних типів озеленення показав, що екосистемна ефективність визначається не лише кількістю дерев, а передусім видовою структурою та характером домінування. Багатовидові насадження забезпечують вищі сумарні показники регульовальних послуг, тоді як маловидові фруктові насадження демонструють найвищу питому ефективність очищення повітря й перехоплення опадів.

Обґрунтовано необхідність переходу від монофункціональних і безсистемних зелених зон до створення структурно неоднорідних насаджень. Рекомендовано впровадження практики, що базується на часовому компромісі поєднання листяних порід для максимізації санітарно-гігієнічних послуг у вегетаційний період із хвойними для підтримання бар'єрних функцій протягом року.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Автори використовували інструменти генеративного штучного інтелекту (ChatGPT, Gemini) для перевірки граматики, вдосконалення стилістики тексту і оформлення бібліографічного списку використаних джерел. Після використання названих інструментів автори ретельно переглянули та відредагували вміст і несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію. Науковий зміст статті є повністю оригінальним авторським контентом. Ідея, дизайн дослідження, опрацювання даних та їх інтерпретація, обговорення результатів і висновки розроблені без генерації вмісту за допомогою інструментів ШІ / The authors used generative AI tools (ChatGPT, Gemini) for grammar checking, improving text style, and formatting the bibliography. After using these tools, the authors carefully reviewed and edited the content, taking full responsibility for the final published version. The scientific content of the article is entirely original authorial content. The research idea, design, data processing, and interpretation, as well as the discussion of results and conclusions, were developed without the use of AI tools to generate content.

References

Boiko, T., Torbina, L., & Zavgorodnya, G. (2021). Landscaping of general secondary education institutions and its influence on the formation of schoolchildren's artistic taste. *Traektorîâ Nauki = Path of Science*, 7(7), 4001–4007. (in Ukrainian)

Бойко Т., Торбіна Л., Завгородня Г. Озеленення закладів загальної середньої освіти та його вплив на формування художнього смаку у школярів. *Traektorîâ Nauki = Path of Science*. 2021. Т. 7, № 7. С. 4001–4007.

de Manuel, B. F., Méndez-Fernández, L., Peña, L., & Ametzaga-Arregi, I. (2021). A new indicator of the effectiveness of urban green infrastructure based on ecosystem services assessment. *Basic and Applied Ecology*, 53, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.02.012>

Dementieva, O. I., Lavryś, V. Yu., Dementiev, S. V., & Lavryś, O. Yu. (2023). Peculiarities of creating a project for landscaping and improvement of preschool educational institutions in rural areas of Kherson region. *Taurian Scientific Herald*, 133, 329–339. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.44>

Дементьева О. І., Лавриś В. Ю., Дементьев С. В., Лавриś О. Ю. Особливості створення проекту озеленення та благоустрою дошкільних навчальних закладів сільської місцевості Херсонської області. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 329–339. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.44>

- Francini, G., Hui, N., Jumpponen, A., Kotze, D. J., & Setälä, H. (2021). Vegetation type and age matter: How to optimize the provision of ecosystem services in urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 66, 127392. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127392>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Jovanović, S., Janković-Milić, V., Stanković, J. J., & Stanojević, M. (2025). The role of urban tree areas for biodiversity conservation in degraded urban landscapes. *Land*, 14(9), 1815. <https://doi.org/10.3390/land14091815>
- Kosyk, O. & Andriienko, O. (2020). Landscaping of children's open spaces. *Theory and practice of design*, 2(21), 48–57. <https://doi.org/10.18372/2415-8151.21.15060> (in Ukrainian)
Косик О. І., Андриєнко О. Р. Благоустрій дитячих відкритих просторів. Теорія та практика дизайну: зб. наук. праць. К.: НАУ, 2020. Вип. 21. С.48-57. <https://doi.org/10.18372/2415-8151.21.15060>
- Kucheryavyj, V. P., Henyk, Y. V., Kucheryavyj, V. S., Kendziora, N. Z., Hotsii, N. D., & Ianyshyn, B. M. (2025). Scientific basis of phytomelioration efficiency of green infrastructure of the city. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 18-27. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.36930/40350402>
Кучерявий В. П., Генік Я. В., Кучерявий В. С., Кендзьора Н. З., Гоцїй Н. Д., Янишин Б. М. Наукові засади фітомеліоративної ефективності зеленої інфраструктури міста. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2025. Вип. 35, №4. С. 18–27. <https://doi.org/10.36930/40350402>
- Liang, D., & Huang, G. (2023). Influence of urban tree traits on their ecosystem services: a literature review. *Land*, 12(9), 1699. <https://doi.org/10.3390/land12091699>
- Maksymova, O. O. (2025). Educational eco-spaces as a tool for developing children's natural-ecological competence in the context of sustainable development. *Image of the Modern Pedagogue*, 2(221), 77–82. [https://doi.org/10.33272/2522-9729-2025-2\(221\)-77-82](https://doi.org/10.33272/2522-9729-2025-2(221)-77-82) (in Ukrainian)
Максимова О. О. Освітні екопростори як засіб формування природничо-екологічної компетентності у дітей у контексті сталого розвитку. *Імідж сучасного педагога*. 2025. № 2 (221). С. 77–82. [https://doi.org/10.33272/2522-9729-2025-2\(221\)-77-82](https://doi.org/10.33272/2522-9729-2025-2(221)-77-82)
- Miroshnyk, N. V. (2023). Green infrastructure, urbanization and ecosystem services – relationships in a megalopolis. *Factors in Experimental Evolution of Organisms*, 33, 135–140. <https://doi.org/10.7124/FEEO.v33.1581> (in Ukrainian)
Мірошник Н. В. Зелена інфраструктура, урбанізація та екосистемні послуги – взаємозв'язки в мегаполісі. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2023. Т. 33. С. 135–140. <https://doi.org/10.7124/FEEO.v33.1581>
- Montalvan Castilla, J. E., Korkou, M., Sageidet, B. M., & Mawira Tarigan, A. K. (2025). Urban green spaces in early childhood education and care: insights from teachers in Stavanger, Norway. *European Early Childhood Education Research Journal*, 33(4), 709–726. <https://doi.org/10.1080/1350293X.2024.2412782>
- Mylnikova, O. O., Ilchenko, L. A., & Kozurman, N. I. (2025). The analysis of the species structure of green spaces on the territory of preschool children's institutions in Dnipro. *Taurida Scientific Herald. Series: Rural Sciences*, 143(2), 326–336. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.37> (in Ukrainian)
Мильнікова О. О., Ільченко Л. А., Козурман Н. І. Аналіз видової структури зелених насаджень на території дошкільних дитячих установ м. Дніпро. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2025. №. 143, Ч. 2. С. 326–336. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.37>
- Omelianova, V., & Strelchuk, L. (2021). Reconstruction and greening of general educational institutions. *Collection of scientific papers of Uman National University of Horticulture*, 98, 270–280. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.37> (in Ukrainian)
Омельянова В. Ю., Стрельчук Л. М. Реконструкція та озеленення загальноосвітніх навчальних закладів. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2021. Вип. 98. С. 270–280. <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2021-98-1-270-280>

- Pallardy, S. G. (2008). Photosynthesis. In S. G. Pallardy (Ed.), *Physiology of woody plants* (3rd ed., pp. 107–167). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012088765-1.50006-3>
- Pototska, S. O. (Ed.). (2021). *Optimization of green zones of the Chernihiv Polissia territories*. Chernihiv Polytechnic National University. (in Ukrainian).
Оптимізація зелених зон територій Чернігівського Полісся : монографія / за заг. ред. С. О. Потоцької. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. 198 с.
- Puhakka, R., Rantala, O., Roslund, M. I., Rajaniemi, J., Laitinen, O. H., Sinkkonen, A., & ADELE Research Group. (2019). Greening of daycare yards with biodiverse materials affords well-being, play and environmental relationships. *International journal of environmental research and public health*, 16(16), 2948. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162948>
- Rodríguez, J. P., Beard, T. D., Bennett, E. M., Cumming, G. S., Cork, S., Agard, J., Dobson, A. P., & Peterson, G. D. (2006). Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 11(1), 28. <https://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art28/>
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H. M., Gawronska, H., & Gawronski, S. W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 427, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084>
- Salmond, J. A., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., Demuzere, M., Dirks, K. N., Heaviside, C., Lim, S., Macintyre, H., McInnes, R. N., & Wheeler, B. W. (2016). Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health*, 15(S1). <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>
- Stange, E. E., Barton, D. N., Andersson, E., & Haase, D. (2022). Comparing the implicit valuation of ecosystem services from nature-based solutions in performance-based green area indicators across three European cities. *Landscape and Urban Planning*, 219, 104310. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104310>
- State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy of Ukraine. (2001). Instructions for the inventory of green spaces in settlements of Ukraine: Order No. 226 of December 24, 2001. (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02#Text>
Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України. Інструкція з інвентаризації зелених насаджень у населених пунктах України: Наказ від 24.12.2001 № 226. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02#Text>
- Vasutynska, K. A. (2021). Assessment of the ecosystem service indicators of urban green zones in relation with the urbogenic load of Ukraine regions. *Environmental Sciences*, 7(39), 36–43. <http://dx.doi.org/10.30970/vlubs.2024.93.04> (in Ukrainian)
Васютинська К. А. Оцінка показників екосистемних послуг міських зелених зон залежно від урбогенного навантаження регіонів України. *Екологічні науки*. 2021. Вип. 7 (34). С. 36–43. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.7>
- Xiao, Q., McPherson, E. G., Ustin, S. L., & Grismer, M. E. (2000). A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D23), 29173–29188. <https://doi.org/10.1029/2000JD900343>
- Zhu, Y., & Carter, M. (2025). The impact of greening interventions in school grounds on social behavior and cognitive performance among primary school children. *Frontiers in Public Health*, 13, 1620199. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1620199>
- Zhuk, A. V., & Myshiliuk, I. I. (2025). GIS-based inventory of street trees as a tool for managing urban green infrastructure in Chernivtsi. *Biological Systems*, 17(1), 120–130. <https://doi.org/10.31861/biosystems2025.01.120> (in Ukrainian)

Жук А. В., Мишілюк І. І. ГІС-облік вуличних деревних насаджень як інструмент управління зеленою інфраструктурою міста Чернівці. *Біологічні системи*. 2025. Т. 17, № 1. С. 120–130. <https://doi.org/10.31861/biosystems2025.01.120>

Received: 22.02.2026. **Accepted:** 14.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Мишілюк І., Жук А. Видова структура дендрофлори закладів дошкільної освіти міста Чернівці як чинник формування екосистемних послуг. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 28-41. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.2>

Cite this article in APA style as:

Myshiliuk, I., & Zhuk, A. (2026). Vydova struktura dendroflory zakladiv doshkilnoi osvity mista Chernivtsi yak chynnyk formuvannia ekosystemnykh posluh [Species composition of the dendroflora in preschool educational institutions in Chernivtsi city as a driver of ecosystem services]. *Biota. Human. Technology*, (1), 28-41. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.2> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Myshiliuk I. [*in Ukrainian: Мишілюк І.*] ¹, PhD Student, email: myshiliuk.iryana@chnu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9188-3416
Department of Ecology and Biomonitoring, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
2 Kotsiubynskyi Street, Chernivtsi, 58012, Ukraine

Zhuk A. [*in Ukrainian: Жук А.*] ², D.Sc. (Biology), Assoc.Prof., email: a.zhuk@chnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0405-8037
Department of Ecology and Biomonitoring, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
2 Kotsiubynskyi Street, Chernivtsi, 58012, Ukraine

¹ Field inventory, data curation, formal analysis, visualisation, original draft writing.

² Conceptualization, methodology, formal analysis, supervision, critical revision of the manuscript.



ZOOBIOTA

ЗООБИОТА



UDC 599.744.121:591.151:572.71

DOI: 10.58407/bht.1.26.3



Copyright (c) 2026 Ishtvan Zhelitski

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Ishtvan Zhelitski

GROWTH AND SEXUAL DIMORPHISM OF CRANIOMETRIC MEASUREMENTS OF THE RED FOX (*VULPES VULPES* L.) IN TRANSCARPATIA



Іштван Желіцькі

РІСТ ТА СТАТЕВИЙ ДИМОРФІЗМ КРАНІОМЕТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЛИСИЦІ ЗВИЧАЙНОЇ (*VULPES VULPES* L.) НА ЗАКАРПАТТІ

ABSTRACT

Purpose of the work. This study investigates sexual dimorphism in the red fox (*Vulpes vulpes*) population of Zakarpattia based on the analysis of 75 skulls from the Zoological Museum of Uzhhorod National University. To address existing gaps in knowledge, 26 cranial measurements were evaluated with consideration of both age and sex. This approach enabled the assessment of growth dynamics, the characterization of morphological variation, and the identification of key features of sexual dimorphism within the population. The results provide baseline data for future studies and contribute to a broader understanding of intraspecific variation across the species' range.

Methodology. Craniometric traits were analyzed across different sexes and age groups. Statistical analyses were conducted using SPSS, PAST, and MS Excel. Both univariate and multivariate analyses of variance (ANOVA) were applied, revealing significant differences between sexes and among age groups. Additionally, Principal Component Analysis (PCA) was performed to identify the measurements contributing most to overall variation.

Scientific novelty. The study provides essential morphometric baseline data for red foxes in a poorly studied region and improves understanding of intraspecific variability. The findings emphasize the combined influence of growth patterns, sexual selection, and ecological factors in shaping cranial sexual dimorphism.

Conclusions. Cranial growth was most pronounced up to 5–6 months of age, followed by a slowdown and occasional negative increments. The results suggest that sexual dimorphism in this population is primarily shaped by sexual selection and male–male competition, with larger males potentially having a reproductive advantage. At the same time, environmental constraints, particularly food availability, may limit excessive body size, leading to an optimal size range shared by both sexes. Size-related niche differentiation may further reduce intraspecific competition.

Key words: *Vulpes vulpes*, craniometry, sexual dimorphism, growth patterns, Transcarpathia

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. У цьому дослідженні проаналізовано статевий диморфізм популяції лисиці звичайної (*Vulpes vulpes*) на Закарпатті на основі вивчення 75 черепів із колекції Зоологічного музею Ужгородського національного університету. З метою детальнішого вивчення було проаналізовано 26 краніометричних показників з урахуванням віку та статі. Такий підхід дав змогу оцінити динаміку росту, охарактеризувати морфологічну мінливість та визначити ключові ознаки статевого диморфізму в межах популяції. Отримані результати формують базу даних для подальших досліджень і сприяють кращому розумінню внутрішньовидової мінливості в межах ареалу виду.

Методологія. Краніометричні показники аналізувалися з урахуванням статі та вікових груп. Статистичний аналіз виконано із застосуванням програм SPSS, PAST та MS Excel. Було використано як однофакторний, так і багатфакторний дисперсійний аналіз (ANOVA), що виявив статистично значущі відмінності між статями та віковими групами. Додатково проведено аналіз головних компонент (PCA) для визначення показників, які роблять найбільший внесок у загальну варіацію.

Наукова новизна. Дослідження надає базові морфометричні дані для лисиці звичайної в недостатньо вивченому регіоні та поглиблює розуміння внутрішньовидової мінливості. Отримані результати підкреслюють поєднаний вплив динаміки росту, статевого добору та екологічних чинників на формування краніального статевого диморфізму.

Висновки. Найінтенсивніший ріст краніальних ознак спостерігався до 5–6 місяців, після чого відзначалося його уповільнення та поодинокі випадки негативного приросту. Отримані результати свідчать, що статевий диморфізм у досліджуваній популяції зумовлений насамперед статевим добром і конкуренцією між самцями, при цьому більші самці можуть мати репродуктивну перевагу. Водночас екологічні обмеження, зокрема доступність кормових ресурсів, можуть стримувати надмірне збільшення розмірів тіла, сприяючи формуванню оптимального розміру, спільного для обох статей. Розподіл екологічної ніші, пов'язаний із розмірними відмінностями, може додатково зменшувати внутрішньовидову конкуренцію.

Ключові слова: *Vulpes vulpes*, краніометрія, статевий диморфізм, закономірності росту, Закарпаття

Introduction

The red fox is highly adaptable and can thrive in a wide variety of habitats across almost all continents (Heltay, 1989). This broad distribution has led to the development of around 44 subspecies (Larivière & Pasitschniak-Arts, 1996).

Studies of red fox populations from different parts of the world have produced varied results. In the Czech Republic, significant sexual differences were found in five of the 21 craniometric traits examined (Brudnicki et al., 2009). In Hungary, such differences appeared mainly among sexually mature individuals, while they were less pronounced in younger animals; nevertheless, female skulls still differed markedly from those of males (Csányi et al., 2023). Clear sexual dimorphism has also been documented in populations from North America (Churcher, 1960), Australia (Forbes-Harper et al., 2017), the Czech Republic (Hartová-Nentvichová et al., 2010), Slovakia, Romania, and Ukraine (Hell et al., 1989).

Age in foxes is usually estimated using cranial suture ossification or dental characteristics (Churcher, 1960; Heltay, 1989). However, data on the red fox in Transcarpathia remain scarce. According to Korchynskyi et al. (1993), between 1946 and 1992, only 10.5% of all published studies on the Carpathian region's mammalian fauna focused on this group, highlighting the need for more comprehensive research.

With the aim of filling this knowledge gap, we examined 26 cranial measurements, taking into account both age and sex. This allowed us to investigate growth patterns, explore morphological variation, and identify the main features of sexual dimorphism within the population. Our study provides baseline data that can support future research on the red fox in this understudied region and contribute to a better understanding of intraspecific variation across its range.

Materials and Methods

In recent study we measured 75 skulls of red foxes from the scientific collections of the UzhNU Zoological Museum, including 14 skulls each from males and females in all age groups, except for 24-month-old females, of which only five were measured. Fox skulls included in the study were collected from 1951 to 1976 in Transcarpathia. To assess sexual variation, skulls from all age groups were included. Age determination was carried out based on the

sagittal suture (Fig. 1). We were able to distinguish three age groups: 5–6 months, 11–12 months, and older than 24 months. Measurements were taken using a caliper with an accuracy of 0.1 mm.

For statistical analysis, we used the software packages SPSS, PAST and MS Excel. Data were analyzed using univariate analysis of variance (Univariate ANOVA) and multivariate analysis of variance (Multivariate ANOVA). Since the dataset includes many craniometric traits, we also performed a Principal Component Analysis (PCA) which allows us to assess which measurements explain the largest proportion of the variation.

List of cranial measurements:

1. Total length: akrokranion – prosthion (TL).
2. Basal length: basion – prosthion (BL).
3. Neurocranium length: basion – nasion (NL).
4. Upper neurocranium length: akrokranion – frontal midpoint (UNL).
5. Viscerocranial length: nasion – prosthion (VCL).
6. Facial length: frontal midpoint – prosthion (FL).
7. Greatest length of the nasals: nasion – rhinion (GLN).
8. Median palatal length: staphylion – prosthion (MPL).
9. Length of the molar row (LMR).
10. Length of the premolar row (LPR).
11. Length of the carnassial, measured at the cingulum (LC).
12. Greatest breadth of the carnassial (LBC).
13. Greatest mastoid breadth: otion – otion (GMB).
14. Greatest breadth of the occipital condyles (GBOC).
15. Height of the foramen magnum: basion – opisthion (HFM).
16. Maximum width of neurocranium: euryon – euryon (MWN).
17. Maximum zygomatic width: zygon – zygon (MZW).
18. Least breadth of skull: breadth at the postorbital constriction (LBS).
19. Frontal breadth: ectorbitale – ectorbitale (FB).
20. Least breadth between the orbits: entorbitale – entorbitale (FBO).
21. Greatest palatal breadth: measured across the outer borders of the alveoli (GPB).
22. Least palatal breadth: measured behind the canines (LPB).

23. Breadth at canine alveoli (BCA).
 24. Skull height without the sagittal crest (SHSC).
 25. Skull height (SH).
 26. Length of neurocranium: staphylion – basion (LN).

Results and discussion

The growth of craniometric parameters is most intensive up to 5–6 months, after which, over the next six months, the mean of growth is

2.21 % for males and 3.70 % for females. After the first year, the mean of growth amounts to 3.52 % in males and 0.89 % in females. In processing the data, we also observed negative growth during this period. Postorbital breadth exhibits a growth trend opposite to all other traits (Fig. 2.). Hartová-Nentvichová (2010) arrived at the same conclusion. The braincase area posterior to the orbits is undeveloped in juveniles and progressively narrows with the growth of the masticatory muscles (Ansorge, 1994).

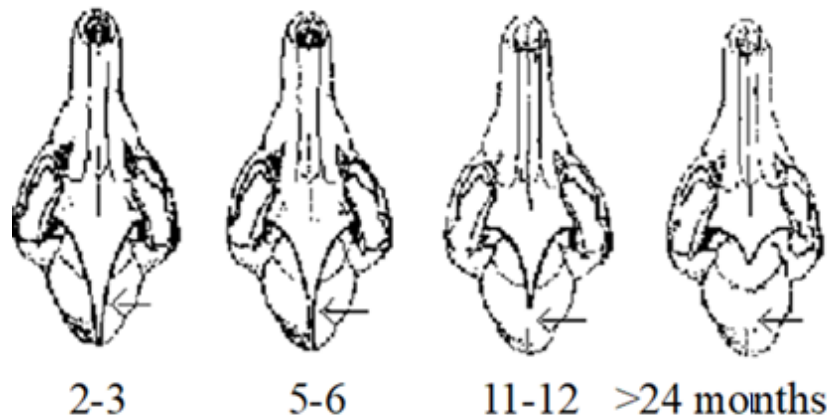


Fig. 1. Change of the sagittal suture during ontogeny (Heltay, 1989)

The Principal Component Analysis (Fig. 3) indicates a moderate sexual dimorphism in skull morphology. Males show a larger dispersion, particularly along PC1, suggesting higher variance in size-related traits. Females form a more compact cluster. Despite the shift between group centroids, considerable overlap remains between the convex hulls, implying that individual variation exceeds sex-based differentiation.

Fig. 4 and 5 compare males and females, highlighting measurements with high loadings on PC1 – including total length, basal length, nasal length, greatest mastoid breadth, greatest breadth of the occipital condyles, and maximum zygomatic width – which drive most of the separation among individuals along this axis.

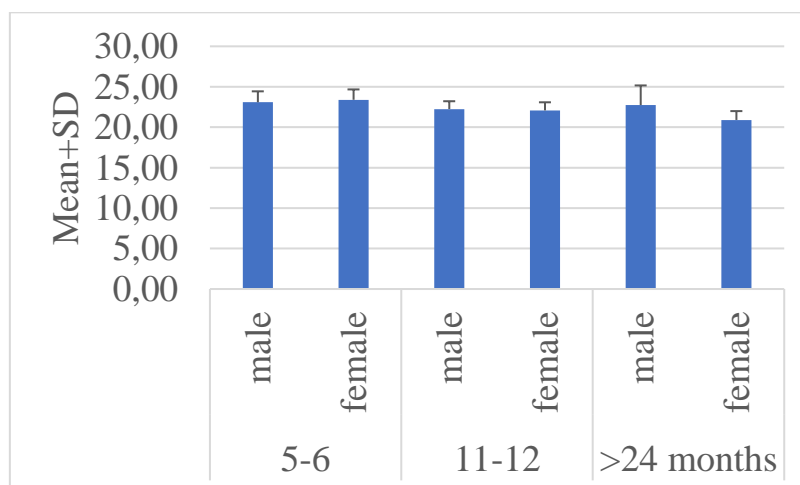


Fig. 2. Comparison of the breadth at the postorbital constriction (LBS) between sexes and across age groups

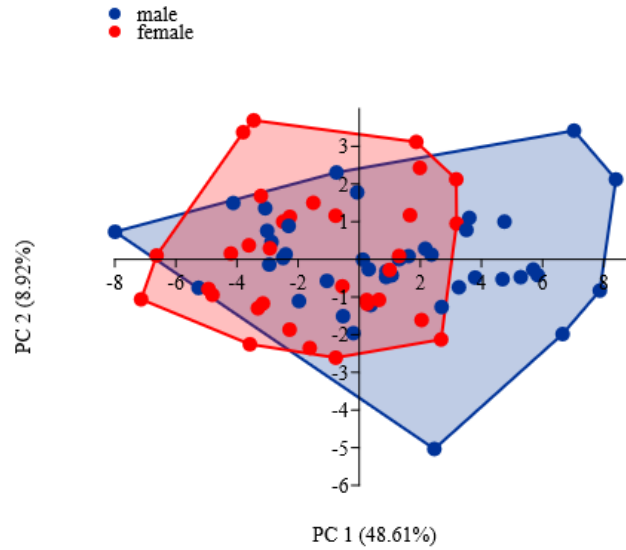


Fig. 3. Distribution of males and females revealed by PCA

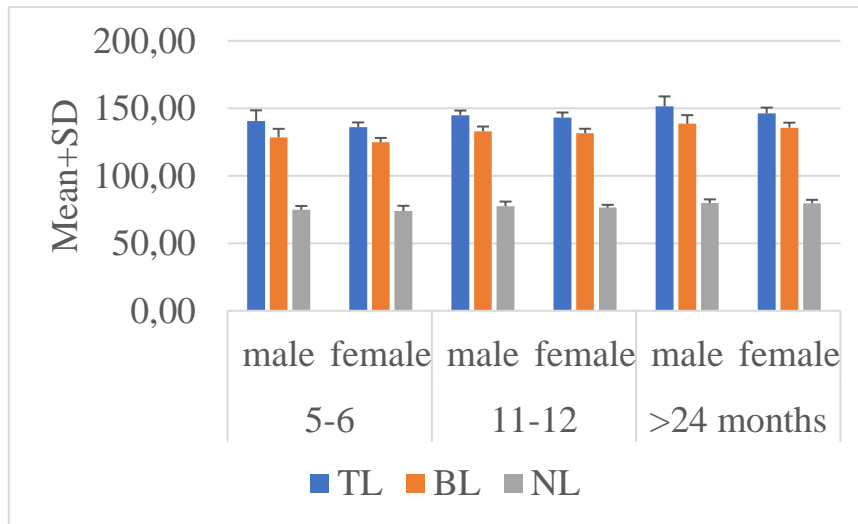


Рис. 4. Comparison of cranial length measurements with high PC1 loadings between sexes and across age groups

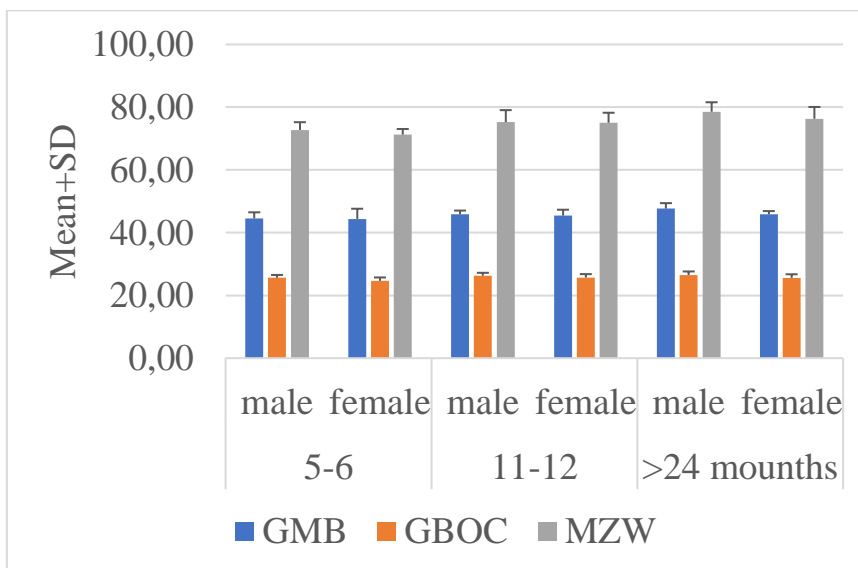


Рис. 5. Comparison of cranial breadth measurements with high PC1 loadings between sexes and across age groups

Adult females are 0.11–2.54 % smaller than adult males; however, in the case of the least breadth between the orbits, females are 0.79% larger. Multivariate analysis of variance (ANOVA) confirms these findings, showing significant differences between the sexes ($F = 2.20$; $p = 0.01$) and among the age classes ($F = 2.24$; $p = 0.00$). According to the tests of between-subjects effects (univariate ANOVA), there are significant differences between the sexes in 12 measurements and among age classes in 20.

Our results indicate significant sexual dimorphism in multiple cranial traits. Females and males differ significantly in total length (TL), basal length (BL), viscerocranial length (VCL), facial length (FL), nasal length (GLN), and the dimensions of the dental rows (MPL, LMR, LPR, LC, LBC). These differences suggest that males generally possess larger viscerocranial regions, as well as more robust dentition. Functionally, this may reflect differences in bite force, prey handling, or intraspecific competition, as larger male skulls can support stronger jaw muscles and larger teeth. Age-related differences were observed in nearly all cranial regions, including total length, basal length, neurocranial and viscerocranial lengths, facial length, palatal length, and cranial breadths (TL, BL, NL, UNL, VCL, FL, MPL, LMR, LPR, GMB, GBOC, MZW, BCA, LN, etc.). The most pronounced changes occur in the first year of life, indicating rapid growth in both the neurocranial and viscerocranial regions. In particular, facial length and palatal length increase with age, likely reflecting both masticatory development and adaptation to feeding ecology. Cranial breadths and condylar dimensions increase more gradually, consistent with the development of jaw musculature and overall skull robustness.

Overall, these results demonstrate that the skull undergoes coordinated growth, with certain regions (e.g., viscerocranium and dentition) showing faster changes, while others (e.g., neurocranial breadths) develop more slowly.

Sexual dimorphism in red foxes may result from sexual selection and the need to reduce competition between the sexes (Lynch, 1996). Male competition is often expressed through antagonistic behaviors, and larger males clearly have an advantage over smaller ones, giving them greater reproductive success (Abramov & Puzachenko, 2005). However, being larger can also be a handicap for males, especially in monogamous species where food is limited (Hartová-Nentvichová et al., 2010). In such cases, selective forces tend to favor an optimal body size that is similar for both males and females. Sexual size differences in red foxes may also lead to partial niche separation, helping to reduce intraspecific competition for food.

Conclusions

The study highlights intraspecific variation in red fox populations, including sex- and age-related cranial differences, and provides baseline morphometric data for further ecological and morphological research in understudied regions like Transcarpathia.

According to our results on fox skulls from Transcarpathia, craniometric growth is most intensive during the first 5–6 months, and slowing after. Growth rates differ between sexes in early age: females show relatively higher growth (3.70 %) than males (2.21 %).

After the first year, male growth exceeds female growth (3.52 % vs. 0.89 %), although occasional negative growth was observed in some parameters.

Postorbital breadth shows an inverse growth trend compared to other cranial measurements, reflecting the narrowing of the posterior braincase associated with the development of masticatory muscles.

Sex differences were significant in 12 measurements, age differences in 20.

Adult females were generally 0.11–2.54 % smaller than males, except for the least postorbital breadth, where females were 0.79 % larger.

Size differences between sexes are likely influenced by sexual selection and male–male competition.

Фінансування / Funding

Дослідження не отримувало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Дані, що підтверджують результати дослідження, доступні у автора за обґрунтованим запитом / The data supporting the findings of this study are available from the author upon reasonable request.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Для цього дослідження не було необхідності отримувати етичне схвалення, оскільки жодна тварина не зазнала шкоди під час неінвазивного дослідження / No ethical approval was required for this study, as no animals were harmed during the non-invasive research.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Інформована згода не застосовувалася, оскільки дослідження не включало участі людей / Informed consent was not applicable, as the study did not involve human participants.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів / The author declares no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Під час підготовки цього рукопису не використовувалися технології генеративного штучного інтелекту / No generative artificial intelligence or AI-assisted technologies were used in the preparation of this manuscript.

References

- Abramov, V. A., & Puzachenko, A. Yu. (2005). Sexual dimorphism of craniological characters in Eurasian badgers, *Meles ssp.* (Carnivora, Mustelidae). *Zoologischer Anzeiger - A Journal of Comparative Zoology*, 244(1), 11–29. <https://doi.org/10.1016/j.jcz.2004.12.002>
- Ansorge, H. (1994). Intrapopular skull variability in the red fox, *Vulpes vulpes* (Mammalia: Carnivora: Canidae). *Zoologische Abhandlungen aus dem staatlichen Museum für Tierkunde in Dresden*, 48, 103–123.
- Brudnicki, W., Nowicki, W., Skoczylas, B., Jabłoński, R., & Kirkiłło-Stacewicz, K. (2009). Cechy kraniometryczne łisa pospolitego (*Vulpes vulpes* Linnaeus 1758). *Zootechnika*, 37, 21–30. <https://bibliotekanauki.pl/articles/832620.pdf> (in Polish)
- Churcher, C. S. (1960). Cranial variation in the North American red fox. *Journal of Mammalogy*, 41, 349–360. <https://doi.org/10.2307/1377493>
- Csányi, E., Sándor, B., & Sándor, Gy. (2023). Morphometric measurements of red foxes (*Vulpes vulpes*) in Somogy County, Hungary. *Hungarian Small Game Bulletin*, 15, 11–21. <https://doi.org/10.17243/mavk.2023.011>
- Forbes-Harper, J. L., Crawford, H. M., Dundas, S. J., Warburton, N. M., Adams, P. J., Bateman, P. W., Calver, M. C., & Fleming, P. A. (2017). Diet and bite force in red foxes: ontogenetic and sex differences in an invasive carnivore. *Journal of Zoology*, 303(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jzo.12463>
- Hartová-Nentvichová, M., Anděra, M., & Hart, V. (2010). Sexual dimorphism of cranial measurements in the red fox *Vulpes vulpes* (Canidae, Carnivora) from the Czech Republic. *Folia Zoologica*, 59(4), 285–294. <https://doi.org/10.25225/fozo.v59.i4.a3.2010>

Hell, P., Paule, L., Sevchenko, L.S., Danko, S., Panigaj, S., & Vitay, V. (1989). Craniometrical investigation of the red fox (*Vulpes vulpes*) from Slovak Carpathians and adjacent lowlands. *Folia Zoologica*, 38, 139–155. https://www.researchgate.net/publication/233992995_Craniometrical_investigation_of_the_red_fox_Vulpes_vulpes_L_from_the_Slovak_Carpathians_and_adjacent_lowlands

Heltay, I. (1989). *A róka ökológiája és vadászata*. Mezőgazdasági Kiadó.

Larivière, S., & Pasitschniak-Arts, M. (1996). *Vulpes vulpes*. *Mammalian Species*, (537), 1–11. <https://doi.org/10.2307/3504236>

Lynch, J. M. (1996). Sexual dimorphism in cranial size and shape among red foxes *Vulpes vulpes* from north-east Ireland. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 96B, 21–26. <https://doi.org/10.2307/20499952>

Korchinskyi, O. V. (1993). Dynamics of rodent populations in Transcarpathia. In *Fauna of the Eastern Carpathians: Current Status and Conservation* (pp. 338–341). Uzhhorod, Ukraine: Proceedings of International Conference.

Received: 18.03.2026. **Accepted:** 25.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Zhelitski I. Growth and sexual dimorphism of craniometric measurements of the red fox (*Vulpes vulpes* L.) in Transcarpathia. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. P. 43-49. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.3>

Cite this article in APA style as:

Zhelitski, I. (2026). Growth and sexual dimorphism of craniometric measurements of the red fox (*Vulpes vulpes* L.) in Transcarpathia. *Biota. Human. Technology*, (1), 43-49. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.3>

Information about the authors:

Zhelitski I. [*in Ukrainian: Желіцькі І.*], Senior lecturer, PhD student, email: zselicki.istvan@kmf.org.ua
ORCID: 0000-0001-5781-9509
Department of Biology and Chemistry, Ferenc Rákóczi II Transcarpathian Hungarian University
6 Kossuth Square, Berehovo, 90200, Ukraine
Department of Zoology, Uzhhorod National University
3, Narodna Square, Uzhhorod, 88000, Ukraine



ENVIRONMENTAL POLLUTION STRESSES AND ORGANISMS' RESPONSE

**СТРЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ
ТА РЕАКЦІЯ ОРГАНІЗМІВ**



UDC 582.28:639.311

DOI: 10.58407/bht.1.26.4



Copyright (c) 2026 Lidiia Polotnianko, Dmytrii Filonenko

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Лідія Полотнянко, Дмитрій Філоненко

**БІОХІМІЧНІ МАРКЕРИ ТОКСИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА
АДАПТАЦІЙНИХ РЕАКЦІЙ СТАВКОВИХ РИБ
ЗА ДІЇ МІКОТОКСИНІВ**



Lidiia Polotnianko, Dmytrii Filonenko

**BIOCHEMICAL MARKERS
OF TOXIC LOAD AND ADAPTATIVE
REACTIONS OF POND FISH TO MYCOTOXINS**

АНОТАЦІЯ

Мікотоксини, як вторинні метаболіти мікроміцетів, є одними з найнебезпечніших біологічних контамінантів кормової сировини та комбікормів для риб. У системі ставкової аквакультури їх дія супроводжується порушенням метаболічного гомеостазу гідробіонтів, зниженням продуктивності та формуванням ризиків біобезпеки. Особливу небезпеку для риб становлять афлатоксин В1 і Т-2 токсин, які характеризуються вираженою гепатотоксичною, генотоксичною та прооксидантною дією. У зв'язку з цим актуальним є пошук інформативних біохімічних маркерів, що дозволяють оцінити рівень токсичного навантаження та адаптаційні реакції організму риб за умов мікотоксикозів.

Мета роботи. визначити інформативні біохімічні маркери токсичного навантаження та адаптаційних реакцій ставкових риб за дії мікотоксинів, зокрема афлатоксину В1 та Т-2 токсину, шляхом аналізу змін показників енергетичного обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних процесів у тканинах риб різного виду та віку.

Методологія ґрунтувалася на експериментальному моделюванні мікотоксичного навантаження у коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) та карася звичайного (*Carassius carassius* Linnaeus, 1758) різного віку. Дію афлатоксину В1 і Т-2 токсину вивчали в концентрації 2 гранично допустимих рівнів. Стан енергетичного обміну оцінювали за вмістом аденілових нуклеотидів (АТФ, АДФ, АМФ), аденілатного енергетичного заряду та показників аденілаткіназної реакції. Інтенсивність перекисного окиснення ліпідів визначали за вмістом тіобарбітуровокислотно-активних продуктів. Метаболічні процеси аналізували за показниками фосфатного та енергетичного обміну в тканинах риб.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до оцінки біохімічних маркерів мікотоксичного навантаження з урахуванням виду та віку ставкових риб. Уперше показано взаємозв'язок між порушенням нуклеїнового обміну, активацією перекисного окиснення ліпідів та адаптаційною перебудовою енергетичного метаболізму в організмі коропових риб за дії афлатоксину В1 і Т-2 токсину. Встановлено міжвидові та вікові відмінності чутливості риб до мікотоксичного впливу.

Висновки. Установлено, що дія афлатоксину В1 та Т-2 токсину призводить до зниження вмісту АТФ, зростання концентрацій АДФ і АМФ, зменшення аденілатного енергетичного заряду та активації перекисного окиснення ліпідів у тканинах риб. Виявлені зміни мають як деструктивний, так і адаптаційний характер і відображають напруження метаболічних процесів за умов токсичного стресу. Показано, що карась звичайний і цьоголітки є більш чутливими до дії мікотоксинів порівняно з коропом лускатим і старшими віковими групами. Отримані результати підтверджують доцільність використання показників нуклеїнового обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних зрушень як інформативних біохімічних маркерів токсичного навантаження та адаптаційних реакцій ставкових риб у системі аквакультури.

Ключові слова: мікотоксини, афлатоксин В1, Т-2 токсин, ставкові риби, енергетичний обмін, нуклеїновий обмін, перекисне окиснення ліпідів, адаптаційні реакції, біохімічні маркери

ABSTRACT

Mycotoxins, as secondary metabolites of micromycetes, are among the most dangerous biological contaminants of feed raw materials and compound feeds for fish. In pond aquaculture systems, their impact is associated with disturbances of metabolic homeostasis in hydrobionts, reduced productivity, and the formation of biosafety risks. Aflatoxin B1 and T-2 toxin are considered particularly hazardous for fish due to their pronounced hepatotoxic, genotoxic, and pro-oxidant effects. In this context, the identification of informative biochemical markers that allow assessment of toxic load and adaptive responses in fish organisms under mycotoxicosis conditions is of significant relevance.

Purpose of the work. The aim of the study was to identify informative biochemical markers of toxic load and adaptive responses in pond fish exposed to mycotoxins, specifically aflatoxin B1 and T-2 toxin, through the analysis of changes in energy metabolism indicators, lipid peroxidation intensity, and metabolic processes in tissues of fish of different species and ages.

Methodology. The study was based on experimental modeling of mycotoxic exposure in scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) and crucian carp (*Carassius carassius* Linnaeus, 1758) of different age groups. The effects of aflatoxin B1 and T-2 toxin were investigated at concentrations corresponding to two maximum permissible levels. The state of energy metabolism was assessed by determining the content of adenylate nucleotides (ATP, ADP, AMP), adenylate energy charge, and indicators of the adenylate kinase reaction. The intensity of lipid peroxidation was evaluated by measuring thiobarbituric acid-reactive substances. Metabolic processes were analyzed using indicators of phosphate and energy metabolism in fish tissues.

Scientific novelty. The scientific novelty of this study lies in a comprehensive approach to evaluating biochemical markers of mycotoxic load with consideration of fish species and age. For the first time, the relationship between disturbances in nucleic acid metabolism, activation of lipid peroxidation, and adaptive restructuring of energy metabolism in cyprinid fish under the action of aflatoxin B1 and T-2 toxin has been demonstrated. Interspecific and age-related differences in fish sensitivity to mycotoxic exposure were established.

Conclusions. It was found that exposure to aflatoxin B1 and T-2 toxin leads to a decrease in ATP content, an increase in ADP and AMP concentrations, a reduction in adenylate energy charge, and activation of lipid peroxidation in fish tissues. The detected changes exhibit both destructive and adaptive characteristics and reflect metabolic stress under toxic conditions. Crucian carp and young-of-the-year fish were shown to be more sensitive to mycotoxin exposure compared to scaly carp and older age groups. The obtained results confirm the feasibility of using indicators of nucleic acid metabolism, lipid peroxidation intensity, and metabolic shifts as informative biochemical markers of toxic load and adaptive responses in pond fish within aquaculture systems.

Key words: mycotoxins, aflatoxin B1, T-2 toxin, pond fish, energy metabolism, nucleic acid metabolism, lipid peroxidation, adaptive responses, biochemical markers

Вступ

Мікотоксини є однією з найбільш поширених і біологічно небезпечних груп вторинних метаболітів мікроміцетів, що контамінують кормову сировину та готові корми для гідробіонтів. Поширеність афлатоксинів підтверджується численними дослідженнями харчових продуктів різного походження, зокрема консервованої та переробленої продукції, що свідчить про стійкість цих токсинів до технологічної обробки та їх здатність зберігатися в харчових ланцюгах (Mushtaq et al., 2012; Hassan, 2018). У системі сучасного ставкового рибництва проблема мікотоксикозів набуває особливої актуальності у зв'язку з інтенсифікацією виробництва, використанням концентрованих комбікормів і глобальними кліматичними змінами, які сприяють росту токсинопродукуючих грибів (Koletsy et al., 2021; Gruber-Dorninger et al., 2025). Серед найбільш небезпечних для риб мікотоксинів виділяють афлатоксин В1 та Т-2 токсин, що

характеризуються вираженою гепатотоксичною, генотоксичною та прооксидантною дією (Piskova et al., 2021; Liu et al., 2023).

Надходження мікотоксинів в організм риб супроводжується порушенням ключових метаболічних процесів, насамперед білкового, ліпідного та нуклеїнового обміну, а також активацією вільнорадикальних реакцій і розвитком оксидативного стресу (Simonova & Mekhed, 2025a; Filonenko & Mekhed, 2025). Показники перекисного окиснення ліпідів, стан антиоксидантної системи, вміст нуклеїнових кислот і зміни біохімічного складу тканин розглядаються як інформативні біохімічні маркери токсичного навантаження, що відображають як ступінь ушкодження клітинних структур, так і адаптаційні можливості організму (Nikolaenko et al., 2023; Polotnianko & Mekhed, 2023).

Численні експериментальні дослідження свідчать, що вплив афлатоксину В1 і Т-2 токсину на риб супроводжується зниженням темпів росту, морфофункціональними змі-

нами печінки, дестабілізацією мембран і накопиченням токсинів у тканинах, що має як екологічні, так і біобезпекові наслідки (Fornari et al., 2023; Polotnianko & Mekhed, 2024). Водночас біохімічні реакції організму риб на дію мікотоксинів мають адаптаційний характер і залежать від виду, віку, тривалості та інтенсивності токсичного впливу, що зумовлює необхідність комплексної оцінки метаболічних змін (Mekhed, 2024; Shkurko et al., 2024).

У цьому контексті актуальним є визначення комплексу біохімічних маркерів, які дозволяють об'єктивно оцінити рівень токсичного навантаження та адаптаційні реакції ставкових риб за дії мікотоксинів. Такий підхід має важливе значення для поглиблення уявлень про механізми мікотоксичної дії, прогнозування стійкості гідробіонтів до контамінованих кормів і розробки біологічно обґрунтованих заходів зниження ризиків у системі аквакультури (Vanhoutte et al., 2016; Gruber-Dorninger et al., 2025).

Мета роботи – визначення інформативних біохімічних маркерів токсичного навантаження та адаптаційних реакцій ставкових риб за дії мікотоксинів, шляхом аналізу змін показників метаболічних процесів у тканинах риб різного виду та віку. Досягнення поставленої мети спрямоване на поглиблення уявлень про механізми мікотоксичної дії, оцінку стійкості організму риб до токсичного впливу та наукове обґрунтування підходів до біобезпеки в умовах ставкової аквакультури.

Мікотоксини є широко поширеними контамінантами кормової сировини та комбікормів для риб, що зумовлює їх постійне надходження до організму гідробіонтів у процесі вирощування (Koletsy et al., 2021; Gruber-Dorninger et al., 2025). Дослідження останніх років свідчать про багатокомпонентний характер контамінації кормів, коли одночасно виявляють кілька регульованих, маскованих і «нових» мікотоксинів, що потенційно підсилює токсичний ефект і ускладнює оцінку ризиків для аквакультури (Kovalsky et al., 2016; Gruber-Dorninger et al., 2025).

Афлатоксин В1 вважається одним із найбільш небезпечних мікотоксинів завдяки вираженій гепатотоксичній, канцерогенній та генотоксичній дії. Його негативний вплив детально описано для різних груп тварин і

людини, зокрема у випадках гострих та хронічних афлатоксикозів (Lye et al., 1995; Strosnider et al., 2006). Для риб встановлено, що афлатоксин В1 порушує ріст, обмін білків і ліпідів, спричиняє структурні та функціональні ушкодження печінки й інших органів (Liu et al., 2023; Fornari et al., 2023). Аналогічно Т-2 токсин характеризується цитотоксичною та прооксидантною дією, що призводить до глибоких метаболічних порушень у гідробіонтів (Mekhed, 2024).

Одним із ключових механізмів мікотоксичної дії є індукція оксидативного стресу, що проявляється активацією перекисного окиснення ліпідів та дестабілізацією клітинних мембран. Показано, що інтенсивність ПОЛ у тканинах риб зростає під впливом токсикантів різної хімічної природи, включно з мікотоксинами, і може розглядатися як чутливий біохімічний маркер токсичного навантаження (Simonova & Mekhed, 2025b). Зміни рівня продуктів ПОЛ корелюють із функціональним станом печінки та антиоксидантної системи, що дозволяє оцінювати ступінь ушкодження і адаптаційні резерви організму.

Важливе місце серед біохімічних маркерів мікотоксикозів займають показники нуклеїнового обміну. Порушення синтезу та вмісту нуклеїнових кислот у тканинах риб свідчать про генотоксичний ефект афлатоксину В1 та пригнічення проліферативних процесів (Filonenko & Mekhed, 2025). Такі зміни розглядаються не лише як прояв токсичного ураження, а й як показник глибини метаболічної перебудови клітин у відповідь на дію ксенобіотиків.

Дослідження, проведені на коропових рибах, демонструють, що біохімічні та гематологічні показники можуть зазнавати адаптивних змін у відповідь на хронічне токсичне навантаження, відображаючи спробу організму зберегти гомеостаз (Nikolaenko et al., 2023; Shkurko et al., 2024). Водночас накопичення мікотоксинів у тканинах, зокрема у м'язах і печінці, створює ризики як для здоров'я риб, так і для безпеки продукції аквакультури (Polotnianko & Mekhed, 2023).

Дослідження, проведені в різних регіонах світу, свідчать про систематичне виявлення мікроскопічних грибів і мікотоксинів у продуктах тваринного походження, включно з ферментованими м'ясними виробами, що підкреслює універсальний характер

проблеми мікотоксикозів у агропродовольчих системах (Pleadin et al., 2017). Забезпечення якості та безпеки продукції тваринного походження безпосередньо пов'язане з контролем контамінації кормів токсичними сполуками, зокрема мікотоксинами, що розглядається як один із ключових напрямів сучасних стратегій харчової безпеки (Sevi et al., 2016). З огляду на доведену здатність мікотоксинів зберігатися у харчових продуктах та акумулюватися в трофічних ланцюгах, актуальним є дослідження механізмів їх дії на гідробіонтів і пошук біохімічних маркерів токсичного навантаження в умовах аквакультури (Mushtaq et al., 2012; Pleadin et al., 2017; Hassan, 2018).

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить, що комплексна оцінка біохімічних показників – інтенсивності перекисного окиснення ліпідів, стану нуклеїнового обміну та загальних метаболічних зрушень – є перспективним підходом для виявлення маркерів токсичного навантаження і адаптаційних реакцій ставкових риб за дії мікотоксинів. Однак питання інтегрованої інтерпретації цих маркерів з урахуванням виду риб і характеру токсичного впливу потребує подальших досліджень, що й зумовлює актуальність даної роботи.

Матеріали та методи дослідження

Експериментальні дослідження проводилися упродовж 2023–2025 років на базі проблемної науково-дослідної лабораторії екологічної біохімії, іхтіології та біокорозії природничо-математичного факультету Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка. Роботи зі стандартними зразками мікотоксинів виконувалися на базі акредитованої лабораторії Держпродспоживслужби України.

Об'єктом дослідження були ставкові риби родини Cyprinidae, зокрема короп лускатий (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) різного віку та карась звичайний (*Carassius carassius* Linnaeus, 1758). Риб утримували в експериментальних умовах у 200-літрових акваріумах з відстояною водопровідною водою за щільності посадки 1 екземпляр на 40 дм³ води. Упродовж досліду контролювали та підтримували стабільні гідрохімічні показники води (температура, вміст розчиненого кисню, рН).

Мікотоксичне навантаження моделювали шляхом внесення у воду або корм

розрахункових кількостей афлатоксину В1 або Т-2 токсину в концентрації, що відповідала 2 гранично допустимим концентраціям (2 ГДК). Контрольна група риб утримувалася в аналогічних умовах без додавання мікотоксинів. Тривалість експозиції визначалася схемою експерименту та становила від кількох діб до хронічного впливу.

Зміни показників енергетичного обміну в тканинах риб оцінювали за вмістом аденілових нуклеотидів (АТФ, АДФ, АМФ), які визначали методом висхідної одномірної тонкошарової хроматографії на силікагелевих пластинках «Sorbfil» з подальшим спектрофотометричним аналізом при довжині хвилі $\lambda = 260$ нм. Отримані значення використовували для розрахунку аденілатного енергетичного заряду (АЕЗ), співвідношення аденілових нуклеотидів та показника динамічної маси аденілаткіназної реакції (ДМАК), що дозволяло оцінити стан енергетичного метаболізму клітин у тканинах риб різного виду та віку.

Інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у тканинах риб визначали за вмістом вторинних продуктів ПОЛ – тіобарбітурової кислотно-активних продуктів (ТБК-активних сполук), які визначали спектрофотометричним методом за реакцією з тіобарбітуровою кислотою з вимірюванням оптичної густини при $\lambda = 532$ нм. Результати виражали в нмоль малонового діальдегіду на 1 г тканини, що дозволяло оцінити ступінь оксидативного ушкодження клітинних мембран за дії мікотоксинів.

Для характеристики метаболічних процесів у тканинах риб визначали вміст неорганічного фосфору за методом Фіске-Суббароу, а також аналізували зміни показників енергетичного обміну, що відображають функціональний стан клітин в умовах токсичного навантаження. Отримані біохімічні показники розглядали як інформативні маркери метаболічної перебудови та адаптаційних реакцій організму риб у відповідь на дію афлатоксину В1 та Т-2 токсину.

Комплексне використання методів аналізу нуклеїнового обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних процесів дозволило оцінити як рівень токсичного навантаження, так і адаптаційні можливості організму ставкових риб різного виду та віку.

Результати дослідження та обговорення

Результати досліджень свідчать, що дія афлатоксину В1 та Т-2 токсину супроводжується істотними змінами показників енергетичного обміну в тканинах ставкових риб.

У дослідних групах риб відзначалося зниження вмісту аденозинтрифосфату (АТФ) на тлі підвищення концентрацій аденозиндифосфату (АДФ) та аденозинмонофосфату (АМФ) порівняно з контролем, що свідчить про порушення енергетичного гомеостазу клітин (табл. 1).

Таблиця 1

Зміни показників нуклеїнового обміну в тканинах ставкових риб різного виду та віку за дії мікотоксинів ($M \pm m$)

Вид риби	Вік	Умови досліджу	АТФ, мкмоль/г тканини	АДФ, мкмоль/г тканини	АМФ, мкмоль/г тканини	АЕЗ
Короп лускатий	цьоголітки	Контроль	3,85 ± 0,12	1,24 ± 0,05	0,56 ± 0,03	0,83
		Афлатоксин В1	2,96 ± 0,10*	1,58 ± 0,06*	0,81 ± 0,04*	0,75
		Т-2 токсин	2,74 ± 0,09*	1,71 ± 0,07*	0,88 ± 0,05*	0,72
	дворічки	Контроль	4,12 ± 0,15	1,18 ± 0,04	0,49 ± 0,02	0,85
		Афлатоксин В1	3,21 ± 0,11*	1,46 ± 0,05*	0,73 ± 0,04*	0,78
		Т-2 токсин	3,02 ± 0,12*	1,59 ± 0,06*	0,79 ± 0,04*	0,75
Карась звичайний	цьоголітки	Контроль	3,64 ± 0,13	1,32 ± 0,06	0,61 ± 0,03	0,81
		Афлатоксин В1	2,88 ± 0,10*	1,62 ± 0,07*	0,86 ± 0,04*	0,73
		Т-2 токсин	2,65 ± 0,09*	1,75 ± 0,08*	0,94 ± 0,05*	0,70
	дворічки	Контроль	3,92 ± 0,14	1,25 ± 0,05	0,54 ± 0,03	0,84
		Афлатоксин В1	3,10 ± 0,11*	1,48 ± 0,06*	0,77 ± 0,04*	0,77
		Т-2 токсин	2,89 ± 0,10*	1,63 ± 0,07*	0,83 ± 0,04*	0,74

Одним із ключових наслідків дії мікотоксинів на організм риб є індукція оксидативного стресу, що підтверджується зростанням інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у тканинах дослідних груп. У результаті експерименту встановлено достовірне підвищення вмісту ТБК-активних продуктів у печінці та м'язовій тканині риб за дії як афлатоксину В1, так і Т-2 токсину.

Так, у печінці цьоголіток коропа лускатого вміст ТБК-активних продуктів у контрольній групі становив у середньому $3,6 \pm 0,2$ нмоль МДА/г тканини, тоді як за дії афлатоксину В1 цей показник зростав до $5,1 \pm 0,3$ нмоль/г ($p < 0,05$), а за дії Т-2 токсину – до $5,7 \pm 0,3$ нмоль/г ($p < 0,05$). У дворічок коропа інтенсивність ПОЛ була дещо нижчою: відповідно $3,2 \pm 0,2$, $4,4 \pm 0,2$ та $4,9 \pm 0,3$ нмоль МДА/г тканини, що

свідчить про вищу стійкість старших вікових груп до мікотоксичного навантаження.

У карася звичайного зміни інтенсивності перекисного окиснення ліпідів були більш вираженими. Зокрема, у печінці цьоголіток контрольні значення становили $3,8 \pm 0,2$ нмоль МДА/г тканини, тоді як за дії афлатоксину В1 рівень ТБК-активних продуктів підвищувався до $5,6 \pm 0,3$ нмоль/г, а за дії Т-2 токсину – до $6,2 \pm 0,4$ нмоль/г ($p < 0,05$). У дворічок карася відповідні показники склали $3,4 \pm 0,2$, $4,8 \pm 0,3$ та $5,3 \pm 0,3$ нмоль МДА/г тканини.

Аналогічна тенденція простежувалася і в м'язовій тканині риб, хоча абсолютні значення були нижчими. У цьоголіток коропа вміст ТБК-активних продуктів зростав з $2,1 \pm 0,1$ нмоль/г у контролі до $3,2 \pm 0,2$ нмоль/г за дії афлатоксину В1 та $3,6 \pm 0,2$ нмоль/г за дії Т-2 токсину. У карася

звичайного відповідні показники становили $2,3 \pm 0,1$, $3,6 \pm 0,2$ та $4,0 \pm 0,3$ нмоль МДА/г тканини ($p < 0,05$).

Посилення ПОЛ свідчить про ушкодження ліпідного шару клітинних мембран та зниження їхньої структурно-функціональної стабільності. Відомо, що афлатоксин В1 здатний ініціювати утворення активних форм кисню, що призводить до ліпопероксидації та вторинних метаболічних порушень (Pickova et al., 2021; Simonova & Mekhed, 2025a). Аналогічні механізми дії характерні й для Т-2 токсину, який проявляє виражену прооксидантну активність (Mekhed, 2024).

Значне підвищення рівня продуктів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ), зокрема малонового діальдегіду, слід розглядати як фундаментальний, ранній і надзвичайно чутливий біохімічний маркер екзогенного токсичного навантаження. Цей показник інтегрально відображає не лише безпосередній ступінь деструкції клітинних мембран, а й загальний стан та ефективність адаптаційних реакцій антиоксидантної системи організму у відповідь на оксидативний стрес.

Виявлені нами закономірності посилення ліпопероксидації чітко узгоджуються з масивом даних попередніх досліджень, проведених на різних видах корошових риб за умов експозиції до токсикантів різної хімічної природи – від важких металів до органічних сполук (Simonova & Mekhed, 2025b). Це підтверджує універсальний характер вільнорадикального ушкодження як первинної ланки патогенезу при інтоксикації гідробіонтів.

Комплексний аналіз динаміки метаболічних процесів у ключових тканинах риб (печінці, м'язах, зябрах) продемонстрував, що тривале мікотоксичне навантаження ініціює глибоку системну перебудову обміну речовин. Зокрема, зафіксовані зсуви в показниках енергетичного метаболізму свідчать про критичне напруження ланок фосфатного обміну.

Це проявляється у дефіциті макроергічних сполук та порушенні процесів аеробного енергозабезпечення клітин, що змушує організм переходити на менш ефективні анаеробні шляхи ресинтезу АТФ. Такі зміни вказують на виснаження функціональних резервів риб та розвиток метаболічного дисонансу, що в подальшому

може призвести до зниження резистентності популяції в цілому.

Водночас виявлені метаболічні зрушення мають не лише деструктивний, а й адаптаційний характер. Активація катаболічних процесів, перерозподіл енергетичних ресурсів і зміна співвідношення аденолових нуклеотидів можна розглядати як механізми, спрямовані на підтримання гомеостазу за умов токсичного стресу. Подібні адаптаційні реакції описані для коропа лускатого за впливу різних форм антропогенного забруднення та токсикантів (Nikolaenko et al., 2023; Shkurko et al., 2024).

Таким чином, результати дослідження свідчать, що показники нуклеїнового обміну, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів і метаболічних процесів у тканинах риб є інформативними біохімічними маркерами токсичного навантаження та адаптаційних реакцій за дії мікотоксинів. Комплексне використання цих показників дозволяє більш повно охарактеризувати механізми мікотоксичної дії та оцінити стійкість ставкових риб до контамінованих кормів і водного середовища.

Висновки

Установлено, що дія афлатоксину В1 та Т-2 токсину спричиняє істотні порушення енергетичного обміну в тканинах ставкових риб, які проявляються зниженням вмісту аденозинтрифосфату на тлі зростання концентрацій аденозинди- та аденозинмонофосфату. Такі зміни свідчать про напруження енергетичного метаболізму клітин за умов мікотоксичного навантаження.

Зниження аденолатного енергетичного заряду в тканинах коропа лускатого та карася звичайного в умовах дії мікотоксинів вказує на порушення процесів енергозабезпечення та активацію компенсаторно-адаптаційних механізмів, спрямованих на підтримання клітинного гомеостазу.

Посилення інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у тканинах риб за дії афлатоксину В1 та Т-2 токсину свідчить про розвиток оксидативного стресу та ушкодження клітинних мембран, що є одним із провідних механізмів токсичної дії мікотоксинів.

Виявлені зміни показників метаболічних процесів, зокрема енергетичного та фосфатного обміну, мають комплексний

характер і відображають як деструктивні наслідки мікотоксичного впливу, так і адаптаційні реакції організму риб, спрямовані на збереження функціональної стабільності.

Ступінь біохімічних порушень залежить від виду та віку риб: більш виражені зміни встановлено у цьоголіток порівняно з дворічками, а також у карася звичайного порівняно з коропом лускатим, що свідчить про міжвидову та вікову чутливість до дії мікотоксинів.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів/ Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Експериментальні процедури були схвалені Комісією з біоетики Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г.Шевченка (No протоколу: 5, 3 жовтня 2024 р., Чернігів, Україна) / The experimental procedures were approved by the Bioethics Committee of T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium» (Protocol Number: 5, 3 October 2024, Chernihiv, Ukraine).

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Не застосовується / Not applicable.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data

References

Filonenko, D., & Mekhed, O. (2025). Biochemical assessment of the effect of aflatoxin B1 on nucleic acid levels in tissues of crucian carp (*Carassius carassius*). *Biota. Human. Technology*, (3), 95–102. <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.9>

Філоненко Д., Мехед О. Біохімічна оцінка впливу афлатоксину В1 на рівень нуклеїнових кислот у тканинах карася звичайного (*Carassius carassius*). *Biota. Human. Technology*. 2025. № 3. С. 95–102. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.9>

Fornari, D.C., Peixoto, S., Ksepka, S.P., Bullard, S.A., Rossi, W., Nuzback, D.E., & Davis, D.A. (2023). Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hematological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*, 4, 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>

Gruber-Dorninger, C., Müller, A., & Rosen, R. (2025). Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*, 17(3), 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>

Hassan, F. F. (2018). Detection of aflatoxin B1 in some canned foods and reduction of toxin by ultraviolet radiation. *Iraqi Journal of Science*, 58(4C), 2343–2349. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2017.58.4C.10>

Koletsis, P., Schrama, J.W., Graat, E.A.M., Wiegertjes, G.F., Lyons, P., & Pietsch, C. (2021). The Occurrence of Mycotoxins in Raw Materials and Fish Feeds in Europe and the Potential Effects of Deoxynivalenol (DON) on the Health and Growth of Farmed Fish Species—A Review. *Toxins*, 13(6), 403. <https://doi.org/10.3390/toxins13060403>

Kovalsky, P., Kos, G., Nährer, K., Schwab, C., Jenkins, T., Schatzmayr, G., Sulyok, M., & Krska, R. (2016). Co-occurrence of regulated, masked and emerging mycotoxins and secondary metabolites in finished feed and maize—an extensive survey. *Toxins*, 8, 363. <https://doi.org/10.3390/toxins8120363>

Liu, H., Xie, R., Huang, W., Yang, Y., Zhou, M., Lu, B., Li, B., Tan, B., & Dong, X. (2023). Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* *Epinephelus lanceolatus*). *Aquaculture Reports*, 33, 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779>

Lye, M. S., Ghazali, A. A., Mohan, A. A., Alwin, N. & Nair, R.C. (1995). An outbreak of acute hepatic encephalopathy due to severe aflatoxicosis in Malaysia. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 53, 68–72.

Mekhed, O. (2024). Changes in the biochemical indicators of hydrobionts in response to the toxic effect of mycotoxin T2. *One World – One Health: I International Scientific and Practical Conference* (4–5 June 2024, Słupsk, Poland). P. 263–266.

Mushtaq, M., Sultana, V., Anwar, F., Adnan A. & Rizvi, S. S. H. (2012). Occurrence of aflatoxins in selected processed foods from Pakistan. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(7), 8324–8337. <https://doi.org/10.3390/ijms1307832>

Nikolaenko, T., Ivashchenko, M., Ivashchenko, N., & Mekhed, O. (2023). Adaptive changes in blood indicators of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) in response to water pollution. *Natural resources of the border areas in the conditions of climate change*. Chernihiv: Desna-Polihrاف, 99–100. (in Ukrainian).

Ніколаєнко Т., Іващенко М., Іващенко Н., Мехед О. Адаптивні зміни показників крові коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) як відповідь на забруднення води. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернігів: Десна-Поліграф, 2023. С. 99–100.

Pickova D., Ostry V., Malir F. A (2021). Recent Overview of Producers and Important Dietary Sources of Aflatoxins. *Toxins*. 13:186. <https://doi.org/10.3390/toxins13030186>

Pleadin, J., Zdravec, M., Brnić, D., Perković, I., Škrivanko, M. & Kovačević, D. (2017). Moulds and mycotoxins detected in the regional speciality fermented sausage «slavonski kulen» during a 1-year production period. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(2), 282–290. <https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1266395>

Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2023). Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed T-2 toxin-contaminated feed. *Natural resources of the border areas in the conditions of climate change*. Chernihiv: Desna-Polihraf, 105–106. (in Ukrainian).

Полотнянко Л., Мехед О. Накопичення мікотоксинів у м'язах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) при згодовуванні корму, контамінованого Т2-токсинам. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернігів: Десна-Поліграф, 2023. С. 105–106.

Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2024). Changes in the morphological indicators of carp under the action of mycotoxin T2. *Biota. Human. Technology*, (3), 69–76. <https://doi.org/10.58407/bht.3.24.4> (in Ukrainian)

Sevi, A., Marino, R., Lorenzo, J. M., Picard, B., & Pereira, A. S. C. (2016). Strategies to improve meat quality and safety. *The Scientific World Journal*, Article ID 9523621. <https://doi.org/10.1155/2016/9523621>

Shkurko, M., Sadchenko, N. M., & Mekhed, O. (2024). Influence of water environment contamination with mycotoxins on ichthyological indicators and metabolic processes in carp fish. *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation of Students, Graduate Students and Young Scientists* (20 November 2024, Chernihiv). Chernihiv: Nizhyn Mykola Gogol University, 89–90. (in Ukrainian).

Шкурко М., Садченко Н. М., Мехед О. Вплив забруднення водного середовища мікотоксинами на іхтіологічні показники та метаболічні процеси в організмі карпових риб. *Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю студентів, аспірантів і молодих учених* (20 листопада 2024 р., Чернігів). Чернігів: НУЧК імені Т. Г. Шевченка, 2024. С. 89–90.

Simonova, N. A., & Mekhed, O. B. (2025a). Effect of toxicants of different chemical nature on lipid peroxidation intensity in the liver of scaly carp (*Cyprinus carpio*). *Natural Science Education and Science*, Issue 4, 171–180. (in Ukrainian).

Симонова Н. А., Мехед О. Б. Вплив токсикантів різної хімічної природи на інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у печінці коропа лускатого (*Cyprinus carpio*). *Природнична освіта і наука*. 2025. Вип. 4. С. 171–180.

Simonova, N. A., & Mekhed, O. B. (2025b). Effect of aflatoxin B1 on lipid peroxidation intensity in tissues of crucian carp (*Carassius carassius*). *Slobozhansky Scientific Bulletin. Series: Natural Sciences*, Issue 2, 65–69. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.8>

Симонова Н. А., Мехед О. Б. Вплив афлатоксину В1 на інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у тканинах карася звичайного (*Carassius carassius*). *Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки*. 2025. Вип. 2. С. 65–69.

Strosnider, H., Azziz-Baumgartner, E., Banziger, M., Bhat, R.V., Breiman, R., Brune, M.N., DeCock, K., Dilley, A., Groopman, J., Hell, K., Henry, S.H., Jeffers, D., Jolly, C., Jolly, P., Kibata, G.N., Lewis, L., Liu, X., Lubber, G., McCoy, L., Mensah, P., Miraglia, M., Misore, A., Njapau, H., Ong, C.N., Onsongo, M.T., Page, S.W., Park, D., Patel, M., Phillips, T., Pineiro, M., Pronczuk, J., Rogers, H.S., Rubin, C., Sabino, M., Schaafsma, A., Shephard, G., Stroka, J., Wild, C., Williams, J.T., & Wilson, D. (2006). Workgroup report: Public health strategies for reducing aflatoxin exposure in developing countries. *Environmental Health Perspectives*, 114(12), 1898–1903. <https://doi.org/10.1289/ehp.9302>

Vanhoutte, I., Audenaert, K., & De Gelder, L. (2016). Biodegradation of mycotoxins: Tales from known and unexplored worlds. *Frontiers in Microbiology*, 7, 561. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00561>

Received: 09.02.2026. **Accepted:** 06.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Полотнянко Л., Філоненко Д. Біохімічні маркери токсичного навантаження та адаптаційних реакцій ставкових риб за дії мікотоксинів. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 51-60. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.4>

Cite this article in APA style as:

Polotnianko, L., & Filonenko, D. (2026). Biokhimichni markery toksychnoho navantazhennia ta adaptatsiinykh reaktsii stavkovykh ryb za dii mikotoksyniv [Biochemical markers of toxic load and adaptative reactions of pond fish to mycotoxins]. *Biota. Human. Technology*, (1), 51-60. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.4> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Polotnianko L. [in Ukrainian: **Полотнянко Л.**]¹, Ph. D. student, email: chreglab@vetmed.gov.ua
ORCID: 0000-0001-8665-2648

Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Filonenko D. [in Ukrainian: **Філоненко Д.**]², Ph. D. student, email: filonenkoD@gmail.com
ORCID: 0009-0007-0631-1669

Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

¹ Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

² Data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

UDC 582.637.1(477.51-25):581.524.2

DOI: 10.58407/bht.1.26.5



Copyright (c) 2026 Yuliia Stupak

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Юлія Ступак

СЕЗОННА ДИНАМІКА ФЕНОФАЗ *ULMUS PUMILA* L. В СИСТЕМІ ЗАХИСНИХ НАСАДЖЕНЬ М. ЧЕРНІГОВА (2023–2025 РР.)



Yuliia Stupak

SEASONAL DYNAMICS OF *ULMUS PUMILA* L. PHENOPHASES IN THE PROTECTIVE STANDS OF CHERNIHIV (2023–2025)

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідити особливості перебігу фенологічних фаз інвазійного виду *Ulmus pumila* L. в урбанізованому середовищі м. Чернігова упродовж 2023–2025 років та визначити послідовність і тривалість фенологічних фаз та підфаз.

Методологія. Фенологічні спостереження за *U. pumila* проводилися упродовж 2023–2025 років відповідно до методики І. М. Бейдемана з метою вивчення сезонних особливостей розвитку виду. У весняний період спостереження здійснювалися з інтервалом 1–2 дні, що дозволяло детально фіксувати початок і перебіг основних фенологічних фаз. У літній та осінній періоди облік проводили двічі на тиждень. Усі дані систематично заносилися до польового журналу спостережень. Паралельно фіксувалися показники температурного режиму повітря, що дало змогу оцінити вплив температурних умов на перебіг фенологічних фаз виду.

Наукова новизна. Представлено результати трирічного фенологічного моніторингу *U. pumila* в умовах урбанізованого середовища м. Чернігова. Визначено міжрічну динаміку строків настання основних фенологічних фаз і підфаз та встановлено тенденцію до подовження вегетаційного періоду. Обґрунтовано температурні діапазони проходження ключових фенофаз і підтверджено залежність їх настання від середньодобових показників температури повітря, що уточнює регіональні особливості сезонного розвитку виду в умовах міського мікроклімату.

Висновки. За результатами трирічних фенологічних спостережень встановлено, що *U. pumila* в системі захисних насаджень м. Чернігова характеризується раннім початком вегетації за низьких середньодобових температур, стабільним ритмом розвитку та тенденцією до подовження вегетаційного періоду (239–267 днів). Отримані результати свідчать, що екологічно пластичний, інвазійно небезпечний вид *U. pumila* в умовах системи захисних насаджень м. Чернігова здатний успішно проходити повний цикл сезонного розвитку за широкого діапазону температурних умов. Виявлені фенологічні особливості можуть бути однією з передумов його стабільного функціонування та подальшого поширення в регіоні, що обґрунтовує доцільність подальшого моніторингу фенологічних характеристик виду в межах Чернігівського Полісся, зокрема за межами міських екосистем.

Ключові слова: Чернігів, інвазійні види, фенологія, температура повітря, *Ulmus pumila* L.

ABSTRACT

Purpose of the work. To investigate the characteristics of the phenological phase progression of the invasive species *Ulmus pumila* L. in the urbanized environment of Chernihiv city during 2023–2025, and to determine the sequence and duration of phenological phases and subphases.

Methodology. Phenological observations of *U. pumila* were conducted during 2023–2025 in accordance with the methodology developed by I. Beideman, aiming to study the seasonal developmental patterns of the species. In the spring period, observations were carried out at 1–2 day intervals, which allowed detailed recording of the onset and course of the main phenological phases. During the summer and autumn periods, observations were conducted twice a week. All data were systematically recorded in a field observation log. In parallel, air temperature parameters were recorded, which made it possible to assess the influence of thermal conditions on the progression of the species' phenological phases.

Scientific novelty. The results of a three-year phenological monitoring of *U. pumila* under the conditions of the urbanized environment of Chernihiv city are presented. Interannual dynamics of the timing of the main phenological phases and subphases were determined, and a tendency toward prolongation of the vegetation period was identified.

Temperature ranges for the occurrence of key phenophases were substantiated, and the dependence of their onset on mean daily air temperature was confirmed, which refines regional features of the seasonal development of the species under urban microclimatic conditions.

Conclusions. The results of three-year phenological observations indicate that *U. pumila* in the urban environment of Chernihiv is characterized by an early start of vegetation at low average daily temperatures, a stable rhythm of development and a tendency to an extended vegetation period (239–267 days). The results obtained indicate that the ecologically plastic, invasively dangerous species *U. pumila* in the system of protective plantings of the city of Chernihiv is able to successfully undergo a full cycle of seasonal development under a wide range of temperature conditions. The identified phenological features may be one of the prerequisites for its stable functioning and further distribution in the region, which justifies the feasibility of further monitoring of the phenological characteristics of the species within the Chernihiv Polesie region, in particular outside urban ecosystems.

Key words: Chernihiv, invasive plants, phenology, air temperature, *Ulmus pumila* L.

Вступ

Дослідження перебігу фенологічних фаз рослин є важливим напрямом сучасних біологічних та екологічних досліджень, оскільки фенологічні спостереження дають змогу оцінити особливості сезонного розвитку рослин та їхню реакцію на зміни абіотичних чинників, насамперед температурного режиму (Nord & Lynch, 2009).

Особливої актуальності в сучасних умовах набувають дослідження фенології інвазійних видів рослин, які характеризуються високою екологічною пластичністю, здатністю швидко адаптуватися до нових умов зростання та суттєво впливати на структуру місцевих екосистем через зміну конкурентних взаємодій і режимів використання ресурсів (Davidson et al., 2011).

Дослідження фенологічних стадій інвазійних видів є критично важливим, оскільки відмінності в часі настання та тривалості цвітіння й інших фенофаз між інвазійними та аборигенними видами можуть пояснювати механізми їхньої успішної адаптації та натуралізації в нетипових для них екосистемах (Lázaro-Lobo et al., 2025).

Аналіз перебігу фенологічних фаз дозволяє прогнозувати адаптаційний потенціал інвазійних видів до нових умов середовища, оцінювати їхній вплив на структуру місцевих біоценозів, а також є важливою складовою оцінки інвазійного ризику та розроблення ефективних стратегій моніторингу й контролю інвазійних видів у різних екосистемах (Gioria et al., 2018; Liang et al., 2025).

Одним із деревних видів, що активно поширюється в урбанізованих екосистемах м. Чернігова та проявляє високу екологічну пластичність і здатність до натуралізації в умовах антропогенних ландшафтів, є *Ulmus pumila* L. – так званий сибірський в'яз, який

походить із Східної Азії і здатний виживати в широкому діапазоні екологічних умов, включно з посушливими, холодними та урбанізованими середовищами (Zalapa et al., 2010). Цей вид у багатьох регіонах світу розглядається як адвентивний або інвазійний вид через його здатність до швидкого розмноження та розповсюдження, включаючи традиційне використання його в озелененні, фітоінтродукції та антропогенних насадженнях, що сприяло його природній колонізації нових територій (Reynolds et al., 2022).

Відомо, що *U. pumila* інтродукований в Україні наприкінці XIX–XX ст. (Kucher et al., 2024), нині фіксується у різних природних і антропогенних умовах по всій території країни. Цей вид відзначається серед інвазійних деревних таксонів в урбанізованих зелених насадженнях м. Києва (Vyshenska & Lysenko, 2025), що підкреслює його здатність укріплюватися в міських середовищах. Дані моніторингу флори лісового фонду свідчать, що *U. pumila* займає помітну частку серед роду *Ulmus* L. у південних та східних регіонах України, що підтверджує його широке поширення поза межами первинних насаджень (Meshkova et al., 2024). Крім того, низка сучасних відчизняних науковців розглядає *U. pumila* як потенційно інвазійний компонент урбоекосистем в умовах кліматичних змін, особливо уздовж транспортних коридорів і в місцях високого антропогенного навантаження (Lykholat et al., 2018).

Окремі аспекти фенологічного розвитку *U. pumila* в системі захисних насаджень м. Чернігова були висвітлені автором у попередній публікації (Stupak, 2023), де представлено результати фенологічних спостережень за весняно-літній період 2023 року та охарактеризовано строки настання основ-

них вегетативних і генеративних фаз розвитку виду.

Водночас комплексний аналіз повного сезонного циклу розвитку *U. pumila*, міжрічної динаміки фенологічних фаз та температурних умов їх проходження упродовж трирічного періоду (2023–2025 рр.) в системі захисних насаджень м. Чернігова раніше не здійснювався. Таким чином, представлене дослідження є продовженням і суттєвим розширенням попередніх спостережень та уточнює регіональні особливості сезонного розвитку виду в межах Чернігівського Полісся.

З огляду на викладене, метою дослідження є з'ясування особливостей перебігу фенологічних фаз інвазійного виду *U. pumila* в системі захисних насаджень м. Чернігова упродовж 2023–2025 років та визначення послідовності й тривалості основних фенофаз і підфаз.

Матеріали та методи дослідження

Для фенологічного дослідження було обрано шість середньовікових, здорових дерев *U. pumila*, які зростають уздовж залізничної колії на південно-західній околиці м. Чернігова. Деревина мали висоту приблизно 13–15 м та перебували у задовільному фітосанітарному стані. Дослідження проводилося на тій самій ділянці, що була охарактеризована у попередній публікації (Stupak, 2023).

Дослідна ділянка розташована в системі захисних насаджень уздовж залізничної інфраструктури та охоплює відрізок у межах координат: початкова точка-51.470977° N, 31.266029° E; кінцева точка-51.467689° N, 31.264735° E (система координат WGS84).

Фенологічні спостереження проводилися упродовж 2023–2025 років відповідно до методичних положень, запропонованих І. М. Бейдеманою (Lukash, 2012) У весняний період спостереження здійснювалися з інтервалом 1–2 дні, у літній – двічі на тиждень, в осінній – тричі на тиждень. Усі отримані дані фіксувалися у польовому журналі спостережень.

У процесі дослідження фіксувалися основні фенологічні фази та їх підфази. Вегетативна фаза включала: початок сокоруху, набухання бруньок, позеленіння листових бруньок, розвиток перших листків та розгортання більшої частини листків. Фаза бутонізації охоплювала набухання квіткових

бруньок, формування бутонів і повну бутонізацію. Фаза цвітіння визначалася за початком, масовим перебігом та завершенням цвітіння. У фазі плодоношення фіксували початок утворення плодів, початок і масове дозрівання плодів, а також початок і завершення їх опадання. Фаза завершення вегетації включала початок і масову зміну забарвлення листків, початок і масовий листопад, а також опадання більшої частини та майже всіх листків.

Паралельно з фенологічними спостереженнями реєструвалися показники температурного режиму, що дозволило оцінити вплив температурних умов на перебіг фенологічних фаз *U. pumila*.

Варто зауважити, що представники досліджуваного виду зростають в умовах підвищеного антропогенного навантаження, поблизу транспортної інфраструктури та ТЕЦ.

Після польових спостережень усі отримані дані були систематизовані та оброблені шляхом внесення у таблиці, які містили інформацію про дати настання кожної фенологічної фази та підфази для кожного дерева, а також відповідні показники температурного режиму, зафіксовані під час спостережень.

Статистичну обробку отриманих даних здійснювали з використанням програмного пакета Microsoft Excel. Для кожної фенологічної фази визначали середні календарні строки настання, мінімальні та максимальні значення, а також тривалість фенофаз. Обчислювали середні значення температурних показників для відповідних періодів спостережень. Для оцінки міжрічної варіабельності використовували порівняльний аналіз строків настання фенологічних фаз у різні роки дослідження. Результати статистичної обробки подано у вигляді таблиць та графічних матеріалів.

Результати дослідження та обговорення

На рис. 1 наведено деякі підфази фенофаз *U. pumila*, зафіксовані під час фенологічного дослідження упродовж 2023–2025 років. Наведений рисунок ілюструє послідовність настання вегетативних і генеративних фаз розвитку досліджуваного інвазійного виду.

Результати трирічного циклу фенологічних спостережень за *U. pumila* (2023–2025 рр.) наведено в таблиці 1, в якій

представлено роки спостереження та дати настання фенофаз та їх підфаз.



Рис. 1. Підфазы основних фенологічних фаз розвитку *Ulmus pumila* L.:

1 – позеленіння листкових бруньок; 2 – розгортання більшої частинки листків;
3 – набухання квіткових бруньок; 4 – масове цвітіння; 5 – початок утворення перших плодів;
6 – масове дозрівання плодів; 7 – початок опадання листків; 8 – опадання майже всіх листків

Отже, представлені результати, свідчать про стабільний ритм розвитку та високу адапційну здатність виду в умовах урбанізованого середовища м. Чернігова. Початок вегетації характеризувався раннім настанням фенофаз. Фенологічна підфаза «сокорух» у різні роки фіксувалася наприкінці лютого – на початку березня, з найранішими строками у 2024 р., що зумовлено м'якшими зимовими умовами. Подальший розвиток листкового апарату відбувався інтенсивно, а фази розгортання більшої частини листків у всі роки наставали майже синхронно, що свідчить про адаптивну здатність виду стабілізувати темпи росту.

Фенофази бутонізації характеризувалися незначною міжрічною варіабельністю та стабільно припадали на кінець березня – першу половину квітня, що вказує на сталість репродуктивного розвитку. Початок цвітіння відбувався у другій декаді квітня, а масове цвітіння – у третій декаді квітня майже одночасно в усі роки спостережень.

Зафіксоване у 2025 р. подовження підфази цвітіння, ймовірно, пов'язане з міжрічними відмінностями температурного режиму весняного періоду: середня температура повітря у цей час становила 9,6 °С, тоді як у 2023 та 2024 рр. – 11,4 та 15,6 °С відповідно. Фаза плодоношення характери-

зувалася відносною стабільністю строків настання.

Утворення перших плодів фіксувалося у першій декаді травня, масове дозрівання – у середині травня. Водночас у 2025 р.

спостерігалось незначне зміщення строків завершення плодоношення на пізніший період, що, ймовірно, пов'язано з нижчими показниками середньодобової температури порівняно з 2023 та 2024 рр.

Таблиця 1

Результати фенологічних спостережень за *Ulmus pumila* L. біля залізничних шляхів на південно-західній околиці м. Чернігова

Показник		Рік спостереження та дата настання фенофаз та їх підфаз		
Основна фаза	Підфаза	2023	2024	2025
Вегетативна фаза	Початок сокоруху	22/III	28/II	5/III
	Набухання бруньок	26/III	22/III	20/III
	Позеленіння листкових бруньок	4/IV	2/IV	3/IV
	Розвиток перших листків	9/IV	9/IV	15/IV
	Розгортання більшої частини листків	18/IV	18/IV	21/IV
Бутонізація	Набухання квіткових бруньок	27/III	24/III	26/III
	Формування бутонів	3/IV	31/III	3/IV
	Повна бутонізація	11/IV	8/IV	14/IV
Цвітіння	Початок цвітіння	18/IV	16/IV	21/IV
	Масове цвітіння	24/IV	25/IV	23/IV
	Кінець цвітіння	3/V	4/V	15/V
Плодоношення	Початок утворення перших плодів	9/V	9/V	11/V
	Масове дозрівання плодів	18/V	15/V	21/V
	Опадання всіх плодів	22/V	26/V	31/V
Завершення вегетації	Початок зміни забарвлення листків	25/IX	4/X	8/X
	Масова зміна забарвлення листків	14/X	13/X	17/X
	Початок опадання листків	18/X	21/X	23/X
	Масовий листопад	25/X	26/X	3/XI
	Опадання більшої частини листків	31/X	1/XI	18/XI
	Опадання майже всіх листків	17/XI	15/XI	26/XI
Тривалість вегетаційного періоду		239	261	267

Крім того, тривалість вегетаційного періоду *U. pumila* поступово збільшувалася від 239 днів у 2023 р. до 267 днів у 2025 р., що може бути наслідком як регіональних кліматичних змін, так і специфіки мікрокліматичних умов залізничних шляхів, свідчить про високу адаптивну пластичність виду та його здатність компенсувати коливання температурних умов.

Для чіткого визначення строків настання та завершення основних фенологічних фаз було розроблено коловий феноспектр *U. pumila* (Рис. 2.)

Феноспектр – це спосіб графічного відображення фенологічних змін у житті

рослини і допомагає отримати інформацію про час початку та завершення певних подій впродовж року (Vasheka & Badanina, 2024).

На рис. 2 зображено коловий феноспектр, який відображає послідовність проходження вегетативної та генеративної фаз упродовж року та дозволяє наочно оцінити час початку і завершення кожної фенофази. На даному феноспекторі можна побачити, зокрема, що *U. pumila* має часткове накладання фаз, а саме вегетативна фаза перекривається з фазами бутонізації та цвітіння, а цвітіння частково збігається з початковими етапами плодоношення.

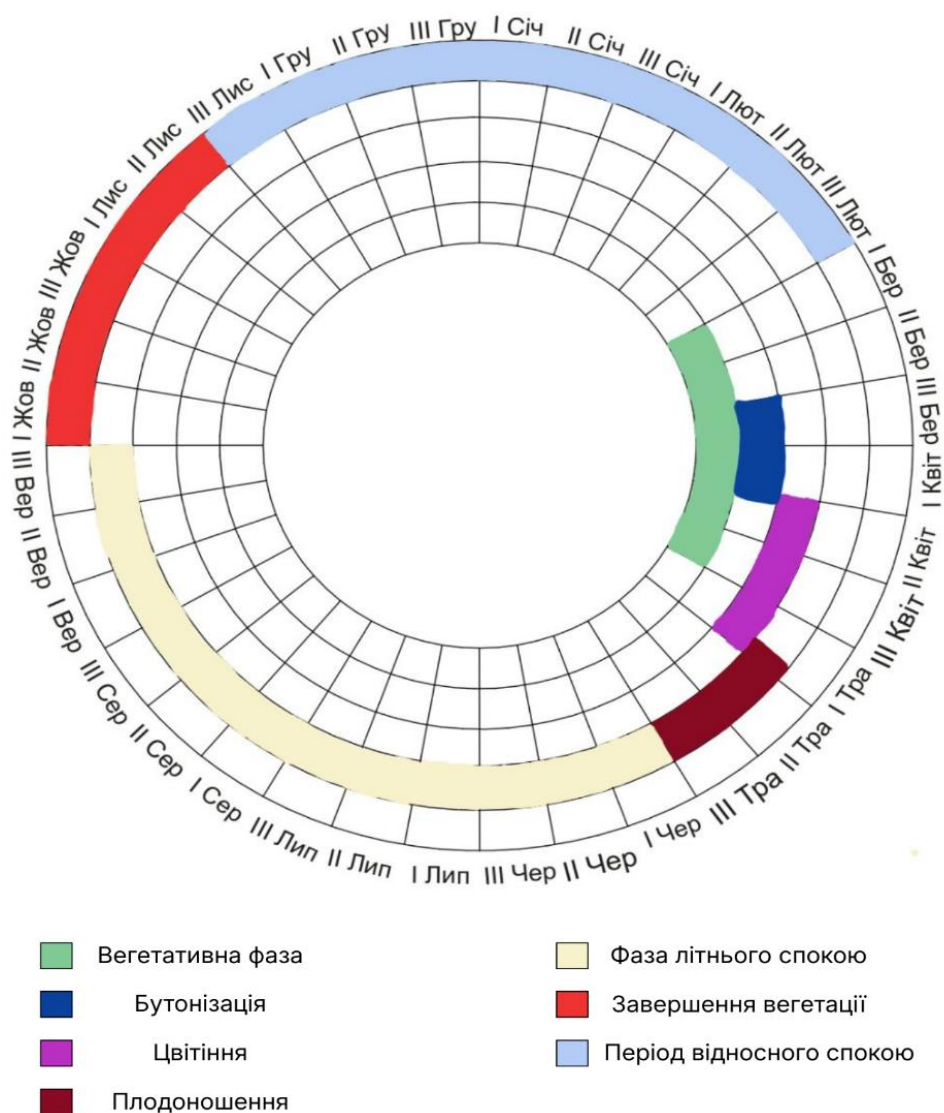


Рис. 2. Коловий феноспектр, побудований за результатами фенологічних спостережень за *Ulmus pumila L.*

Таке перекривання свідчить про безперервність онтогенетичного розвитку та високу екологічну пластичність виду, що забезпечує ефективне використання сприятливих умов весняного періоду.

На рис. 3 представлено динаміку проходження основних фенологічних фаз *U. pumila* у весняно-літній період 2024–2025 років у поєднанні з графічним відображенням змін середньодобової температури повітря.

Початок і завершення відповідних фенологічних фаз позачено вертикальними лініями, перпендикулярними до осі абсцис, що дозволяє наочно простежити часові межі їх настання і тривалість.

Аналогічний графік для 2023 року був наведений у попередньому дослідженні автора, де також проаналізовано перебіг

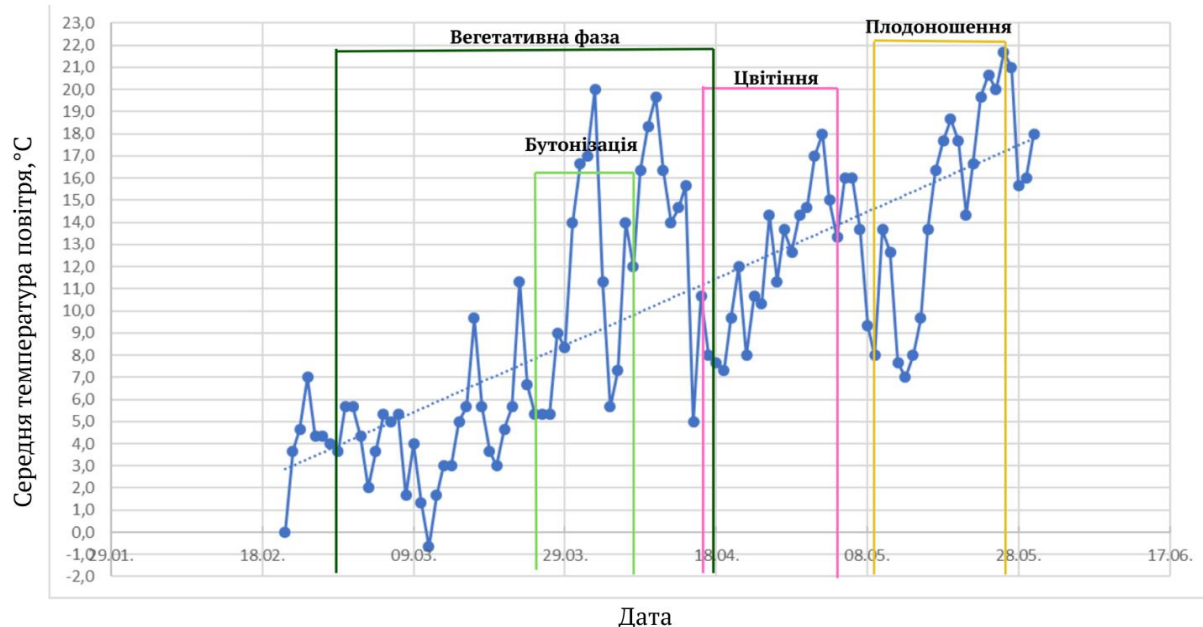
фенологічних фаз *U. pumila* у взаємозв'язку з температурними умовами (Stupak, 2023).

Згідно з отриманими даними, на початку весняного періоду відбувається перехід рослин до вегетативної фази, після чого послідовно спостерігається настання бутонізації, цвітіння та плодоношення. Перехід між окремими фенологічними фазами відбувається поступово та супроводжується змінами температурного режиму повітря, що відображено на графіках. Упродовж досліджуваного періоду чітко простежується послідовність проходження основних фенофаз, що характеризує сезонний ритм розвитку *U. pumila* в умовах досліджуваної території.

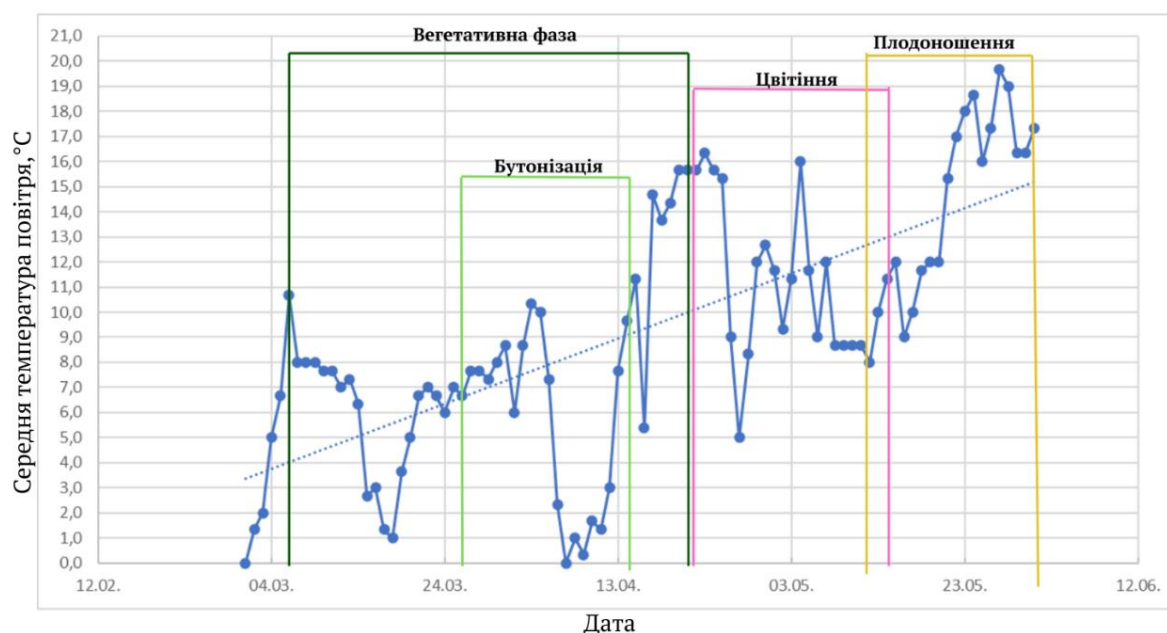
Слід також відзначити, що окремі фенологічні фази *U. pumila* частково перекрива-

ються у часі. Зокрема, у період завершення вегетативної фази розпочинається бутонізація, що свідчить про поступовий характер переходу між етапами сезонного розвитку. Подібне накладання фенофаз є типовим для деревних рослин і відображає безперервність їх фізіологічних процесів (Milla et al., 2010). Надалі бутонізація поступово пере-

ходить у фазу цвітіння, після якої настає плодоношення. Така послідовність і часткове перекриття фенологічних фаз забезпечують безперервність генеративного розвитку рослин і характеризують особливості сезонного ритму розвитку *U. pumila* в умовах досліджуваної території.



А



Б

Рис. 3. Динаміка середньодобових температур повітря та їх співвідношення з перебігом основних фенологічних фаз *Ulmus pumila* L. у весняно-літній період. А – 2024 рік; Б – 2025 рік

Також було проаналізовано перебіг основних фенологічних фаз розвитку *U. pumila* залежно від середньодобових температур повітря протягом 2023–2025 років. Узагальнені результати подано на рис. 4. Для характеристики температурних умов проходження сезонного розвитку було виділено п'ять ключових фенологічних фаз: набухання бруньок, розвиток перших листків, початок цвітіння, початок утворення перших плодів та опадання плодів.

Аналіз отриманих даних засвідчив, що перебіг окремих фенологічних фаз відбувся в межах певних діапазонів середньо-

добових температур повітря, які повторюються протягом трирічного циклу спостережень. Так, підфаза «набухання бруньок» розпочиналася за середньодобових температур у межах 5,5–10,3 °С, що свідчить про низький температурний поріг початку вегетації. Фаза «розвиток перших листків» відбувалася за температур 12,3–15,5 °С. Початок цвітіння спостерігався в інтервалі 11,2–17,0 °С. Формування перших плодів відзначалося за температур 8,5–16,0 °С, тоді як опадання плодів фіксувалося в межах 14,0–18,3 °С.

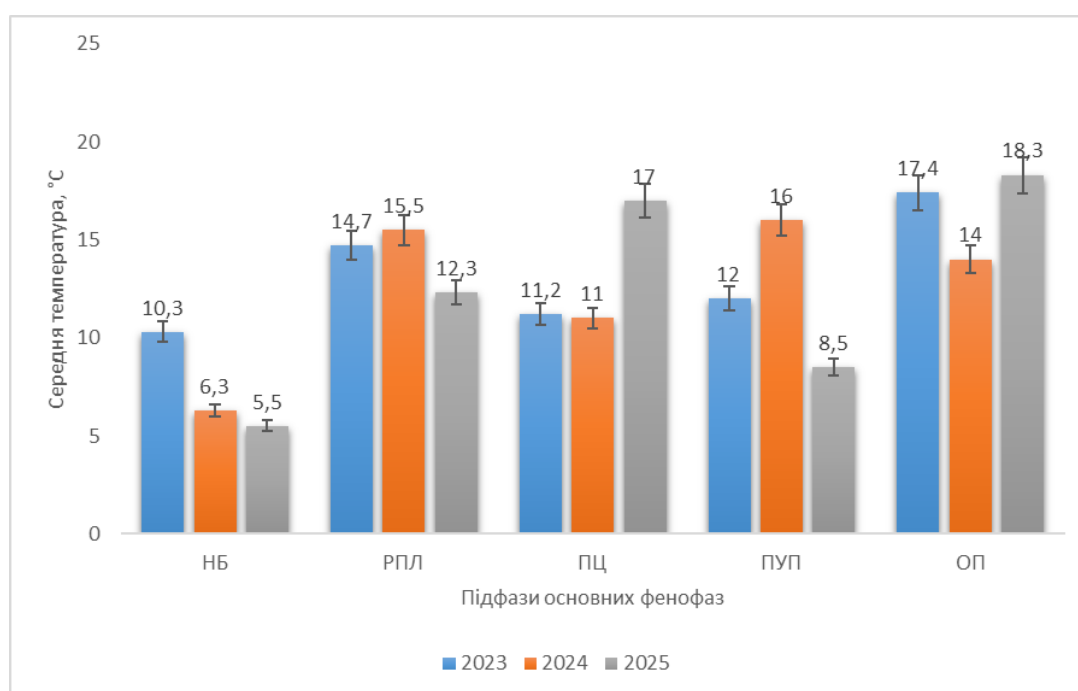


Рис. 4. Середні температурні показники ключових фенофаз *Ulmus pumila* L. впродовж 3-річного циклу спостережень:

1 – Набухання бруньок (НБ); 2 – Розвиток перших листків (РПЛ); 3 – Початок цвітіння (ПЦ); 4 – Початок утворення перших плодів (ПУП); 5 – Опадання плодів (ОП).

Встановлено, що температурні діапазони проходження фенологічних фаз є достатньо широкими. Це свідчить про високу екологічну пластичність виду та його здатність реалізовувати сезонний цикл розвитку за умов варіабельності температурного режиму. Особливо показовим є низький температурний поріг початку вегетації, що забезпечує ранній старт ростових процесів порівняно з багатьма аборигенними деревними видами.

Температурна стабільність репродуктивних фаз (цвітіння та плодоношення) в різні роки спостережень вказує на надійність насінневого поновлення навіть за коливань кліматичних показників.

Отримані результати узгоджуються з даними міжнародних досліджень фенології деревних рослин, у яких підкреслюється важлива роль температурного режиму та кліматичних умов у формуванні строків настання основних фенологічних фаз. Зокрема, у низці робіт зазначається, що

зміни температури повітря можуть призводити до зміщення строків початку вегетації та впливати на тривалість вегетаційного періоду (Piao et al., 2019). Подібні закономірності відзначаються і в дослідженнях інвазійних деревних видів, де ранній початок сезонного розвитку розглядається як один із чинників їх успішної натуралізації у нових умовах (Lázaro-Lobo et al., 2025). Подібні закономірності відзначаються і в роботах українських учених. Так, у дослідженнях кліматичних змін на південному сході України встановлено, що підвищення середньорічної температури повітря сприяє зміщенню строків проходження весняних фенологічних фаз деревних рослин у бік більш ранніх дат та може зумовлювати випадки передчасного цвітіння (Mezhenskyj, 2009). Водночас результати досліджень українських науковців свідчать, що інвазійні деревні види, зокрема *U. pumila*, характеризуються високою екологічною пластичністю та здатністю ефективно пристосовуватися до умов урбанізованого середовища, що сприяє їх поширенню в антропогенно трансформованих екосистемах (Lykholat et al., 2018). Отримані у даному дослідженні результати щодо раннього початку вегетації та стабільності проходження основних фенофаз *U. pumila* в умовах урбанізованого середовища м. Чернігова загалом відповідають зазначеним закономірностям і підтверджують високу адаптивну здатність цього виду до умов міських екосистем.

Висновки

За результатами трирічних фенологічних спостережень (2023–2025 рр.) встановлено, що *U. pumila* в системі захисних насаджень м. Чернігова характеризується раннім початком вегетації, стабільним ритмом розвитку та тривалим вегетаційним періодом, що свідчить про високу адаптаційну здатність виду до місцевих абіотичних умов.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до автора / Dataset available on request from the author.

Початок вегетації *U. pumila* фіксувався за низьких середньодобових температур повітря (5,5–10,3 °C), що узгоджується з міжнародними результатами досліджень інвазійних деревних видів, які відзначають, що інвазійні види рослин часто демонструють ранній початок вегетації та триваліший сезон активного росту порівняно з місцевими видами, що дозволяє їм більш ефективно використовувати весняні температурні ресурси та підвищувати свою конкурентоспроможність у новому середовищі (Wolkovich & Cleland, 2014).

Встановлено тенденцію до подовження вегетаційного періоду *U. pumila* – від 239 днів у 2023 р. до 267 днів у 2025 р., що може бути наслідком регіональних кліматичних змін та специфіки міського мікроклімату. Це підтверджується даними з фенологічних спостережень у регіонах Китаю, де зміна довжини вегетаційного періоду була статистично пов'язана зі змінами середньодобових температур у часових рядах спостережень (Chen & Xu, 2012).

Коловий феноспектр розвитку *U. pumila* засвідчив часткове перекривання вегетативних і генеративних фаз, що забезпечує безперервність онтогенетичного розвитку та ефективне використання сприятливих умов весняного періоду.

Тож отримані результати свідчать, що екологічно пластичний, інвазійно небезпечний вид *U. pumila* в умовах системи захисних насаджень м. Чернігова здатний успішно проходити повний цикл сезонного розвитку за широкого діапазону температурних умов. Виявлені фенологічні особливості можуть бути однією з передумов його стабільного функціонування та подальшого поширення в регіоні, що обґрунтовує доцільність подальшого моніторингу фенологічних характеристик виду в межах Чернігівського Полісся, зокрема за межами міських екосистем.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів / The author declares no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Chen, X., & Xu, L. (2012). Phenological responses of *Ulmus pumila* (Siberian Elm) to climate change in the temperate zone of China. *International Journal of Biometeorology*, 56(4), 695–706. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0471-0>

Davidson, A.M., Jennions, M. & Nicotra, A.B. (2011), Do invasive species show higher phenotypic plasticity than native species and, if so, is it adaptive? A meta-analysis. *Ecology Letters*, 14, 419-431. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01596.x>

Gioria, M., Pyšek, P., & Osborne, B.A. (2018). Timing is everything: does early and late germination favor invasions by herbaceous alien plants? *Journal of Plant Ecology*, 11(1), 4–16, <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw105>

Kucher O., Zavialova L., Dvirna T., Miskova O., Protopopova V., & Shevera M. (2024, September 3 – 6) *Ulmus pumila as an invasive alien species in Ukraine*. [Conference presentation abstract]. Neobiota 2024 Lisbon, Portugal.

Lázaro-Lobo, A., Rendueles Fernández, B., Fernández-Pascual, E., González-García, V., & Jiménez-Alfaro, B. (2025). Invasive plants have a delayed and longer flowering phenology than native plants in an ecoregional flora. *Annals of Botany*, 136(2), 367–375. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaf078>

Liang, L., Yang, J., Wittenbraker, W. C., Crocker, E. V., Tomaszewska, M. A., & Henebry, G. M. (2025). Characterizing phenological differences of invasive shrubs in a forest matrix using high resolution VENμS time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 136, 104333. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104333>

Lukash, O. (2012). *Field practice in plant physiology and ecology (excursions, phenological observations, field and demonstration experiments)*. Phytosociocenter. (in Ukrainian)

Лукаш О.В. Польова практика з фізіології та екології рослин (екскурсії, фенологічні спостереження, польові та демонстраційні досліді). Київ : Фітосоціоцентр, 2012. 128 с.

Lykholat, Y., Khromykh, N., Didur, O., Alexeyeva, A., Lykholat, T., & Davydov, V. (2018). Modeling the invasiveness of *Ulmus pumila* in urban ecosystems in conditions of climate change. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 9(2), 161-166. <https://doi.org/10.15421/021824>

- Meshkova, V., Kuznetsova, O., Borysenko, O., Korsovetskyi, V., & Pyvovar, T. (2024). Biotic Factors Affecting Elm Health in Ukraine. *Forests*, 15(12), 2209. <https://doi.org/10.3390/f15122209>
- Mezhenskyj, V.M. (2009). Climate change and its impact on woody plants in the south-east of Ukraine. *Industrial Botany*, 9, 56–59. (in Ukrainian)
Меженський В. М. Кліматичні зміни та їх вплив на деревні рослини на південному сході України. *Промышленная ботаника*. 2009. Вип. 9. С. 56–59.
- Milla, R., Castro-Díez, P., & Montserrat-Martí, G. (2010). Phenology of Mediterranean woody plants from NE Spain: Synchrony, seasonality, and relationships among phenophases. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 205(3), 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2009.01.006>
- Nord, E. A., & Lynch, J. P. (2009). Plant phenology: A critical controller of soil resource acquisition. *Journal of Experimental Botany*, 60(7), 1927–1937. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp018>
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y. H., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., & Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6), 1922–1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>
- Reynolds, L. V., Perry, L. G., Shafroth, P. B., & et al. (2022). Invasion of Siberian Elm (*Ulmus pumila*) along the South Platte River: The roles of seed source, human influence, and river geomorphology. *Wetlands*, 42, 10. <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01516-4>
- Stupak, Yu. (2023). Phenological phases of the *Ulmus pumila* L. development in spring and summer period in the Chernihiv city. *Biota, Human, Technology*, 3, 60–67 <https://doi.org/10.58407/bht.3.23.4> (in Ukrainian)
Ступак Ю. Фенологічні фази розвитку *Ulmus pumila* L. у весняно-літній період у м.Чернігові. *Biota, Human, Technology*. 2023. №3. С. 60–67
- Vasheka, O., & Badanina, V. (2024). *Selected sections of dendrology*. PALYVODA A.V. (in Ukrainian)
Вашека О.В., Баданіна В.А. Вибрані розділи дендрології: навч. посіб. Київ: ПАЛИВОДА А.В., 2024. 140 с.
- Vyshenska, I.H., & Lysenko, D.O. (2025). Monitoring of invasive woody plant species in urban ecosystems of Kyiv. *NRPBE*, 8, 62–69. <https://doi.org/10.18523/2617-4529.2025.8.62-69> (in Ukrainian)
Вишенська І.Г., Лисенко Д.О. Моніторинг інвазійних деревних видів рослин в урбоєкосистемах міста Києва. *Наукові записки НаУКМА. Біологія і екологія*. 2025. №8. С.62–69. <https://doi.org/10.18523/2617-4529.2025.8.62-69>
- Wolkovich, E. M., & Cleland, E. E. (2014). Phenological niches and the future of invaded ecosystems with climate change. *AoB PLANTS*, 6, plu013. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu013>
- Zalapa, J. E., Brunet, J., & Guries, R. P. (2010). The extent of hybridization and its impact on the genetic diversity and population structure of an invasive tree, *Ulmus pumila* (Ulmaceae). *Evolutionary Applications*, 3(2), 157–168. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2009.00106.x>

Received: 09.02.2026. **Accepted:** 05.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Ступак Ю. Сезонна динаміка фенофаз *Ulmus pumila* L. в системі захисних насаджень м. Чернігова (2023–2025 рр.). *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 61-72. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.5>

Cite this article in APA style as:

Stupak, Y. (2026). Seasonal dynamics of *Ulmus pumila* L. phenophases in the protective stands of Chernihiv (2023–2025). [Sezonna dynamika fenofaz *Ulmus pumila* L. v systemi zakhysnykh nasadzhen m. Chernihova (2023–2025 rr.)]. *Biota. Human. Technology*, (1), 61-72. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.5> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Stupak Yu. [in Ukrainian: Ступак Ю.], Ph. D. student¹, Methodist², email: yuli.reb100@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2514-2577

¹Department of Ecology, Geography and Nature Management, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”

53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

²Municipal institution “Chernihiv Regional Station of Young Naturalists”

2-A Franka Street, Chernihiv, 14021, Ukraine

UDC 597.551.214:[632.954+661.847

DOI: 10.58407/bht.1.26.6



Copyright (c) 2026 Maryna Yachna

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Марина Ячна

ЗМІНИ ДЕЯКИХ ПОКАЗНИКІВ ЛІПІДНОГО ОБМІНУ ТА АКТИВНОСТІ ЛУЖНОЇ ФОСФАТАЗИ У КОРОПА ЛУСКАТОГО (*CYPRINUS CARPIO L.*) ЗА УМОВ КОМБІНОВАНОГО ВПЛИВУ ГЕРБІЦИДІВ І СОЛЕЙ ЦИНКУ



Maryna Yachna

CHANGES IN SELECTED LIPID METABOLISM PARAMETERS AND ALKALINE PHOSPHATASE ACTIVITY IN COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIO L.*) UNDER COMBINED EXPOSURE TO HERBICIDES AND ZINC SALTS

АНОТАЦІЯ

Одним зі шляхів потрапляння гербіцидів у водні екосистеми є інтенсивне застосування їх у сільському господарстві, що, в свою чергу, може призводити до взаємодії з іншими антропогенними забруднювачами, зокрема важкими металами. Тому, актуальним є вивчення сумісної дії ксенобіотиків на гідробіонтів як чутливих індикаторів екоотоксикологічного стану водойм, що може відобразитись на зміні біохімічних маркерів обміну речовин.

Метою роботи було оцінити сумісну дію гербіцидів: Зенкор, Раундап і 2,4-D та солей цинку на вміст загальних ліпідів, фосфоліпідів і активність лужної фосфатази у тканинах коропа (*Cyprinus carpio L.*).

Методологія. Дослідження проведено в умовах лабораторного експерименту з використанням екологічно релевантних концентрацій гербіцидів і цинку. У крові, м'язах, зябрах, печінці та тканинах головного мозку визначали вміст загальних ліпідів і фосфоліпідів, а також активність лужної фосфатази стандартними біохімічними методами. Статистичну обробку отриманих результатів проводили методами варіаційної статистики із застосуванням програмного пакета Statistica 10.0. Оцінку достовірності відмінностей між контрольною та експериментальними групами здійснювали за допомогою критерію Стьюдента (t-тесту).

Наукова новизна. роботи полягає у встановленні тканинно-специфічних особливостей змін ліпідного обміну та ферментативної активності лужної фосфатази у коропа за умов сумісного впливу гербіцидів і цинку, а також у виявленні модифікуючої ролі цинку в реалізації токсичної дії гербіцидів.

Висновки. Установлено, що сумісна дія гербіцидів і цинку спричиняє порушення ліпідного гомеостазу, дестабілізацію мембранних структур і зміни активності лужної фосфатази, які мають виражений тканинно-специфічний характер. Отримані результати свідчать про системний характер порушень перебігу біохімічних процесів і підтверджують доцільність використання показників ліпідного обміну та активності лужної фосфатази як біохімічних маркерів комбінованого антропогенного навантаження.

Ключові слова: гербіциди, цинк, короп, загальні ліпіди, фосфоліпіди, лужна фосфатаза, комбінована токсична дія

ABSTRACT

One of the main pathways by which herbicides enter aquatic ecosystems is their intensive use in agriculture, which, in turn, may lead to interactions with other anthropogenic pollutants, particularly heavy metals. Therefore, the study of the combined effects of xenobiotics on aquatic organisms, as sensitive indicators of the ecotoxicological status of water bodies, is highly relevant, as such interactions may be reflected in changes in biochemical markers of metabolism.

Purpose of the work. was to assess the combined effects of the herbicides Zencor, Roundup, and 2,4-D and zinc salts on the content of total lipids, phospholipids, and alkaline phosphatase activity in the tissues of common carp (*Cyprinus carpio L.*).

Methodology. The study was conducted under laboratory experimental conditions using environmentally relevant concentrations of herbicides and zinc. The content of total lipids and phospholipids, as well as alkaline phosphatase activity, was determined in blood, muscle, gills, liver, and brain tissues using standard biochemical methods. Statistical processing of the obtained results was carried out by methods of variational statistics using the Statistica 10.0

software package. The assessment of the reliability of differences between the control and experimental groups was carried out using the Student's criterion (t-test).

Scientific novelty. of the study lies in the identification of tissue-specific features of changes in lipid metabolism and enzymatic activity in common carp under combined exposure to herbicides and zinc, as well as in revealing the modifying role of zinc in the manifestation of herbicide toxicity.

Conclusions. It was established that the combined exposure to herbicides and zinc leads to disturbances in lipid homeostasis, destabilization of membrane structures, and changes in alkaline phosphatase activity, which exhibit a pronounced tissue-specific pattern. The obtained results indicate the systemic nature of biochemical process disturbances and confirm the feasibility of using lipid metabolism indicators and alkaline phosphatase activity as biochemical markers of combined anthropogenic impact.

Key words: herbicides, zinc, common carp, total lipids, phospholipids, alkaline phosphatase, combined toxic effects

Вступ

Сучасні агроєкосистеми зазнають значного антропогенного навантаження, зумовленого інтенсивним використанням засобів хімізації сільського господарства. Гербіциди належать до найбільш поширених груп пестицидів, які широко застосовуються для контролю бур'янів і, внаслідок цього, можуть потрапляти у водні об'єкти з поверхневими дощовими стоками і талими водами, що становить небезпеку для прісноводних екосистем за токсичного впливу на гідробіонтів, зокрема риб.

У численних дослідженнях показано, що гербіциди різних хімічних класів, зокрема Зенкор, Раундап і 2,4-D, здатні порушувати перебіг біохімічних процесів у тканинах риб, впливаючи на ліпідний обмін, стан клітинних мембран та активність ферментних систем (Mekhed et al., 2012). Встановлено, що за дії гербіцидів відбуваються зміни вмісту загальних ліпідів і фосфоліпідів, а також активності ферментів, залучених до метаболічних і транспортних процесів, що свідчить про розвиток стресових реакцій організму (Poletai et al., 2010).

Водночас за реальних умов забруднення водних екосистем спостерігається вплив більш ніж одного токсиканта. Поряд із пестицидами у водоймах часто виявляють іони важких металів, зокрема цинку, який належить до біогенних мікроелементів, але за підвищених концентрацій проявляє виражені токсичні властивості. Цинк здатний взаємодіяти з білками та ліпідами клітинних мембран, змінювати активність ферментів і модифікувати перебіг метаболічних процесів у тканинах риб (Kurant & Khomenchuk, 2019).

Незважаючи на наявність значної кількості робіт, присвячених вивченню впливу гербіцидів або важких металів на

гідробіонтів, питання їх сумісної дії залишається недостатньо дослідженим. Комбінований (сумісний) вплив гербіцидів і іонів важких металів може призводити до посилення токсичного ефекту або зміни механізмів дії окремих ксенобіотиків, що має важливе значення для оцінки екологічного стану водних екосистем (Lanzarin et al., 2022).

З огляду на це, актуальним є дослідження сумісної дії цинку з гербіцидами Зенкор, Раундап і 2,4-D на біохімічні показники тканин коропа (*Cyprinus carpio* L.). Аналіз змін вмісту загальних ліпідів, фосфоліпідів та активності лужної фосфатази дозволяє оцінити порушення процесів обміну ліпідів за комбінованого антропогенного навантаження.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження виконували у 2023 році в лабораторії екологічної біохімії Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка. Об'єктом експериментальних досліджень був короп лускатий (*Cyprinus carpio* L.). Для проведення експерименту відібрали 20 особин масою 250–300 г, виловлених із природної водойми – зимувального ставу ВАТ «Чернігіврибгосп».

Умови експерименту передбачали утримання риб за сумісного впливу гербіцидів і солей цинку ($ZnCl_2$). Гербіциди Зенкор (4-аміно-6-третбутил-3-(метилтіо)-1,2,4-триазин-5(4H)-он, діюча речовина - метрибузин), Раундап (N-фосфометил-гліцин, діюча речовина - гліфосат) та 2,4-D (2,4-дихлорфеноксоцтова кислота) використовували у концентраціях, що відповідали рівню 2 гранично допустимих концентрацій.

Необхідні концентрації діючих речовин досягали внесенням розрахованих кіль-

костей препаратів відповідно: для Зенкору – 0,2 мл/дм³, Раундапу – 0,04 мг/дм³, 2,4-D – 0,0004 мг/дм³, ZnCl₂ – 0,005 мг/м³

Оцінку впливу токсикантів проводили в 200-літрових акваріумах, заповнених відстояною водопровідною водою. Щільність посадки риби становила один екземпляр на 40 дм³ води. Температурний режим підтримували в межах +8...+10 °С, що відповідало природним умовам зимівлі. Тривалість експерименту – 14 діб.

Для біохімічного аналізу відбирали зразки крові, м'язів, зябер, печінки та головного мозку коропа лускатого. Для дослідження активності ферментів та вмісту загальних ліпідів у тканинах готували гомогенат на 0,22М сахарозі у співвідношенні 1:10. У відібраних тканинах визначали вміст загальних ліпідів, фосфоліпідів та активність лужної фосфатази. Кількісний вміст загальних ліпідів оцінювали сульфосфосованіліновим методом, фосфоліпіди – за кількістю неорганічного фосфору. Активність лужної фосфатази визначали за Гоморі. (Vlizlo et al., 2012). Дослідження проводили з додержанням вимог Директиви Європейського парламенту та Ради 2010/63/EU від 22 вересня 2010 р. про захист тварин, що використовуються для наукових цілей (European Parliament and Council, 2010).

Статистичну обробку отриманих результатів проводили методами варіаційної статистики із застосуванням програмного пакета Statistica 10.0. Оцінку достовірності відмінностей між контрольною та експериментальними групами здійснювали за допомогою критерію Стьюдента (t-тесту). Відмінності вважали статистично значущими за рівня ймовірності $p < 0,05$.

Результати дослідження та обговорення

У крові коропа за умов сумісного впливу гербіцидів та іонів цинку зафіксовано істотні зміни вмісту загальних ліпідів, характер яких залежав від типу гербіциду. Так, за дії Зенкору в поєднанні з цинком відзначено зниження рівня загальних ліпідів до $13,6 \pm 1,63$ г/л, що було нижчим порівняно з показниками контрольної групи ($18,13 \pm 1,27$ г/л).

Натомість за сумісного впливу цинку і Раундапу або 2,4-D у крові риб спостерігали підвищення вмісту загальних ліпідів, який

становив $21,33 \pm 2,35$ г/л та $18,93 \pm 1,71$ г/л відповідно.

Порівняльний аналіз показав, що за сумісної дії Зенкору та цинку відмічається зниження рівня загальних ліпідів у крові на 25 % відносно контролю. Водночас сумісний вплив цинку і Раундапу або 2,4-D супроводжувався підвищенням цього показника на 17 % та 4 % відповідно.

Виявлені зміни вмісту загальних ліпідів у крові коропа свідчать про модифікуючу роль цинку в реалізації токсичної дії гербіцидів. Зниження рівня загальних ліпідів за дії Зенкору в поєднанні з цинком, ймовірно, пов'язане з активацією катаболічних процесів і мобілізацією ліпідних резервів. Натомість підвищення вмісту загальних ліпідів за сумісного впливу Раундапу та 2,4-D з іонами цинку може бути зумовлене порушенням транспорту й катаболізму ліпідів. Отримані результати вказують на різноспрямований характер біохімічних реакцій в організмі коропа на комбіновану дію гербіцидів і важкого металу.

У тканинах коропа за умов сумісного впливу цинку та досліджуваних гербіцидів спостерігалась тенденція до зниження загальних ліпідів в м'язах, зябрах і печінці, тоді як у тканині головного мозку, навпаки, спостерігали його підвищення. Такий тканинно-специфічний характер змін може свідчити про різну чутливість органів до комбінованої дії ксенобіотиків (табл. 1).

У м'язовій тканині мінімальні зміни вмісту загальних ліпідів відмічено за дії Зенкору в поєднанні з цинком ($40,43 \pm 3,23$ г/л) порівняно з контролем ($40,64 \pm 3,66$ г/л). Водночас сумісний вплив Раундапу та цинку зумовлював різке зниження рівня загальних ліпідів до $9,71 \pm 0,87$ г/л, що на 76 % нижче контрольних значень. За дії 2,4-D у поєднанні з цинком вміст загальних ліпідів становив $32,64 \pm 2,94$ г/л, що відповідало зменшенню на 20 % відносно контролю.

У тканинах зябер спостерігали подібну динаміку змін. Найбільш виражене зниження вмісту загальних ліпідів (на 34 %) відзначено за сумісного впливу 2,4-D та солей цинку ($13,65 \pm 1,51$ г/л) порівняно з контролем ($20,8 \pm 1,67$ г/л). За дії Зенкору з цинком цей показник зменшувався на 18 % ($16,96 \pm 1,36$ г/л), тоді як за впливу Раундапу у поєднанні з цинком – на 10 % ($18,67 \pm 1,49$ г/л).

Таблиця 1

**Кількісний вміст загальних ліпідів в тканинах риб
за сумісної дії солей Zn та гербіцидів, г/л ($M \pm m$, n=5)**

Токсикант	Кров	М'язи	Зябра	Печінка	Мозок
Зенкор + Zn ²⁺	13,6 ± 1,63*	40,43 ± 3,23*	16,96 ± 1,36*	32,53 ± 2,61*	27,84 ± 2,23*
Раундап + Zn ²⁺	21,33 ± 2,35*	9,71 ± 0,87*	18,67 ± 1,49*	21,33 ± 1,71*	20,8 ± 1,67*
2,4D + Zn ²⁺	18,93 ± 1,71*	32,64 ± 2,94*	13,65 ± 1,51*	26,35 ± 2,11*	23,89 ± 1,91*
Контроль	18,13 ± 1,27*	40,64 ± 3,66*	20,8 ± 1,67*	42,99 ± 5,15*	15,15 ± 1,21*

Примітка:* – вірогідні відмінності порівняно з контролем, $p < 0,05$

Найбільш суттєві зміни вмісту загальних ліпідів зафіксовано в печінці – органі, що відіграє провідну роль у ліпідному обміні та процесах детоксикації. За сумісної дії Раундапу та цинку рівень загальних ліпідів знижувався до $21,33 \pm 1,71$ г/л порівняно з контрольним значенням $42,99 \pm 5,15$ г/л, тобто майже вдвічі. Деяко менш виражене зменшення показника відзначено за дії 2,4-D у поєднанні з цинком ($26,35 \pm 2,11$ г/л; на 39 % нижче контролю), тоді як за впливу Зенкору з цинком вміст загальних ліпідів становив $32,53 \pm 2,61$ г/л, що на 24 % менше контрольного рівня.

На відміну від зазначених тканин, у головному мозку коропа спостерігалось підвищення вмісту загальних ліпідів за сумісної дії цинку в поєднанні з досліджуваними гербіцидами. Найбільш виражене зростання показника (на 84 %) відмічали за дії Зенкору з цинком ($27,84 \pm 2,23$ г/л) порівняно з контролем ($15,15 \pm 1,21$ г/л). За сумісного впливу 2,4-D та цинку рівень загальних ліпідів підвищувався на 58 % ($23,89 \pm 1,91$ г/л), тоді як за дії Раундапу з цинком – на 37 % ($20,8 \pm 1,67$ г/л).

Вміст загальних ліпідів в досліджених тканинах узгоджується з результатами аналізу крові, де також виявлено різноспрямовані зміни вмісту загальних ліпідів залежно від типу гербіциду. Що може свідчити про системний характер порушень ліпідного обміну за комбінованої дії цинку в поєднанні з гербіцидом. Зниження вмісту загальних ліпідів у метаболічно активних тканинах (печінка, м'язи, зябра) може відображати інтенсифікацію катаболічних

процесів і мобілізацію ліпідних резервів, тоді як їх накопичення в мозку, ймовірно, пов'язане з особливостями ліпідного складу нервової тканини та обмеженими можливостями її метаболічної компенсації.

Виявлені зміни вмісту загальних ліпідів у різних тканинах коропа свідчать про суттєве порушення ліпідного обміну за умов сумісної дії цинку і гербіцидів. Однак показник загальних ліпідів відображає інтегральний стан ліпідного пулу і не дозволяє повною мірою оцінити структурні зміни клітинних мембран. У зв'язку з цим наступним етапом дослідження стало вивчення вмісту фосфоліпідів – ключових компонентів мембранних структур, зміни яких можуть більш точно характеризувати мембранотоксичний ефект досліджуваних ксенобіотиків (табл. 2).

Дослідження сумісного впливу солей цинку і гербіцидів на вміст фосфоліпідів у тканинах коропа показало виражені тканинно-специфічні зміни. У крові риби спостерігалось підвищення вмісту фосфоліпідів за сумісної дії токсикантів, однак інтенсивність змін суттєво залежала від типу ксенобіотика. Найбільш виражене зростання рівня фосфоліпідів (на 51 %) спостерігали за сумісного впливу 2,4-D і цинку, де їх вміст становив $12,5 \pm 1,5$ г/л порівняно з $8,3 \pm 0,6$ г/л у контрольній групі. За дії Раундапу в поєднанні з цинком вміст фосфоліпідів підвищувався на 24 % і досягав $10,37 \pm 0,83$ г/л, тоді як найменше зростання показника (на 16 %) відзначено за впливу Зенкору та цинку ($9,64 \pm 0,77$ г/л).

Кількісний вміст фосфоліпідів в тканинах риб
за сумісної дії солей Zn та гербіцидів, г/л ($M \pm m$, $n=5$)

Токсикант	Кров	М'язи	Зябра	Печінка	Мозок
Зенкор + Zn ²⁺	9,64 ± 0,77*	22,77 ± 1,92*	15,62 ± 1,24*	12,58 ± 1,02*	13,39 ± 1,07*
Раундап + Zn ²⁺	10,37 ± 0,83*	13,88 ± 1,11*	8,35 ± 0,66*	9,75 ± 0,78*	9,41 ± 0,75*
2,4D + Zn ²⁺	12,5 ± 1,5*	7,18 ± 0,57*	15,57 ± 1,24*	9,19 ± 0,73*	4,91 ± 0,39*
Контроль	8,3 ± 0,6	16,56 ± 1,32	6,72 ± 0,53	36,16 ± 2,89	20,94 ± 1,67

Примітка:* –вірогідні відмінності порівняно з контролем, $p < 0,05$

У м'язовій тканині зміни вмісту фосфоліпідів мали різноспрямований характер. За дії Зенкору в поєднанні з цинком спостерігали підвищення рівня фосфоліпідів на 37 % відносно контролю ($22,77 \pm 1,92$ г/л проти $16,56 \pm 1,32$ г/л). Натомість сумісний вплив Раундапу та цинку зумовлював зниження цього показника на 16 % ($13,88 \pm 1,11$ г/л), а дія 2,4-D у поєднанні з цинком призводила до найбільш вираженого зменшення вмісту фосфоліпідів – на 56 % ($7,18 \pm 0,57$ г/л).

У тканинах зябер зафіксовано підвищення вмісту фосфоліпідів за сумісної дії цинку і досліджуваних гербіцидів. Так, у контрольній групі рівень фосфоліпідів становив $6,72 \pm 0,53$ г/л, тоді як за дії Зенкору з цинком він зростав до $15,62 \pm 1,24$ г/л, що у 2,3 рази перевищувало контрольні значення. Подібний рівень фосфоліпідів ($15,57 \pm 1,24$ г/л) спостерігали й за сумісного впливу 2,4-D та цинку. Менш виражене підвищення цього показника (на 24 %) зафіксовано за дії Раундапу з цинком ($8,35 \pm 0,66$ г/л).

На відміну від крові, м'язів і зябер, у печінці коропа за умов сумісної дії цинку і гербіцидів спостерігали суттєве зниження вмісту фосфоліпідів порівняно з контролем ($36,16 \pm 2,89$ г/л). Найбільше зменшення цього показника відзначено за дії Раундапу та цинку, а також 2,4-D у поєднанні з цинком – на 73 % ($9,75 \pm 0,78$ г/л) та 74 % ($9,19 \pm 0,73$ г/л) відповідно. За дії Зенкору з цинком рівень фосфоліпідів у печінці знижувався на 65 % і становив $12,58 \pm 1,02$ г/л.

Подібна тенденція зниження вмісту фосфоліпідів спостерігалась і в тканинах головного мозку. Найбільш виражені зміни зафіксовано за сумісної дії 2,4-D та цинку, де

рівень фосфоліпідів зменшувався на 76 % ($4,91 \pm 0,39$ г/л) порівняно з контролем ($20,94 \pm 1,67$ г/л). За дії Раундапу з цинком вміст фосфоліпідів знижувався на 55 % ($9,41 \pm 0,75$ г/л), тоді як найменше зменшення (на 36 %) відзначено за впливу Зенкору та цинку ($13,39 \pm 1,07$ г/л).

Виявлені зміни вмісту загальних ліпідів і фосфоліпідів у тканинах коропа за умов сумісної дії гербіцидів і цинку свідчать про порушення ліпідного метаболізму, зокрема фосфоліпідів, що може вплинути на функціонування клітинних мембран. Оскільки функціонування мембран тісно пов'язане з комплексами інтегральних білків, доцільним було подальше дослідження активності лужної фосфатази – чутливого біохімічного маркера мембранної проникності та метаболічного стану клітин.

При дослідженні активність лужної фосфатази за дії солей цинку у поєднанні з гербіцидами було з'ясовано, що частіше сумісна дія цинку і гербіцидів призводить до зменшення активності лужної фосфатази у різних тканинах риби. Досліджуючи активність ЛФ у крові коропа виявили наступне. Найбільшу зміну активності фіксували за дії Раундапу у поєднанні з цинком – 84 % зменшення активності відносно контролю ($41,3 \pm 3,3$ од. акт. проти $261,9 \pm 20,9$ од. акт.), за дії Зенкору та цинку зменшення на 74 % – показник активності ферменту становив – $68,9 \pm 8,2$ од. акт., за дії 2,4-D та цинку – $124,1 \pm 9,9$ од. акт., що на 53 % менше за контрольні показники.

У тканинах м'язів спостерігали підвищення активності ферменту за дії Зенкору та цинку, а також Раундапу та цинку в однаковій мірі – на 73% відносно контрольної

групи. Активність ферменту становила – $261,9 \pm 20,9$ од. акт, проти контролю – $151,6 \pm 12,1$ од. акт. За дії 2,4-D та цинку

ензимна активність зменшувалась до $69,9 \pm 4,8$ од. акт., що на 54 % менше за показник контролю.

Таблиця 3

Активність лужної фосфатази в тканинах риби
за сумісної дії солей Zn та гербіцидів, од. акт. ($M \pm m$, $n=5$)

Токсикант	Кров	М'язи	Зябра	Печінка	Мозок
Зенкор + Zn ²⁺	$68,9 \pm 8,2^*$	$261,9 \pm 20,9^*$	$124,1 \pm 9,9^*$	$1640,4 \pm 82,1^*$	$68,92 \pm 4,13^*$
Раундап + Zn ²⁺	$41,3 \pm 3,3^*$	$261,9 \pm 28,8^*$	$68,92 \pm 4,8^*$	$41,3 \pm 3,3^*$	$41,3 \pm 3,7^*$
2,4D + Zn ²⁺	$124,1 \pm 9,9^*$	$69,9 \pm 4,8^*$	$68,9 \pm 6,2^*$	$68,9 \pm 5,5^*$	$68,9 \pm 7,5^*$
Контроль	$261,9 \pm 20,9$	$151,6 \pm 12,1$	$195,5 \pm 11,5$	$261,9 \pm 31,4$	$1089,1 \pm 87,1$

Примітка:* – вірогідні відмінності порівняно з контролем, $p < 0,05$

У тканинах зябер спостерігали зменшення ферментативної активності за дії цинку та гербіцидів у рівній мірі. Активність ферменту у контрольній групі становила – $195,5 \pm 11,5$ од. акт., в той час як за дії Зенкору та цинку – $124,1 \pm 9,9$ од. акт., за дії Раундапу та цинку, 2,4-D та цинку показник становив – $68,92 \pm 4,8$ од. акт, та $68,9 \pm 6,2$ од. акт. відповідно, що у відсотковому співвідношенні є меншим від контролю на 28-29 %.

У тканинах печінки спостерігалось збільшення активності лужної фосфатази за дії Зенкору та цинку – $1640,4 \pm 82,1$ од. акт., у контрольній групі – $261,9 \pm 31,4$ од. акт., що перевищує показник контролю (більш ніж у 6 разів). Натомість, за дії Раундапу та цинку активність ферменту зменшувалась до $41,3 \pm 3,3$ од. акт, що на 84 % менше ніж у контролі. За дії 2,4-D та цинку активність ферменту становила $68,9 \pm 5,5$ од. акт., що на 74 % менше від контролю.

У тканинах мозку спостерігали зменшення за сумісної дії солей цинку та гербіцидів. Спостерігалось зменшення показника на 94-96 %. Активність ферменту у контрольній групі – $1089,1 \pm 87,1$ од. акт. За дії Зенкору та цинку – $68,92 \pm 4,13$ од. акт., за впливу Раундапу та цинку – $41,3 \pm 3,7$ од. акт, за дії 2,4-D та цинку – $68,9 \pm 7,5$ од. акт.

Дослідження активності лужної фосфатази у тканинах коропа за сумісного впливу солей цинку і гербіцидів виявило переважно інгібувальний механізм впливу ксенобіотиків, який мав чітко виражену тканинну специфічність. У більшості випадків комбінована дія цинку і гербіцидів призводила до

зниження активності ферменту, що може свідчити про порушення мембранозалежних метаболічних процесів.

Отримані результати свідчать, що лужна фосфатаза є високочутливим біохімічним маркером комбінованого токсичного впливу цинку і гербіцидів. Зниження активності ферменту в крові, зябрах і мозку може відображати дестабілізацію мембранних структур, порушення транспортних процесів і пригнічення метаболічної активності клітин. Водночас різке підвищення активності лужної фосфатази в печінці за дії Зенкору та цинку, ймовірно, має компенсаторний характер і пов'язаний з активацією тканино-специфічних детоксикаційних механізмів. Загалом, тканинно-специфічні зміни активності лужної фосфатази свідчать про комплексний характер порушень метаболічних процесів за умов сумісного впливу важкого металу і гербіцидів.

Комплексний аналіз змін вмісту загальних ліпідів, фосфоліпідів та активності лужної фосфатази у тканинах коропа за умов сумісного впливу солей цинку і гербіцидів свідчить про глибокі порушення метаболізму ліпідів та мембранозалежних процесів. Виявлені зрушення мали виражений тканинно-специфічний характер і залежали як від типу гербіциду (в поєднанні з токсичним впливом цинку), так і від особливостей перебігу біохімічних процесів у досліджуваних тканинах.

Висновки

Отримані результати свідчать, що сумісний вплив солей цинку і гербіцидів Зенкору, Раундапу і 2,4-D спричиняє комплексні порушення метаболізму ліпідів і мембранозалежних процесів у тканинах коропа. Виявлені зміни вмісту загальних ліпідів характеризуються вираженою тканинною специфічністю і відображають перерозподіл ліпідних ресурсів за умов комбінованого токсичного навантаження.

Зміни фосфоліпідного складу тканин можуть свідчити про порушення функціонування мембранних структур: порушення синтезу та оновлення компонентів мембран, що має тканино-специфічний характер. Різноспрямовані зрушення фосфоліпідного обміну підтверджують різну чутливість тканин коропа до дії ксенобіотиків і роль мембранозалежних процесів у формуванні відповіді на токсиканти.

Активність лужної фосфатази виявилася чутливим біохімічним маркером комбінованого впливу цинку і гербіцидів. Її інгібування у крові, зябрах і тканинах головного мозку відображає пригнічення мембранозалежних ферментативних процесів, тоді як зміни активності в печінці та м'язах мають ознаки адаптаційно-компенсаторних реакцій, пов'язаних із залученням детоксикаційних механізмів.

У сукупності результати дослідження підтверджують, що цинк виступає важливим модифікуючим чинником токсичної дії гербіцидів, спричиняючи різні тканино-специфічні метаболічні відповіді у організмі коропа. Комплексні порушення показників загальних ліпідів, фосфоліпідів та активності лужної фосфатази можуть бути використані як інформативні біохімічні маркери екотоксикологічного стану прісноводних екосистем за умов комбінованого антропогенного навантаження.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до автора / Dataset available on request from the author.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Експериментальні процедури були схвалені Комісією з біоетики Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка (№ протоколу: 5, 3 жовтня 2024 р., Чернігів, Україна) / The experimental procedures were approved by the Bioethics Committee of T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium» (Protocol Number: 5, 3 October 2024, Chernihiv, Ukraine).

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів / The author declares no conflicts of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Mekhed, O. B., Tretiak, O. P., & Derkach, S. M. (2012). Changes in the activity of some catabolic enzymes of carp (*Cyprinus carpio* L.) in short-term cell culture and at the organism level under toxic effects of herbicides. *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Current Problems of Theoretical and Practical Ichthyology"*. (in Ukrainian)

Мехед О. Б., Третяк О. П., Деркач С. М. Зміни активності деяких ферментів катаболізму коропа (*Cyprinus carpio* L.) у короткочасній культурі клітин та на рівні організму риб за токсичного впливу гербіцидів. Сучасні проблеми теоретичної і практичної іхтіології: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. 2012.

Poletai, V. M., Veselskyi, S. P., & Yanchuk, P. I. (2010). Effects of herbicides on lipid intermediate metabolism in carp. *Visnyk of Cherkasy University. Series: Biological Sciences*, 184, 110–114. (in Ukrainian)

Полетай В. М., Весельський С. П., Янчук П. І. Вплив гербіцидів на проміжний обмін ліпідів в організмі коропа. *Вісник Черкаського університету. Серія: Біологічні науки*. 2010. Вип. 184. С. 110–114.

Kurant, V. Z., & Khomenchuk, V. O. (2019). Influence of manganese, zinc, copper and lead ions on the content of free amino acids in carp organism. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*, 75(1), 28–42. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.19.1.4> (in Ukrainian)

Курант В. З., Хоменчук В. О. Вплив іонів мангану, цинку, купруму та плюмбуму на вміст вільних амінокислот в організмі коропа. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2019. Т. 75, № 1. С. 28–42. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.19.1.4>

Lanzarin, G. A. B., Venâncio, C. A. S., Félix, L. M., & Monteiro, S. M. (2022). Evaluation of the developmental effects of a glyphosate-based herbicide complexed with copper, zinc, and manganese metals in zebrafish. *Chemosphere*, 308, 136430. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136430>

Vlizlo, V. V., Fedoruk, R. S., Ratych, I. B., et al. (2012). *Laboratory methods of research in biology, animal husbandry and veterinary medicine* (V. V. Vlizlo, Ed.). Lviv: SPLOM. 764 p. (in Ukrainian)

Влізло В. В., Федорук Р. С., Ратич І. Б. та ін. Лабораторні методи досліджень у біології, тваринництві та ветеринарній медицині: довідник / за ред. В. В. Влізла. Львів: СПОЛОМ, 2012. 764 с.

European Parliament and Council. (2010). Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. *Official Journal of the European Union*, L 276, 33–79. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0063>

Received: 10.02.2026. Accepted: 12.03.2026. Published: 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Ячна М. Зміни деяких показників ліпідного обміну та активності лужної фосфатази у коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.) за умов комбінованого впливу гербіцидів і солей цинку. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 73-80. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.6>

Cite this article in APA style as:

Yachna, M. (2026). Zminy deiakykh pokaznykiv lipidnoho obminu ta aktyvnosti luzhnoi fosfatazy u koropa luskatoho (*Cyprinus carpio* L.) za umov kombinovanoho vplyvu herbitydiv i solei tsynku [Changes in selected lipid metabolism parameters and alkaline phosphatase activity in common carp (*Cyprinus carpio* L.) under combined exposure to herbicides and zinc salts]. *Biota. Human. Technology*, (1), 73-80. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.6> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Yachna M. [in Ukrainian: **Ячна М.**] ¹, Senior lecturer, email: m_yachna@ukr.net
ORCID: 0000-0003-4587-525X

Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

UDC 639.3:504.5

DOI: 10.58407/bht.1.26.7



Copyright (c) 2026 Tetiana Sharamok, Dmytro Zhuravlov, Hanna Tunkina

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Тетяна Шарамок, Дмитро Журавльов, Ганна Тункіна

ХРОНІЧНИЙ ВПЛИВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА РЕПРОДУКТИВНУ СИСТЕМУ ТА ПЛОДЮЧІСТЬ *POECILIA RETICULATA*



Tetiana Sharamok, Dmytro Zhuravlov, Hanna Tunkina

THE CHRONIC EFFECTS OF THE HEAVY METALS ON REPRODUCTIVE SYSTEM AND FERTILITY OF *POECILIA RETICULATA*

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідити вплив важких металів (Cu, Zn, Cd та їх суміші) у концентраціях, що перевищують рибогосподарські ГДК у 20, 1,3 та 1,5 рази відповідно та є фоновими для деяких водойм Придніпров'я на репродуктивну систему та плодючість гуппі (*Poecilia reticulata*). Визначити гістоморфологічні зміни гонад за хронічної дії важких металів.

Методологія. Модельні експерименти з гуппі проводились протягом 92 діб в аерованих акваріумах об'ємом 5 л. Забруднення води в дослідних акваріумах моделювали шляхом додавання речовин до кінцевих концентрацій: міді 0,02 мг/дм³, кадмію 0,0075 мг/дм³, цинку 0,013 мг/дм³ та суміші важких металів, контрольний акваріум заповнювали дехлорованою водопровідною водою. Наприкінці експерименту проводили морфологічні дослідження риб. Гістологічний аналіз гонад здійснювали відповідно до загальноприйнятих методик. Фотофіксацію гістологічних препаратів робили при збільшенні 400× за допомогою цифрової камери SIGETA M3 CMOS 25000 з підключенням її до мікроскопа Ulab XY-B2TLED.

Наукова новизна. Зважаючи на недостатню кількість відомостей стосовно хронічного впливу металів та їхніх сумішей на репродуктивну систему риб, виникає потреба у проведенні модельних дослідів. За умов хронічного впливу іонів Cd, Cu, Zn та їх суміші у концентраціях, що перевищували рибогосподарські ГДК, у гонадах гуппі було виявлено низку патоморфологічних змін. Зокрема, встановлено деструкцію оболонок ооцитів та жовткового мішка, ліпідну вакуолізацію цитоплазми яйцеклітин, а також порушення цілісності оболонок сім'яників, деградацію їхньої структури та розширення інтерстиційного простору. В сукупності ці зміни призвели до скорочення рівня плодючості або повної відсутності народжуваності мальків.

Висновки. Хронічна експозиція іонами важких металів протягом 92 діб призвела до суттєвого зниження плодючості дослідних риб. Поширеною патологією було порушення цілісності оболонок ооцитів та інтенсивна ліпідна вакуолізація цитоплазми. У сім'яниках виявлено порушення їх структури, зменшення кількості зрілих сперматозоїдів та ущільнення сперматид (під впливом кадмію), що може бути наслідком затримки дозрівання.

Ключові слова: важкі метали, гуппі, репродуктивна система, плодючість

ABSTRACT

Purpose of the work. The study aims to research the impact of the heavy metals (Cu, Zn, Cd, and their mixtures) in concentrations that exceed the fish farming MPC by 20, 1.3, and 1.5 times, respectively, and are the background for some waters of the Prydniprovia region on the reproductive system and fertility of guppies (*Poecilia reticulata*). To determine histomorphological changes in the gonads under the chronic action of the heavy metals.

Methodology. Model experiments with the guppy were conducted for 92 days in aerated aquariums with a volume of 5 liters. Water pollution in experimental aquariums was simulated by adding substances to the final concentrations: copper 0.02 mg/dm³, cadmium 0.0075 mg/dm³, zinc 0.013 mg/dm³, and a mixture of heavy metals. The control aquarium was filled with dechlorinated tap water. At the end of the experiment, morphophysiological studies of the fish were conducted. Histological analysis of the gonads was carried out according to generally accepted methods. Photofixation of the histological preparations was done at a magnification of 400× using a SIGETA M3 CMOS 25000 digital camera connected to a Ulab XY-B2TLED microscope.

Scientific novelty. Given the lack of information on the chronic effects of metals and their mixtures on the reproductive system of fish, there is a need to conduct model experiments. Under conditions of chronic exposure to Cd, Cu, Zn ions, and their mixtures in concentrations exceeding the fishery MPC, several pathomorphological changes were detected in the gonads of the guppy. In particular, the destruction of the membranes of oocytes and the yolk sac, lipid

vacuolization of the cytoplasm of egg cells, as well as disruption of the integrity of the membranes of testes, degradation of their structure, and expansion of the interstitial space were found. Taken together, these changes led to a reduction in fertility or a complete lack of birth rates.

Conclusions. Chronic exposure to heavy metal ions for 92 days has led to a significant decrease in the fertility of the experimental fish. A common pathology was disruption of the integrity of the membranes of oocytes and intense lipid vacuolization of the cytoplasm. In the testes, structural abnormalities, a decrease in the number of mature spermatozoa, and condensation of spermatids (under the influence of cadmium) were detected, which may be a consequence of delayed maturation.

Key words: heavy metals, guppies, reproductive system, fertility

Вступ

Повномасштабні військові дії на території України значно загострюють проблему забруднення водних екосистем ксенобіотиками, що призводить до їх хронічного впливу на гідробіотів, зокрема на рибу.

Гідроекосистема є кінцевою ланкою накопичення забруднюючих речовин, що надходять з господарсько-побутовими та промисловими стічними водами, дощовими та талими водами, сільськогосподарським стоком (Nikolenko & Fedonenko, 2021). Відомо, що саме важкі метали є пріоритетними забруднювачами водних екосистем України, зокрема водою Придніпров'я. Попередні дослідження підтверджують збільшення концентрації металів в Запорізькому (Дніпровському) водосховищі з кожним роком (Fedonenko et al., 2012; Buzina & Khainus, 2019; Kurchenko et al., 2024).

Важкі метали представляють особливу загрозу біоті оскільки не розкладаються біологічно і мають руйнівний вплив на організми. В наш час купрум (Cu), цинк (Zn) та кадмій (Cd) широко розповсюджуються в гідроекосистемах внаслідок промислових скидів та військових дій. Вони здатні акумулюватися в гідробіотах, що вже було досліджено в організмах річкових раків та рибу Запорізького (Дніпровського) та Кам'янського водосховищ (Korzhenyevska et al., 2023; Kurchenko et al., 2024). Потрапляючи в організм мешканців водою, важкі метали спричиняють токсичні дії, що включають в себе оксидативний стрес, порушення росту, роботу репродуктивної системи, ферментативну активність, генетичні мутації, а через здатність до накопичення в їстівній частині промислових гідробіотів, несуть в собі загрозу для їх споживачів (Polak-Juszczak & Szlider-Richert, 2024).

На сьогодні накопичено певний фактичний матеріал щодо впливу різних концентрацій важких металів на репродуктивну функцію рибу, в тому числі і на гістоструктуру

гонад (Shelke Abhay D., 2014; Cao J et al., 2019; Su L et al., 2023; Wu G. et al., 2023). Водночас потребує подальшого з'ясування впливу тривалої експозиції фонових концентрацій важких металів та їх комплексів на репродуктивну систему та генеративні показники рибу.

Важливо також зазначити, що забруднення екосистем важкими металами несе в собі довготривалі наслідки, що підтверджує аналіз гідробіотів Балтійського моря, котрі досі накопичують в собі важкі метали, джерелом яких є боєприпаси часів Другої світової війни.

З огляду на вищезазначене, наші гідроекосистеми перебувають у зоні підвищеного ризику, що зумовлює актуальність вивчення віддалених наслідків антропогенного навантаження.

Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження були гуппі (*Poecilia reticulata*) віком 2 місяці, які культивувалися в науковій лабораторії НДІ Біології ДНУ. Модельні експерименти проводилися протягом 92 діб в серпні-листопаді 2025 р. на кафедрі Загальної біології та водних біоресурсів Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. В кожний аерований акваріум об'ємом 5 л було розміщено по 20 екземплярів рибу (10 самців та 10 самок), середньою довжиною $2,027 \pm 0,14$ см. Рибу надавали корм у кількості 3 % від їхньої маси.

Забруднення води моделювалось шляхом додавання у воду розчинів металів (CuSO_4 , CdSO_4 , ZnSO_4) у відповідних концентраціях. Кожні 3 доби змінювали 60 % води та додавали сполуки до стабілізації показників вмісту важких металів. Контрольний акваріум заповнювався дехлорованою водопровідною водою. Вміст важких металів в досліді відповідав їх концентраціям у воді водою Придніпров'я (Yesirova et al., 2023). Схема проведення експерименту представлена в табл.1.

Варіанти модельного експерименту
за хронічного впливу важких металів на *Poecilia reticulata*

Показники	Дослід 1 Cu ²⁺	Дослід 2 Cd ²⁺	Дослід 3 Zn ²⁺	Дослід 4 Cu+Cd+Zn
Концентрація в експерименті, мг/дм ³	0,020	0,0075	0,013	0,020+ +0,008+ +0,013
ГДК, мг/дм ³	0,001	0,005	0,01	-
Температура, °С	24	24	24	24
Вміст кисню, мг/дм ³	7	7	7	7

Для визначення коефіцієнту вгодованості (K_v) риб за Фультоном користувались наступною формулою:

$$K_v = m/l^3 \times 100,$$

де K – коефіцієнт вгодованості;

P – маса риби, г;

l – довжина риби від початку рила до кінця лускового покриву, см.

Гістологічний аналіз гонад здійснювали відповідно до загальноприйнятих методик. Для отримання гістологічних препаратів готували парафінові блоки, а зрізи робили за допомогою мікротома та забарвлювали гематоксилін-еозином. Фотофіксацію гістологічних препаратів проводили при збільшенні 400× за допомогою цифрової камери SIGETA M3 CMOS 25000 з підключенням її до мікроскопа Ulab XY-B2TLED. Всього було проаналізовано по 20 фото гістологічних препаратів з кожного дослідження та контролю. Визначали площу ооцита, його великий та малий діаметри. Обчислення проводили за допомогою програми TopView.

Достовірність різниці між варіантами визначали методами варіаційної статистики із використанням тесту Тьюкі. Відмінності вважалися достовірними при різниці $p \leq 0,05$.

Під час проведення досліджень біоетичні норми не порушувались. Дослідження було виконано згідно з правилами біоетики (Regulations on the Committee on Ethics (Bioethics), 2012).

Результати дослідження та обговорення

Дослідженням виявлено специфічний вплив цинку на розмноження *Poecilia reticulata* (Дослід 4). Попри те, що в експериментальній групі перша генерація з'яви-

лася раніше за контроль (на 47-у добу), подальша хронічна експозиція металу призвела до глибокого пригнічення репродуктивної функції. Відомо, що цинк є важливим мікроелементом для риб, який у малих дозах стимулює репродуктивну функцію, але у великих концентраціях стає токсичним, суттєво знижуючи плодючість та виживаність потомства. Сумарна кількість отриманого потомства була на 71,4 % нижчою порівняно з контрольною групою, що свідчить про високу гонадотоксичність цинку при тривалому впливі та виснаження адаптаційних резервів організму (рис. 1).

У ході проведеного аналізу встановлено, що мідь як окремо, так і в комбінації з цинком та кадмієм (Досліди 1; 4), пригнічує плодючість риб на 64,3 % порівняно з контролем. Водночас найбільш агресивним токсикантом виявився кадмій, який призвів до абсолютного припинення відтворення. Можна припустити, що в Досліді 2 репродуктивна функція гуппи була повністю пригнічена, що призвело до відсутності потомства. Ймовірно, тривала інтоксикація кадмієм може спричинити резорбцію ембріонів або їхню загибель на ранніх стадіях онтогенезу. Аналізуючи дані щодо морфологічних показників риб, встановлено, що за коефіцієнтом вгодованості, який відображає загальний фізіологічний стан особини, не виявлено статистично достовірної різниці як між контролем та дослідженнями, так і між експериментальними групами. Проте виявлена відмінність між показниками маси самиць різних груп. Достовірна різниця встановлена між Дослідом 2 (вплив кадмію) та контрольною групою риб у 2,1 рази, що може пояснюватися затримкою народжуваності, яка й призводить до збільшення маси риб.

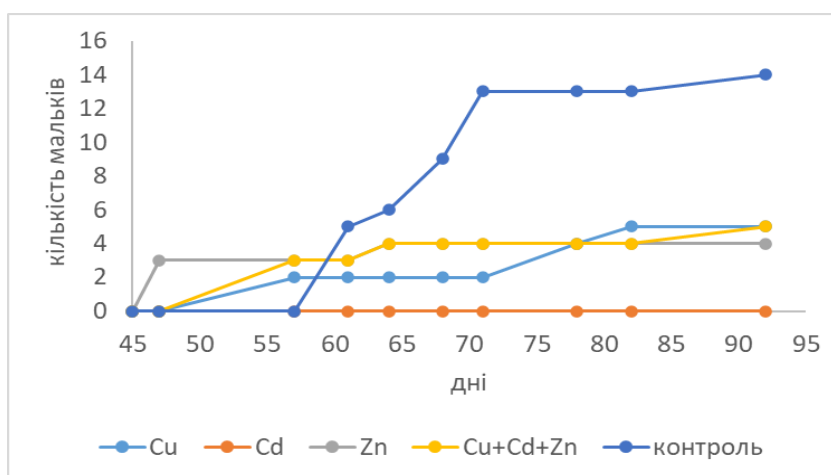


Рис. 1. Продуктивність самиць гуппі

В інших дослідних групах спостерігається тенденція до збільшення маси самиць, що пов'язано з частковою реалізацією репродуктивного потенціалу, але спостерігається тенденція затримки народжуваності, що підтверджується при аналізі гістологічних препаратів. Затримка народжуваності може бути спричинена загальним виснаженням організму та нездатністю накопичити достатню кількість поживних речовин, що свідчить про специфічну токсичну дію даних сполук (табл. 2). Достовірних відмінностей морфологічних показників самців не виявлено в дослідних групах порівняно з контролем та між експериментальними особинами. Середня маса самців гуппі наприкінці експерименту складала $0,142 \pm 0,03$ г, довжина – $2,54 \pm 0,2$ см, коефіцієнт вгодованості – $2,45 \pm 0,36$.

У сучасній науковій літературі висвітлені дані щодо мікроскопічної структури ооцитів з різною кількістю жовтка у двох видів живородних риб *Poeciliidae* та стратегії ембріонального живлення у живородних кісткових риб.

Унікальність живородіння у кісткових риб полягає в особливій будові їхньої репро-

дуктивної системи, яка суттєво відрізняється від інших хребетних через відсутність структур, що формують яйцепроводи. Внаслідок цього яєчник риб має пряме сполучення із зовнішнім середовищем через нерепродуктивний канал гонодуктом. Отже, розвиток ембріонів відбувається всередині яєчника, що є унікальним механізмом гонадного виношування серед хребетних. Яєчник поєднаний розташований поздовжньо і підтримується до дорсальної стінки тіла брижею. Яєчник містить центральний просвіт та має мішкоподібний вид (Uribe et al., 2026).

Для оцінки стану статевих залоз *Poecilia reticulata* нами було проведено аналіз гістоструктури яєчників, результати якого вказують на збереження типової структури ооцитів у риб контрольної групи. Фіксувались ооцити на стадії пізнього вітелогенезу з великою кількістю гомогенного щільного жовтка, забарвленого інтенсивним пурпуровим кольором. На периферії ооцита розташовані ліпідні гранули – білі, на вигляд порожні, округлі утворення. Кожен ооцит оточує тонкий шар фолікулярних клітин (рис. 2. А).

Таблиця 2

Морфологічні показники самиць гуппі наприкінці експерименту

Дослід/Показник	Довжина риб, см	Маса риб, г	Кв
Контроль	$2,65 \pm 0,64^a$	$0,290 \pm 0,22^a$	$2,50 \pm 0,33^a$
Cd	$3,7 \pm 0,24^{ab}$	$0,615 \pm 0,134^b$	$2,41 \pm 0,49^a$
Cu	$3,35 \pm 0,26^{ab}$	$0,405 \pm 0,062^{ab}$	$2,52 \pm 0,24^a$
Zn	$3,13 \pm 0,42^b$	$0,332 \pm 0,12^{ab}$	$2,36 \pm 0,22^a$
Cd+Cu+Zn	$3,23 \pm 0,57^{ab}$	$0,351 \pm 0,144^{ab}$	$2,47 \pm 0,32^a$

Примітка: різні літери в стовпчику - різниця статистично достовірна, при $p \leq 0,05$

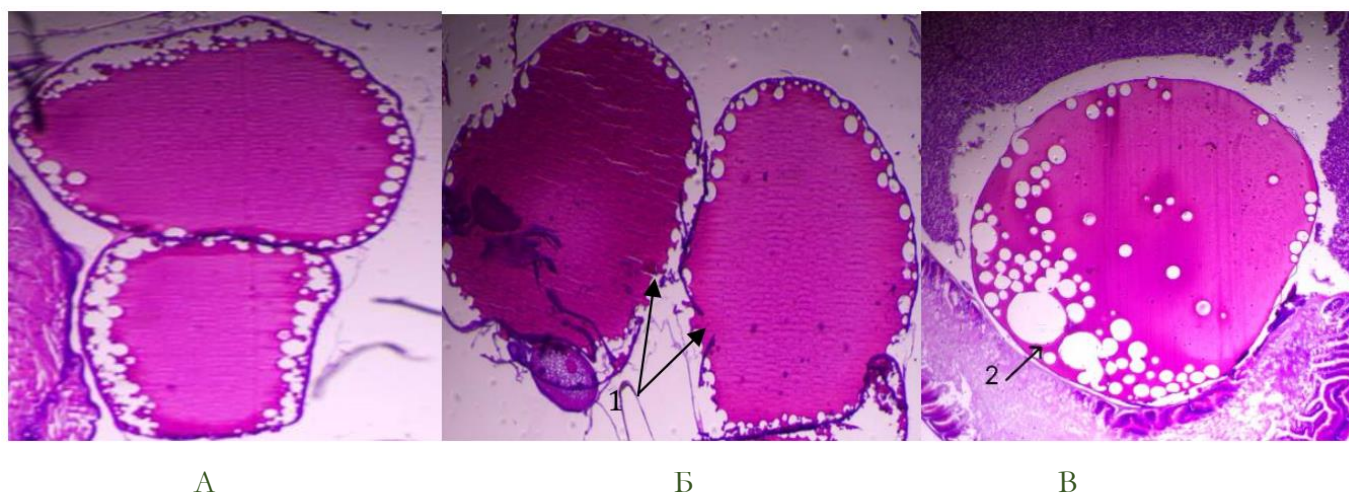


Рис. 2. Яйцеклітини самиць гуппи.
 А – контроль; Б – Дослід 2 (Cd^{2+}); В – Дослід 3 (Zn^{2+})

Виявлено вплив важких металів на гістологічну будову ооцитів гуппи. Встановлено порушення оболонки яйцеклітини, яке спостерігалось в 33 % досліджених зразків внаслідок 92-годинної експозиції розчином кадмію у концентрації, що в 1,5 рази перевищує рибогосподарську гранично допустиму концентрацію (рис. 2 Б).

У процесі оогенезу риб формування ліпідних включень є необхідним для забезпечення енергетичного та пластичного обміну майбутнього зародка. Проте патологічне збільшення кількості жирових вакуолей або їх аномальна морфологія (надмірне злиття чи нерівномірний розподіл) призводять до негативних наслідків. За впливу іонів цинку (1,3 ГДК) та суміші важких металів спостерігалась надмірна ліпідна вакуолізація та злиття вакуолей ооцитів (рис. 2.В) у 60 % та 33 % досліджуваних зразків відповідно. Аномальна вакуолізація цитоплазми ооцитів риб виявлена раніше за дії різних токсикантів на риб (Magar et al., 2013; Anamika et al., 2015; Yön Ertuğ et al., 2021). Ймовірно, велика кількість жирових крапель може створювати механічні перешкоди для нормального переміщення цитоплазматичних детермінант та впливати на хід розвитку ембріона. Наприклад, порушення симетрії бластомерів та зупинки розвитку на стадії бластули. Надмірна концентрація ліпідів у вакуолях може створювати субстрат для інтенсивної пероксидації.

Під впливом купруму (20 рибогосподарських ГДК) в 50 % препаратів виявлено

порушення оболонки жовткового мішка, що є критичним чинником, оскільки безпосередньо загрожує виживанню зародка, бо виконує роль головного органу живлення, дихання та виділення на ранніх етапах розвитку.

Заміри яйцеклітин не виявили статистично достовірної різниці серед показників, проте важливо відмітити скорочення розмірів яйцеклітини за впливу токсикантів. Найбільше середнє значення великого та малого діаметру ооцитів спостерігалось у контрольних самок та складало $1,276 \pm 0,233$ мм та $1,029 \pm 0,193$ мм відповідно. Під впливом цинку розмір скоротився на 22,5 %, а кадмію – на 32,65 %. Подібну картину автори спостерігали за хронічного впливу пестицидів на риб (Kulshrestha & Arora, 1984). Спостерігалось поступове зменшення ооцитів, зупинка розвитку фолікулів, одночасна зупинка вітелогенезу, що призводило до зменшення розміру ооцитів.

Самці в контролі мали впорядковану структуру сперматогенних клітин з достатньою кількістю зрілих сперматозоїдів (рис. 3. А). У сім'яниках піддослідних риб за впливу Cd, Zn, Cu спостерігався некроз, пошкодження оболонки сім'яника та фрагментація тканини. Спостерігалась також збільшення інтерстиційного простору (рис. 3. Б, В).

Пошкодження оболонки сім'яника є характерною патологією за впливу важких металів так як сполука активно взаємодіє з ліпідами тим самим порушуючи сталу структуру.

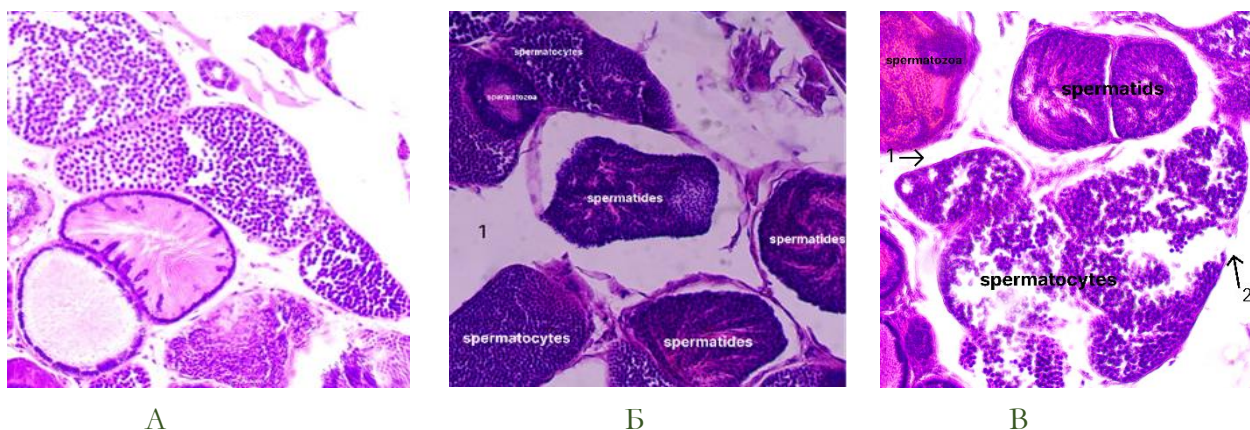


Рис. 2. Сім'яники самців гуппі: А – контроль; Б – Дослід 1 (Cu^{2+}); В – Дослід 2 (Cd^{2+})

Зміни в сім'яниках включали здебільшого некроз гонад, ступінь яких збільшувався в процесі сперматогенезу, так як у молодих сім'яниках явище некрозу не спостерігалось. Ймовірно, це пов'язано з тим, що саме накопичення важкого металу несе найбільш руйнівний ефект. Отримані результати узгоджуються та розширюють вже наявні відомості стосовно впливу ртуті на гонади самців гуппі (Wester & Canton, 1992). Порушувалась також загальна структура органу, що добре видно на знімках у порівнянні з контролем

Щодо кількості зрілих сперматозоїдів, важливо відмітити велику кількість зрілих сперматозоїдів в контрольній групі. Натомість за впливу Cd спостерігається ущільнення сперматидів через відсутність виходу сперматозоїдів до каналців. Такий результат може свідчити про затримку дозрівання вмісту сім'яників, що підтверджується дослідженнями інших авторів (Vergilio et al., 2015). За впливу міді також спостерігалось зменшення зрілих сперматозоїдів, натомість переважання в кількості сперматоцитів 1-го та 2-го порядку та сперматогоніїв. За впливу Zn та суміші металів спостерігалась достатня кількість зрілих сперматозоїдів.

Фінансування / Funding

Робота виконана в межах держбюджетної НДР №5-699-26 «Розроблення інтегрованої стратегії відновлення річкових екосистем, що зазнали мілітарних впливів» / The work was carried out within the framework of state budget research project No. 5-699-26 «Development of an integrated strategy for the restoration of river ecosystems affected by military impacts».

Загалом отримані результати підтверджують та розширюють вже наявні відомості стосовно впливу важких металів на репродуктивну систему риб, виділяючи основним наявність низки патологій та зниження плодючості риб.

Висновки

Хронічна експозиція іонами важких металів протягом 92 діб призвела до суттєвого зниження плодючості дослідних груп риб. Зокрема, під дією купруму та комбінації металів (купруму, кадмію та цинку) цей показник впав на 64,3 %, а за впливу цинку – на 74,1 % порівняно з контролем. Найбільш патогенний ефект виявлено у групі з кадмієм (0,0075 мг/л), де спостерігалось повне пригнічення репродуктивної функції.

Результати гістологічного аналізу яєчників показали, що найбільш поширеною патологією було порушення цілісності оболонок ооцитів, зафіксоване у 45% зразків. Крім того, у 30 % випадків спостерігалась інтенсивна ліпідна вакуолізація цитоплазми.

Гістологічний аналіз сім'яників виявив, що за впливу важких металів відбувається порушення структури гонад, зменшення кількості зрілих сперматозоїдів та ущільнення сперматид (під впливом кадмію), що може бути наслідком затримки дозрівання.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Експериментальні процедури були схвалені Комісією з біоетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (No протоколу: 2 від 06 листопада 2025 р., Дніпро, Україна) / The experimental procedures were approved by the Bioethics Commission of Oles Honchar Dnipro National University (Protocol Number: 2, 06 November 2025, Dnipro, Ukraine).

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

- Anamika, A., Ranjana, R., & Mishra, A. P. (2015). Histopathological alterations of profenofos on the ovary of the fresh water air-breathing fish *Channa gachua*. *The Asian Journal of Animal Science*, 10(1), 8–13. <https://doi.org/10.15740/HAS/TAJAS/10.1/8-13>
- Buzina, I. M., & Khainus, D. D. (2019). A study of the pollution of aquatic ecosystems with heavy metals in a changing climate. *Tavria Scientific Bulletin*, 105, 240–246. (in Ukrainian). https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/105_2019/39.pdf
Бузіна І. М., Хайнус Д. Д. Дослідження питань забруднення водних екосистем важкими металами в умовах змін клімату. Таврійський науковий вісник. 2019. № 105. С. 240-246. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/105_2019/39.pdf
- Cao, J., Wang, G., Wang, T., Chen, J., Wenjing, G., Wu, P., He, X., & Xie, L. (2019). Copper caused reproductive endocrine disruption in zebrafish (*Danio rerio*). *Aquat Toxicol*, 211, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.04.003>
- Fedonenko, O. V., Yesipova, N. B., Sharamok, T. S., Ananieva, T. V., Yakovenko, V. O., & Zhezheria, V. A. (2012). Modern problems of hydrobiology: Zaporizhzhia reservoir: Handbook. Dnipropetrovsk. (pp. 151–174). (in Ukrainian) https://www.researchgate.net/publication/321499597_Sucasni_problemi_gidrobiologii_Zaporizke_vodoshovise
Сучасні проблеми гідробіології: Запорізьке водосховище: Довідник/ Федоненко О. В., Єсіпова Н. Б., Шарамок Т. С. та ін. Дніпропетровськ. 2012. С. 151-174. https://www.researchgate.net/publication/321499597_Sucasni_problemi_gidrobiologii_Zaporizke_vodoshovise
- Korzhenevska, P., Marenkov, O., Borovyk, I., & Sondak, V. (2023). Levels of accumulation of heavy metals and activity of radionuclides in narrow-clawed crayfish (*Astacus Leptodactylus* Eschscholtz, 1823) of the Kamianske and Zaporizhzhia (Dnipro) reservoirs. *Ribogospod. nauka Ukr.*, 4(66), 49–68. <https://doi.org/10.61976/fsu2023.04.049> (in Ukrainian)

Kulshrestha, S.K., & Arora, N. (1984). Impairments induced by sublethal doses of two pesticides in the ovaries of a freshwater teleost *Channa striatus* Bloch. *Toxicol Lett*, 20(1), 93–98. [https://doi.org/10.1016/0378-4274\(84\)90189-9](https://doi.org/10.1016/0378-4274(84)90189-9)

Kurchenko, V. O., Marenkov, O. M., & Nesterenko, O. S. (2024). Heavy metal content in organs and tissues of prussian carp of Zaporizhka (Dniprovskye) reservoir. *Ecology and Noospherology*, 35(2), 106–111. <https://doi.org/10.15421/032417> (in Ukrainian)

Курченко В. О., Маренков О. М., Нестеренко О. С. Уміст важких металів в органах та тканинах карася сріблястого Запорізького (Дніпровського) водосховища. *Екологія та ноосферологія*. 2024. Вип. 35, №2. С. 106-111. <https://doi.org/10.15421/032417>

Magar, R. S., & Bias, U. E. (2013). Histopathological impact of malathion on the ovary of the freshwater fish *Channa punctatus*. *International Journal of Environmental Science*, 2(3), 59–61. <https://www.isca.me/IJENS/Archive/v2/i3/12.ISCA-IRJEvS-2012-098.pdf>

Nikolenko, Y. V., & Fedonenko, O. V. (2021). Ecological assessment of the Zaporizhzya (Dnirovsky) reservoir. *Scientific reports of NUBiP of Ukraine*, 4(92). <https://doi.org/dopovidi2021.04.004> (in Ukrainian)

Ніколенко Ю.В., Федоненко О.В. Екологічна оцінка Запорізького (Дніпровського) водосховища. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2021. № 4 (92). <https://doi.org/dopovidi2021.04.004>

Polak-Juszczak, L., & Szlider-Richert, J. (2024). Toxic metals in fishes, mussels, and sediments from the Puck Bay in the southern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 200, 116080. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116080>

Regulations on the Committee on Ethics (Bioethics). (2012). Regulatory document of the Ministry of Education, Science, Youth and Sports of Ukraine. Order dated 19.11.2012, 1287. <https://ips.ligazakon.net/document/MUS19313> (in Ukrainian)

Положення про Комітет з питань етики (біоетики) / (Нормативний документ Міністерства освіти, науки, молоді та спорту України. Наказ від 19.11.2012 No 1287): Нормативно-правова база Міністерства освіти і науки України. <https://ips.ligazakon.net/document/MUS19313>

Shelke Abhay, D. (2014). Study on histopathological changes in the gonads of a freshwater teleost fish, *A. mola* exposed to the heavy metals. *Journal of Global Biosciences*, 3(4), 763–771. [https://doi.org/10.1016/0742-8413\(91\)90160-U](https://doi.org/10.1016/0742-8413(91)90160-U)

Su, L., Li, H., Qiu, N., Wu, Y., Hu, B., Wang, R., Liu, J., & Wang, J. (2023). Effects of cadmium exposure during the breeding period on development and reproductive functions in rare minnow (*Gobiocypris rarus*). *Front. Physiol*, 14, 1163168. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1163168>

Uribe, M. C., García Alarcón, A., De la Rosa Cruz, G., Campuzano Caballero, J. C. (2026). Nutrition During Gestation in 2 Species of Viviparous Fishes (Poeciliidae): *Poecilia latipinna* (Lecithotrophic) and *Heterandria formosa* (Matrotrophic). *Fishes*, 11, 3. <https://doi.org/10.3390/fishes11010003>

Vergilio, C. S., Moreira, R. V., Carvalho, C. E. V., & Melo E. J. T. (2015). Evolution of cadmium effects in the testis and sperm of the tropical fish *Gymnotus carapo*. *Tissue and Cell*, 47(2), 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.tice.2015.02.001>

Wester, P. W., & Canton, H. H. (1992). Histopathological effects in *Poecilia reticulata* (guppy) exposed to methyl mercury chloride. *Toxicol Pathol*, 20(1), 81–92. <https://doi.org/10.1177/019262339202000110>

Wu, G., Gao, L., Zhang, S., Du, D., & Xue, Y. (2023). Effects of copper oxide nanoparticles on reproductive system of zebrafish. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115252. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115252>

Yesipova, N., Sharamok, T., Sklyar, T., Marenkov, O., Gudym, N., & Foroshchuk V. (2023). The hydroecological characteristics of current state of the Zaporizhzhia (Dnipro) reservoir and its tributaries. *Ribogospod. nauka Ukr.*, 4(66). 35–48. <https://doi.org/10.61976/fsu2023.04.035> (in Ukrainian).

Єсіпова Н. Б., Шарамок Т. С., Скляр Т. В., Маренков О. М., Гудим Н. Г., Форошук В. В. Гідроекологічна характеристика сучасного стану Запорізького (Дніпровського) водосховища та його приток. *Ribogospod. nauka Ukr.* 2023. Вип. 4, № 66. С. 35–48. <https://doi.org/10.61976/fsu2023.04.035>

Yön Ertuğ, N. D., Uzun, E., Dinç, T., & Akbulut, C. (2021). Effects of ethylene-bis-dithiocarbamate (Mancozeb) on zebrafish (*Danio rerio*) oocytes. *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.*, 57, 22. <https://doi.org/10.1051/limn/2021017>

Received: 28.02.2026.

Accepted: 17.03.2026.

Published: 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Шарамок Т., Журавльов Д., Тункіна Г. Хронічний вплив важких металів на репродуктивну систему та плодючість *Poecilia reticulata*. *Biota. Human. Technology.* 2026. № 1. С. 81-89. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.7>

Cite this article in APA style as:

Sharamok, T., Zhuravlov, D., & Tunkina, H. (2026). Khronichnyi vplyv vazhkykh metaliv na reproduktsiinu systemu ta plodiuchist *Poecilia reticulata* [The chronic effects of heavy metals on the reproductive system and fertility of *Poecilia reticulata*]. *Biota. Human. Technology*, (1), 81-89. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.7> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Sharamok T. [*in Ukrainian*: Шарамок Т.]¹, PhD (Agricultural Sciences), Assoc. Prof., email: sharamok@i.ua
ORCID: 0000-0003-3523-5283

Department of General Biology and Aquatic Bioresources, Oles Honchar Dnipro National University
72 Nauky Avenue, Dnipro, 49000, Ukraine

Zhuravlov D. [*in Ukrainian*: Журавльов Д.]², PhD student, email: dzhuravlov01@gmail.com
ORCID: 0009-0002-9553-5528

Department of General Biology and Aquatic Bioresources, Oles Honchar Dnipro National University
72 Nauky Avenue, Dnipro, 49000, Ukraine

Tunkina H. [*in Ukrainian*: Тункіна Г.]³, student, email: tunkinaana281@gmail.com
ORCID: 0009-0007-4612-9802

Dnipro Scientific Chemical-Ecological Lyceum of the Dnipro City Council
14B Bohdan Khmelnytskyi Avenue, Dnipro, 49000, Ukraine

¹ Study design, manuscript preparation.

² Data collection, manuscript preparation.

³ Data collection, manuscript preparation.



MAN AND HIS HEALTH
ЛЮДИНА ТА ЇЇ ЗДОРОВ'Я



UDC 546.57:594.3:615.281]:616-001.17

DOI: 10.58407/bht.1.26.8



Copyright (c) 2026 Liudmyla Khrokalo, Uliana Volova, Margaryta Skiba

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Liudmyla Khrokalo, Uliana Volova, Margaryta Skiba

**DEVELOPMENT OF SILVER-SNAIL MUCUS NANOSYSTEM AND
ITS INCORPORATION INTO A MULTIFUNCTIONAL BURN-HEALING CREAM-GEL**

Людмила Хрокало, Уляна Волова, Маргарита Скиба

**РОЗРОБКА НАНОСИСТЕМИ СРІБЛА НА СЛИЗУ РАВЛИКА ТА
ЇЇ ВКЛЮЧЕННЯ ДО МУЛЬТИФУНКЦІОНАЛЬНОГО КРЕМ-ГЕЛЮ
ДЛЯ ЛІКУВАННЯ ОПІКІВ****ABSTRACT**

In recent years, nanotechnology, nanomaterials have been increasingly integrated into dermatological and cosmetic formulations.

Purpose of the work. To develop a silver nanosystem through an eco-friendly one-step reduction of silver nitrate using lyophilized *Cornu aspersum* mucus as a natural reducing and stabilizing agent, and to incorporate the obtained nanosystem into a multifunctional burn-healing cream-gel.

Methodology. The AgNPs-mucus nanosystem was synthesized by mixing aqueous solutions of silver nitrate and mucus reconstituted in water under stirring at 37–40 °C for 1.5 h, followed by incubation at room temperature under natural light for 48 h. The formation of metal nanoparticles was confirmed by the visual color shift and spectroscopically with the detection of SPR peak at 450 nm. Antimicrobial activity was assessed by the agar disk diffusion method against test strains *E. coli*, *B. subtilis*, and *C. albicans*. The obtained nanosystem was incorporated into a cream-gel base formulated with dexpanthenol, allantoin, lidocaine, and vitamin E, and a detailed technological flow scheme for the manufacturing process was developed.

Scientific novelty. *C. aspersum* mucus was employed as a dual-function biogenic agent, enabling green synthesis and stabilization of silver nanoparticles, which were further utilized as an active component of a burn-healing cream-gel. The resulting cream-gel combines the antimicrobial, antioxidant, and regenerative effects of snail mucus with the well-known antibacterial activity of nanosilver.

Conclusions. The developed AgNPs-mucilage system demonstrated high antimicrobial efficacy, especially against Gram-positive bacteria and pathogenic dredges, and the gel composition has stability and skin-protective properties, making it suitable for the treatment of burns.

Key words: AgNPs, *Cornu aspersum* snail mucus, eco-friendly biogenic synthesis, burn-healing cream-gel, antimicrobial activity

АНОТАЦІЯ

В останні роки нанотехнології, наноматеріали все частіше інтегруються в дерматологічні та косметичні рецептури.

Мета роботи. Розробити наносистему срібла шляхом екологічно безпечного одностадійного відновлення нітрату срібла з використанням ліофілізованого слизу равлика *Cornu aspersum* як природного відновника та стабілізатора, а також включити отриману наносистему до складу багатофункціонального крем-гелю для лікування опіків.

Методологія. Наносистема AgNPs-слиз равлика була синтезована шляхом змішування водних розчинів нітрату срібла та слизу, ресуспендованого у воді за температури 37–40 °C та перемішування протягом 1,5 годин, з подальшим витримуванням за кімнатної температури і природного освітлення протягом 48 годин. Утворення металевих наночастинок було підтверджено візуально зміною кольору та спектрометрично з фіксацією піку ППР за 450 нм. Антимікробну активність оцінювали методом диско-дифузійного методу на агарі на тест-культурах *E. coli*, *B. subtilis* та *C. albicans*. Отриману наносистему включили до складу крем-гелю, що містив декспантенол, алантоїн, лідокаїн та вітамін Е, розробили технологічну схему його виробництва.

Наукова новизна. Слиз *C. aspersum* був застосований в якості біологічного агенту подвійної дії, що дозволило здійснити екологічний синтез і стабілізацію наночастинок срібла, які були далі використані як активний компонент крем-гелю для лікування опіків. Отриманий крем-гель поєднує антимікробну, антиоксидантну та регенеративну дію слизу равлика з добре відомою антибактеріальною активністю наносрібла.

Висновки. Розроблена система AgNPs–слиз продемонструвала високу антимікробну ефективність, особливо проти грам-позитивних бактерій та патогенних дріждів, композиція гелю має стабільність та шкірозахисні властивості, що робить його придатним для лікування опіків.

Ключові слова: AgNPs, слиз равлика *Cornu aspersum*, екологічно безпечний біогенний синтез, крем-гель для лікування опіків, антимікробна активність

Problem Statement

In recent years, nanotechnology has been increasingly integrated into dermatological and cosmetic formulations (Barel, 2009; Beyth et al., 2015; Rahman, 2022; Jiang et al., 2024). Among nanomaterials, silver nanoparticles (AgNPs) are recognized as advanced antimicrobial agents with remarkable regenerative and wound-healing properties (Kim et al., 2007; Rigo et al., 2013; Kaya et al., 2025). Numerous studies have demonstrated their ability not only to eliminate pathogenic microorganisms but also to promote keratinocyte proliferation, reduce inflammation, and stimulate granulation tissue formation (Vlachou, 2007; Rai et al., 2012, Rowan, 2015). Burn injuries, particularly second degree wounds, involve complex pathophysiological processes such as inflammation, infection risk, and delayed tissue regeneration (El-Kased, 2017; Jeschke, 2020). The other side, burn injuries cause complex immune-inflammatory responses and severe metabolic disturbances that can lead to multi-organ failure. Burn trauma affects not only physical recovery but also mental health and overall quality of life. Therefore, patients require long-term multidisciplinary care far beyond wound closure to ensure full rehabilitation and well-being. Thus, developing multifunctional topical preparations that combine regenerative, antimicrobial, anti-inflammatory, and analgesic properties is an urgent task for both medicine and cosmetic technology. Analyzing existing formulations, dexpanthenol (Ebner, 2002) and allantoin with (Yazalou, 2024; Ryan, 2017) are recognized as a leading component in burn therapy formulations. AgNPs synthesized from silver nitrate using snail mucus *Cornu aspersa* show a wide range of antimicrobial effects (Todorova, 2025) and have proven to be quite well established in cosmetic products with therapeutic and preventive effects (Khrokalo, 2025).

Purpose of the work

The purpose of this study is to develop a antimicrobial snail mucus–silver nanosystem

(AgNPs-mucus) and incorporate it into a dexpanthenol- and allantoin-based topical cream to enhance second-degree burn healing.

Materials and methods

Synthesis and characterisation of AgNPs-mucus

The lyophilized *Cornu aspersum* snail mucus was obtained directly from the manufacturer EkoStyle snail farm (Kyiv region, Ukraine). As part of a preliminary collaboration with the producer, comprehensive chemical and microbiological analyses were performed (Khrokalo et al., 2022), and an appropriate preservative system was introduced to ensure its suitability for use as an ingredient in medical-grade cosmetic formulations (Khrokalo, 2023). Silver nitrate (AgNO_3 , $\geq 99.8\%$ purity, analytical grade, CAS No. 7761-88-8) was used as a water-soluble crystalline precursor of silver. Lyophilized mucus was reconstituted in distilled water at $36\text{ }^\circ\text{C}$ to prepare 0.1% aqueous solutions. These were mixed with 10 mM AgNO_3 solution in a 1:1 ratio. The reaction mixture was stirred at $37\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}$ for 1.5 hours until a color change occurred, then left at room temperature and under natural light for a total of 48 hours. AgNPs formation was monitored visually by color change and confirmed spectrophotometrically by recording the surface plasmon resonance (SPR) band using Hitachi U-2900 UV-visible spectrophotometer at a spectrum range of $200\text{--}800\text{ nm}$.

Antimicrobial activity was assessed by the agar disk diffusion method on nutrient agar plates (Yadav & Tiwari, 2023). Test cultures included Gram-negative *Escherichia coli* UKM B-906, Gram-positive spore-forming *Bacillus subtilis* UKM B-5006 T, and yeast *Candida albicans* D-6. Before conducting the antimicrobial assay, one-day growth inocula of the test cultures were prepared in meat-peptone broth. Immediately before testing, the inoculum density was adjusted to 0.5 McFarland by dilution with nutrient medium and sterile water. The surface of agar plates in Petri dishes was uniformly inoculated using a sterile swab by the broad-streak method. Pre-sterilized filter paper discs

Ø 5 mm were immersed for several seconds in the AgNPs–mucus solution and then placed on the inoculated agar surface. The plates were incubated at 37 °C, and visual assessment was performed after 1 day and 5 days of incubation, recording the diameters of inhibition zones around the discs.

Formulation development and technological design

Based on literature review (Barel et al, 2009) and patent analysis (Lyshchyshyn, 2001; Ryan, 2017; State Higher Educational Institution, 2019; Tobin & Glaze, 2021) a multifunctional burn-healing cream formulation was developed that integrates the obtained AgNPs–mucus nanosystem as one of an active ingredient. The composition was optimized to combine regenerative, antimicrobial, anti-inflammatory, and analgesic effects through the complex together action of AgNPs, dexpanthenol, allantoin, and lidocaine. A technological scheme for the cream manufacturing process was designed, including sequential stages of aqueous and oil phase preparation, emulsification, homogenization under vacuum, cooling,

and addition of active components at low temperature to preserve their stability and activity.

Results and discussion

Synthesis and characterisation of AgNPs–mucus

The enhanced technological design resulted in the formation of a stable nanosystem, as evidenced by the color transition from colorless to dark violet. This visual change corresponds to the emergence of SPR associated with the collective oscillations of metal-core nanoparticles. Monitoring this phenomenon over time was important, as it reflected the stability of the formed system and allowed prediction of its key technological properties in the prospective product. The absorption spectrum exhibited a distinct SPR peak at 450 nm both 12 and 48 hours after synthesis (Fig. 1). The narrow and symmetrical peak profile indicated uniform particle distribution and efficient stabilization within the nanosystem.

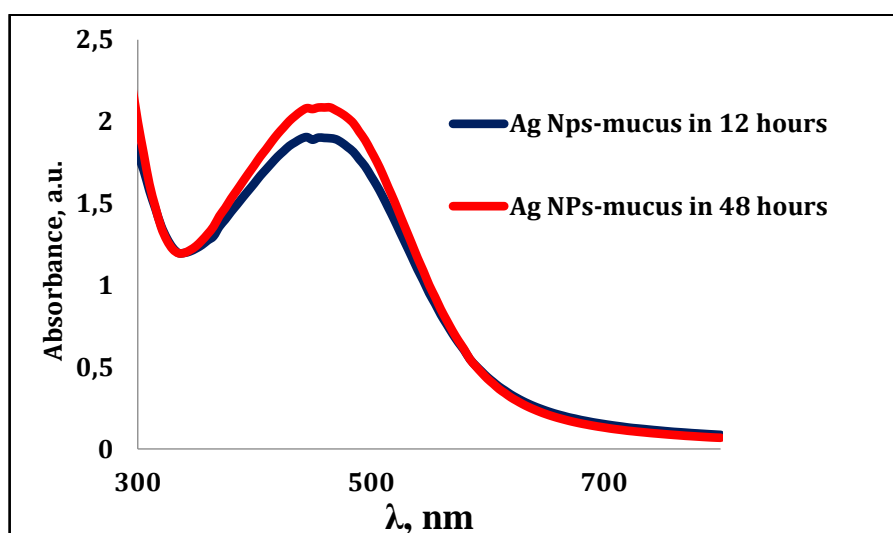


Fig. 1. UV–Vis spectra of AgNPs–mucus at 12 h and 48 h post-synthesis

The evaluation of antimicrobial properties against Gram-positive and Gram-negative bacteria, as well as opportunistic yeasts, represents a crucial biological characteristic of the developed nanosystem. Such assessment is essential, as the nanosystem functions as one of the active components of the after-burn healing cream-gel, contributing to its therapeutic

efficacy. Demonstrating broad-spectrum antimicrobial activity confirms not only the biocompatibility and functional stability of the nanosystem but also its potential to prevent microbial contamination and secondary infection in damaged skin tissue, thereby accelerating wound recovery. The Petri dishes were visually inspected after 24 hours and after

5 days of incubation to assess the development of inhibition zones around the discs. The formation of a clear, transparent inhibition zone around the discs was indicative of bactericidal activity, while the appearance of a turbid yet distinct zone denoted bacteriostatic action, reflecting temporary inhibition of microbial growth with subsequent recovery. The results of the antibacterial assay are shown in Figure 2. The growth of the *E. coli* was inhibited by the AgNPs–mucus complex (zones of inhibition being 3 mm), its effect on the gram-positive

bacterium *B. subtilis* was via zones of inhibition being 6 mm) and yeast *C. albicans* – 5 mm. Thus, AgNPs–mucus system exhibited the greatest inhibitory effect against the Gram-positive bacterium *B. subtilis* and yeast *C. albicans*, indicating that the nanosystem is also effective against eukaryotic fungal cells, likely through membrane disruption and oxidative stress induction. In contrast, the Gram-negative bacterium *E. coli* showed the lowest sensitivity to the formulation.

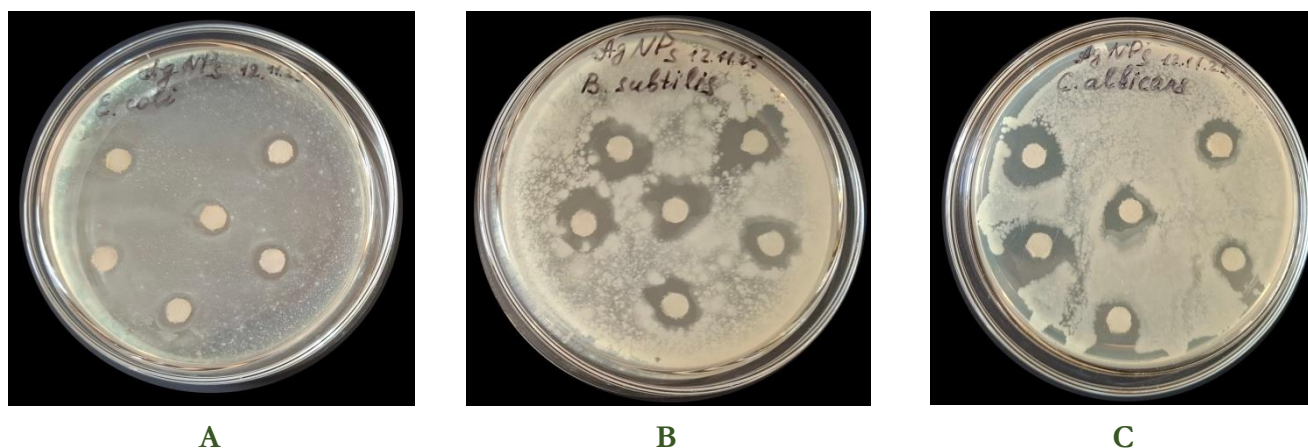


Fig. 2. Antimicrobial effect of AgNPs–mucus against *E. coli* (A), *B. subtilis* (B), and *C. albicans* (C) as evidenced by inhibition zone diameters

Formulation development and technological design

The developed formulation represents a balanced oil-in-water emulsion. The aqueous phase, containing demineralized water, glycerin, and carbomer, provides hydration, viscosity, and structural stability of the cream-gel matrix. The oil phase, composed of vaseline oil, almond oil, and shea butter, ensures emollient and nourishing properties, forming a protective lipid film that prevents transepidermal water loss. The inclusion of dexpanthenol and allantoin contributes to epithelial repair and anti-inflammatory effect. Lidocaine hydrochloride provides local analgesic action, which is crucial in burn therapy. The novel ingredient AgNPs–mucus exhibits multifunctional activity with strong antimicrobial and regenerative potential. Tocopherol serves as an antioxidant stabilizer of both the formulation and biological membranes, while phenoxyethanol and benzyl alcohol maintain microbiological purity and product safety during storage. The full

formulation of the developed cream-gel is summarized in Table 1.

The manufacturing process involved sequential preparation of the aqueous and oil phases, their emulsification followed by cooling, and finally incorporation of active ingredients (Fig. 3). At the initial stage, purified demineralized water and disodium EDTA were loaded into reactor No. 1 equipped with a propeller stirrer and a thermostated jacket. Under continuous agitation, carbomer was slowly dispersed, followed by the addition of glycerin and allantoin at 70 °C until a uniform gel-like mass was obtained. Dexpanthenol and lidocaine hydrochloride were introduced last into the aqueous phase, and the mixture was stirred for several additional minutes before heating was switched off. The prepared aqueous phase was then transferred by pump 2 into collector 3 for preliminary cooling to approximately 25 °C.

In parallel, the oil phase was prepared in melting boiler No. 4 by introducing vaseline oil,

shea butter, almond oil, and the emulsifiers cetyl alcohol and polysorbate 80. The components were heated to 50 °C, after which the pre-cooled

aqueous phase was gradually introduced into the main reactor via pump 5.

Table 1

Composition of the burn-healing cream-gel formulation

No	Component	INCI name	% of mass	Action in product
Phase A (water phase)				
1	Demineralized water	Aqua	59-66 (up to 100)	Main solvent, hydratation
2	Glycerin	Glycerin	4.0-4.5	Humectant, moisture retention
3	Carbomer	Carbomer	0.5-0.8	Thickener, stabilizer
4	Lidocaine	Lidocaine Hydrochloride	1.5-2.0	Local anesthetic
5	Allantoin	Allantoin	0.5-1.0	Soothing, anti-inflammatory
6	Disodium EDTA	Disodium EDTA	0.03-0.05	Chelating agent, improves carbomer stability, enhances preservative efficacy
Phase B (oil phase)				
7	Vaseline oil	Paraffinum Liquidum	5.5-6.0	Emollient, skin protection
8	Almond oil	Prunus Amygdalus Dulcis Oil	5.5-6.0	Nourishing and softening
9	Shea butter	Butyrospermum Parkii Butter	3-3.5	Moisturizing, nourishing
10	Cetyl alcohol	Cetyl alcohol	3.5-4.0	Co-emulsifier and consistency enhancer
11	Polysorbate 80	Polysorbate 80	2.5-3.0	Emulsifier
Phase C (active phase)				
12	Dexpanthenol	Panthenol	3.5-4.5	Regeneration, epithelial repair
13	AgNPs-mucus	Silver (and) Snail Secretion Filtrate	0.5-1.0	Antibacterial, regenerative
14	Vitamin E	Tocopherol	0.2-0.3	Antioxidant
15	Phenoxyethanol	Phenoxyethanol	0.5-0.6	Preservative
16	Benzyl alcohol	Benzyl alcohol	0.2-0.3	Preservative

Upon combination of the two phases, a high-shear homogenizer operating at 3 000 rpm and a vacuum pump 8 were activated to promote emulsification and prevent air entrainment. After complete emulsification, both the vacuum and homogenizer were turned off, and cooling water was circulated through the reactor jacket to reduce the product temperature below 30 °C.

During the final stage of manufacturing (at temperatures below 30 °C), the active components were added sequentially: the antioxidant

vitamin E, the AgNPs–mucus nanosystem, and the preservatives phenoxyethanol and benzyl alcohol. To ensure uniform dispersion of the actives throughout the formulation, the homogenizer was restarted at a reduced speed of approximately 500 rpm. After final mixing, the homogenizer and stirrer were stopped, and a representative sample of the cream-gel was sent for quality control. Following a positive evaluation, the finished product was transferred to collection tank 9 and subsequently to the packaging line.

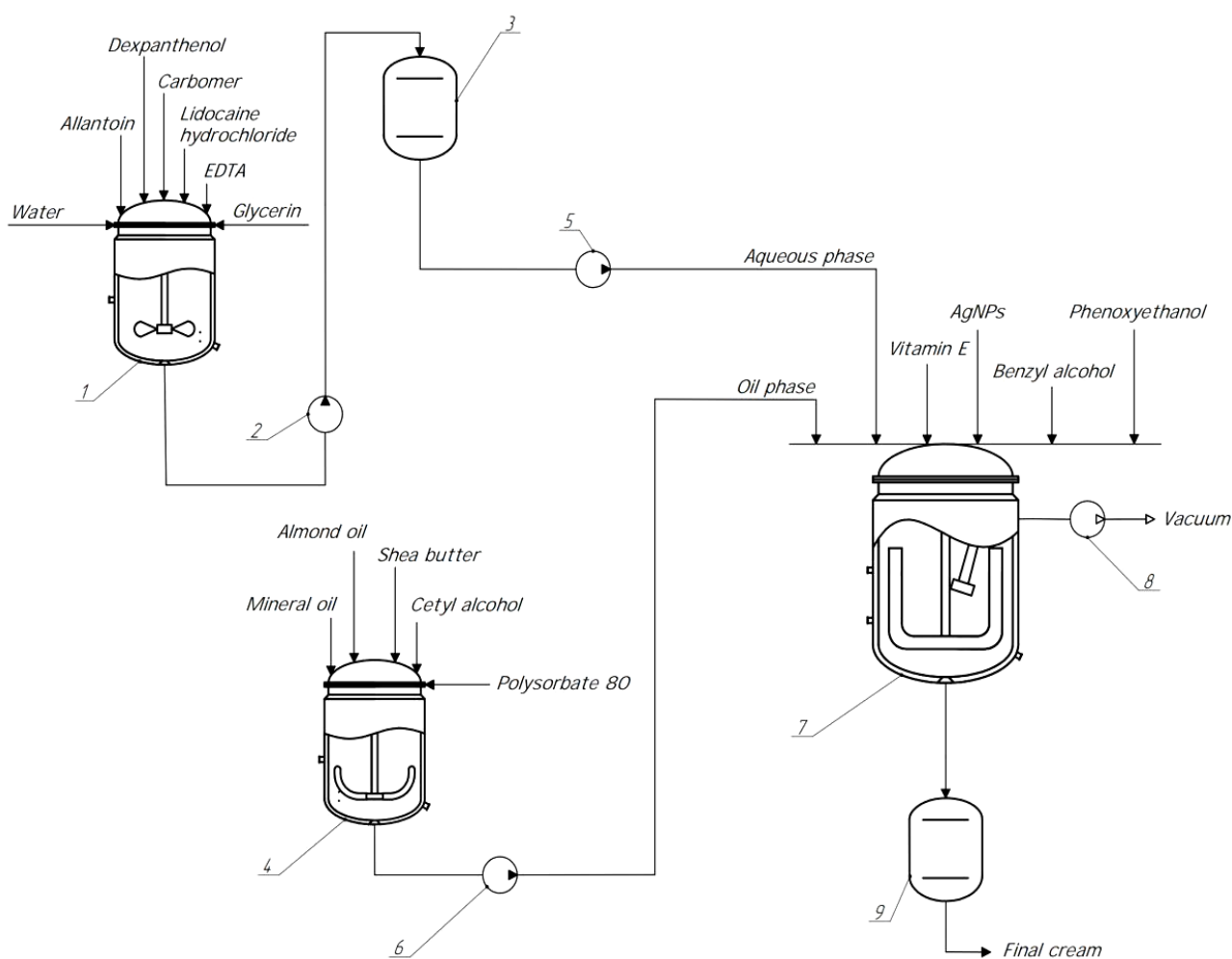


Fig. 3. Technological flow diagram illustrating the manufacturing process of the burn-healing cream-gel

Conclusions

AgNPs-mucus synthesized and stabilized by *C. aspersum* snail mucus was successfully incorporated into a multifunctional burn-healing cream-gel. The nanosystem exhibited stable optical characteristics, confirming the formation of well-dispersed, uniformly sized nanoparticles suitable for topical application. The developed formulation represents a synergistic integration of nanotechnology and natural bioactive ingredients, combining regenerative, antimicrobial, and antioxidant effects essential for effective burn treatment. The novelty of this study lies in the utilization of *C. aspersum* mucus as both a natural reducing and stabilizing agent, ensuring an environmentally friendly and biocompatible synthesis route. The resulting AgNPs-mucus nanosystem merges the biological activity of snail mucus

with the broad-spectrum antibacterial efficacy of silver, enhancing the therapeutic potential of the cream-gel matrix. Overall, the optimized composition provides a stable and homogeneous emulsion with moisturizing, protective, and antimicrobial properties that support rapid skin regeneration and protection against secondary infection. The findings highlight the potential of AgNPs-mucus biogenic nanosystems as innovative active components for advanced dermal formulations in burn care and regenerative. The AgNPs-mucus nanosystem exhibited superior antimicrobial activity against Gram-positive bacteria and yeast-like fungi, a finding of particular clinical relevance given that these microbial groups constitute the predominant pathogenic flora colonizing compromised skin barriers, including burn wounds.

Funding / Фінансування

This study did not receive external funding / Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Data Availability Statement / Заява про доступність даних

Dataset available on request from the authors / Набір даних доступний за запитом до авторів.

Institutional Review Board Statement / Заява інституційної ревізійної ради

Not applicable / Не застосовується.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Not applicable / Не застосовується.

Conflict of interest / Конфлікт інтересів

The authors declare no conflict of interest / Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process / Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання

This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data / У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних.

References

- Barel, A., Paye, M., & Maibach, H. I. (Eds.). (2009). Handbook of cosmetic science and technology (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16716>
- Beyth, N., Hourri-Haddad, Y., Domb, A., Khan, W., & Hazan, R. (2015). Alternative antimicrobial approach: Nano-antimicrobial materials. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2015, 246012. <https://doi.org/10.1155/2015/246012>
- Ebner, F., Heller, A., Rippke, F., & Tausch, I. (2002). Topical use of dexpanthenol in skin disorders. *American Journal of Clinical Dermatology*, 3(6), 427–433. <https://doi.org/10.2165/00128071-200203060-00005>
- El-Kased, R. F., Amer, R. I., Attia, D., & Elmazar, M. M. (2017). Honey-based hydrogel: In vitro and comparative *in vivo* evaluation for burn wound healing. *Scientific Reports*, 7, 9692. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08990-1>
- Jiang, H., Li, L., Li, Z., & Chu, X. (2024). Metal-based nanoparticles in antibacterial application in biomedical field: Current development and potential mechanisms. *Biomedical Microdevices*, 26(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s10544-023-00686-8>
- Jeschke, M. G., van Baar, M. E., Choudhry, M. A., Chung, K. K., Gibran, N. S., & Logsetty, S. (2020). Burn injury. *Nature Reviews Disease Primers*, 6(1), 11. <https://doi.org/10.1038/s41572-020-0145-5>
- Kaya, M., Akdaşci, E., Eker, F., Bechelany, M., & Karav, S. (2025). Recent Advances of Silver Nanoparticles in Wound Healing: Evaluation of In Vivo and In Vitro Studies. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(20), 9889. <https://doi.org/10.3390/ijms26209889>

Kim, J. S., Kuk, E., Yu, K. N., Kim, J. H., Park, S. J., Lee, H. J., Kim, S. H., Park, Y. K., Park, Y. H., Hwang, C.-Y., Kim, Y.-K., Lee, Y.-S., Jeong, D. H., & Cho, M.-H. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 3(1), 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2006.12.001>

Khrokalo, L., Chyhyrynets, O., Salitra, N. (2022) Chemical properties of *Helix aspersa* mucus as a component of cosmetics and pharmaceutical products. *Materials Today: Proceedings*, 62(15), 7650–7653. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.217>

Khrokalo L. A. (2023) Testing of bacterial filters and preservatives for quality assurance of lyophilized snail mucus as a cosmetic component. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 3, 229–233. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-321-3-229-233>

Khrokalo, L. A., Kulyk, A. D., Vorobiova, V. I., & Andriishyn, V. M. (2025). Synthesis of nanosystem based on silver nitrate and Cornu aspersum mucus and its application in after-shave gel cream. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Chemistry and Chemical Technology*, 1(13), 62–66. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2025.01.09> (in Ukrainian)

Хрокало Л. А., Кулик А. Д., Воробйова В. І., Андріішин В. М. Синтез наносистеми на основі нітрату срібла та слизу равлика *Cornu aspersum* та її застосування в складі крем-гелю після гоління. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Хімія та хімічна технологія*. 2025. №1(13). С. 62–66. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2025.01.09>

Lyshchyshyn, O. I. (2001). Bandage for treatment of burns . *Patent No. UA 40940 A. Ukrainian Intellectual Property Institute*. Application No. 2000116678. Filing date: November 24, 2000. Publication date: August 15, 2001, Bulletin No. 7/2001. (in Ukrainian) <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1396016/>

Лищишин О. І. Пов'язка для лікування опіків: пат. UA 40940 А. Заявл. № 2000116678; заявл. 24.11.2000; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7/2001. 1 с. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1396016/>

Rai, M., Deshmukh, S. D., Ingle, A. P., & Gade, A. K. (2012). Silver nanoparticles: The powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 112(5), 841–852. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05253.x>

Rahman, L., Asif, S., Ullah, A., Khan, W. S., & Rehman, A. (2022). Biofunctionalized Nano—antimicrobials--Progress, Prospects and Challenges. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 22(13), 1046–1067. <https://doi.org/10.2174/1568026622666211227151743>

Rigo, C., Ferroni, L., Tocco, I., Roman, M., Munivrana, I., Gardin, C., Cairns, W. R. L., Vindigni, V., & Zavan, B. (2013). Active silver nanoparticles for wound healing. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(3), 4817–4840. <https://doi.org/10.3390/ijms14034817>

Rowan, M. P., Cancio, L. C., Elster, E. A., Burmeister, D. M., Rose, L. F., Natesan, S., Chan, R. K., Christy, R. J., & Chung, K. K. (2015). Burn wound healing and treatment: Review and advancements. *Critical Care*, 19, 243. <https://doi.org/10.1186/s13054-015-0961-2>

Ryan, R. (2017). Methods for treating burns using allantoin. *U.S. Patent Application No. US 2017/0049749 A1. U.S. Patent and Trademark Office*. Scioderm, Inc. Filing date: February 13, 2015. Publication date: February 23, 2017. <https://patentimages.storage.googleapis.com/a2/19/38/27221ceca348fa/US20170049749A1.pdf>

State Higher Educational Institution «Ternopil State Medical University named after I.Ya. Horbachevsky of the Ministry of Health of Ukraine». (2019). Pharmaceutical composition in the form of a topical gel for local treatment of burns. *Patent UA 138600 U. Ukrainian Intellectual Property Institute*. Application No. u201904143. Filing date: April 18, 2019. Publication date: December 10, 2019, Bulletin No. 23. (in Ukrainian). <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1396016/>

Державний вищий навчальний заклад «Тернопільський державний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України». Фармацевтична композиція у формі гелю нашкірного для місцевого лікування опіків: пат. на корисну модель UA 138600 U. Заявл. № u201904143; заявл. 18.04.2019; опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23. 1 с. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1396016/>

Tobin, G., & Glaze, G. (2021). Methods and compositions for treatment of burns, joint pain, and fungal infections. U.S. Patent Application No. US 2021/0322458 A1. U.S. Patent and Trademark Office. Filing date: April 20, 2021. Publication date: October 21, 2021. <https://patentimages.storage.googleapis.com/ce/ad/e1/2572d72e0f8574/US20210322458A1.pdf>

Todorova, M., Petrova, V., Rangelov, B., Avdeev, G., Velkova, L., Atanasova-Vladimirova, S., Aleksandrov, L., & Dolashka, P. (2025). Green synthesis of antimicrobial silver nanoparticles (AgNPs) from the mucus of the garden snail *Cornu aspersum*. *Molecules*, 30(10), 2150. <https://doi.org/10.3390/molecules30102150>

Vlachou, E., Chipp, E., Shale, E., Wilson, Y. T., Papini, R., & Moiemmen, N. S. (2007). The safety of nanocrystalline silver dressings on burns: a study of systemic silver absorption. *Burns*, 33(8), 979-985. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2007.07.014>

Yadav, M.K., Tiwari, S.K. (2023). Methods for Determination of Antimicrobial Activity of Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria. *Microbiology*, 92, 745-765. <https://doi.org/10.1134/S0026261723600520>

Yazalou, O., Mousanejad, J., Hasanpour, M., & Ebrahimnejad, A. (2024). Comparison of the Efficacy of Hydrogel-Based Wound Dressing Containing Allantoin and Silver Nanoparticles in the Treatment of Second-Degree Burn Wounds. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 34(232), 1-11. <https://jmums.mazums.ac.ir/article-1-20468-en.html>

Received: 20.11.2025. **Accepted:** 26.12.2025. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Khrokalo L., Volova U., Skiba M. Development of silver-snail mucus nanosystem and its incorporation into a multifunctional burn-healing cream-gel. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. P. 91-99. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.8>

Cite this article in APA style as:

Khrokalo, L., Volova, U., & Skiba, M. (2026). Development of silver-snail mucus nanosystem and its incorporation into a multifunctional burn-healing cream-gel. *Biota. Human. Technology*, (1), 91-99. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.8>

Information about the authors:

Khrokalo L. [*in Ukrainian*: Хрокало Л.] ¹, PhD (Biology), Assoc. Prof., e-mail: lkhrokalo@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4334-6629 Scopus Author ID: 56534070400 ResearcherID: J-6560-2017
Physical Chemistry Department, Chemical Technology Faculty, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine

Volova U. [*in Ukrainian*: Волова У.] ², Student, e-mail: ulyanavolovahd11@gmail.com
ORCID: 0009-0000-1397-809X
Physical Chemistry Department, Chemical Technology Faculty, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine

Skiba M. [*in Ukrainian*: Скиба М.] ³, D.Sc. (Technical Sciences), Prof., email: Margaritaskiba88@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4634-280 Scopus Author ID: 57198771281
Department of Inorganic Substances and Ecology, Ukrainian State University of Science and Technologies
8 Prospect Nauky, Dnipro, 49005, Ukraine

¹ Study design, data collection, analysis, manuscript preparations.

² Data collection, manuscript preparation.

³ Data collection.

UDC 502/504:614:615.477.7

DOI: 10.58407/bht.1.26.9



Copyright (c) 2026 Nataliia Tkachuk, Liubov Zelena, Ivan Shkardybarda, Dmytro Nikolaienko, Nataliia Demchenko

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**Nataliia Tkachuk, Liubov Zelena, Ivan Shkardybarda,
Dmytro Nikolaienko, Nataliia Demchenko**

**SANITARY-HYGIENIC, CLINICAL-IMMUNOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL RISKS
OF WET WIPES IN PUBLIC HEALTH CONTEXT**



**Наталія Ткачук, Любов Зелена, Іван Шкардибарда,
Дмитро Ніколаєнко, Наталія Демченко**

**САНИТАРНО-ГІГІЄНИЧНІ, КЛІНІКО-ІМУНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ
ВОЛОГИХ СЕРВЕТОК У КОНТЕКСТІ ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я**

ABSTRACT

The aim of the study was to review the literature on the biomedical and environmental risks associated with the use of wet wipes in the context of public health.

Methodology. This study included a bibliometric study to examine the global dynamics of research on wet wipes. Relevant publications were retrieved from two major bibliographic databases: Scopus and the Science Citation Index Expanded (SCI-Expanded) in the Web of Science (WoS). The study of bibliometric relationships was conducted using VOSviewer (version 1.6.20). Along with the bibliometric analysis, a review of a wide range of publicly available online sources covering relevant issues was conducted.

Scientific novelty. It is shown that the quality of wet wipes and their consumption by the population can determine such indicators of population health as environmental, medical and sanitary, social and behavioral. The article systematically presents information on various aspects of the issue of biomedical and environmental risks of both new and used wet wipes, including their sanitary-hygienic, clinical-immunological and environmental characteristics, as well as social aspects in the context of public health. The primary focus is on pathogenic indicator microorganisms as potential threats to human health, as well as the environmental issues arising from pollution caused by this hygiene product.

Conclusions. Based on a bibliometric review of the literature and available studies, the human health and environmental risks linked to wet wipe use were thoroughly analyzed. In general, the quality of wet wipes and their consumption by the population can determine such public health indicators as environmental, medical and sanitary, social and behavioural. Microbiological and environmental parameters that determine the safety of wet wipes for public health have become the subject of comprehensive scientific analysis. The study emphasizes pathogenic indicator microorganisms as potential health hazards and considers the environmental impact of pollution caused by this hygiene product. However, socio-pedagogical approaches aimed at forming a responsible attitude towards the use and proper disposal of wet wipes remain underdeveloped and not systematic. Future research should focus on:

- further exploring the microbial diversity of hygiene products, considering both harmful microorganisms and potential biodegraders;
- search for eco- and bio-safe materials and solutions for wetting wet wipes;
- shaping the behaviour of responsible use and consumption of wet wipes.

Key words: environmental risks, microbiological characteristics, clinical-immunological risks, sanitary-hygienic risks, public health, social aspects, wet wipes

АНОТАЦІЯ

Метою дослідження було проаналізувати літературу щодо біомедичних та екологічних ризиків, пов'язаних з використанням вологих серветок у контексті громадського здоров'я.

Методологія. Це дослідження включало бібліометричне дослідження для вивчення глобальної динаміки досліджень вологих серветок. Відповідні публікації були отримані з двох основних бібліографічних баз даних: Scopus та Science Citation Index Expanded (SCI-Expanded) у Web of Science (WoS). Дослідження бібліометричних зв'язків було проведено за допомогою VOSviewer (версія 1.6.20). Поряд з бібліометричним аналізом було проведено огляд широкого кола загальнодоступних онлайн-джерел, що охоплюють відповідні питання.

Наукова новизна. Показано, що якість вологих серветок та їх споживання населенням можуть визначати такі показники здоров'я населення, як екологічні, медико-санітарні, соціальні та поведінкові. У статті систематично викладено інформацію з різних аспектів питань біомедичних та екологічних ризиків як нових, так і вживаних вологих серветок, включаючи їх санітарно-гігієнічні, клініко-імунологічні та екологічні характеристики, а також соціальні аспекти в контексті охорони здоров'я населення. Основна увага приділяється патогенним індикаторним мікроорганізмам як потенційним загрозам для здоров'я людини, а також екологічним проблемам, що виникають внаслідок забруднення, спричиненого цим гігієнічним засобом.

Висновки. На основі бібліометричного огляду літератури та доступних досліджень було ретельно проаналізовано ризики для здоров'я людини та навколишнього середовища, пов'язані з використанням вологих серветок. Загалом, якість вологих серветок та їх споживання населенням можуть визначати такі показники громадського здоров'я, як екологічні, медико-санітарні, соціальні та поведінкові. Мікробіологічні та екологічні параметри, що визначають безпеку вологих серветок для громадського здоров'я, стали предметом комплексного наукового аналізу. У дослідженні наголошується на патогенних індикаторних мікроорганізмах як потенційній небезпеці для здоров'я та розглядається вплив забруднення навколишнього середовища, спричиненого цим гігієнічним засобом. Однак соціально-педагогічні підходи, спрямовані на формування відповідального ставлення до використання та належної утилізації вологих серветок, залишаються недостатньо розробленими та несистематизованими. Подальші дослідження мають бути зосереджені на:

- подальшому вивченні мікробного різноманіття гігієнічних засобів, враховуючи як шкідливі мікроорганізми, так і потенційні біодеградатори;
- пошуку екологічно- та біобезпечних матеріалів і рішень для змочування вологих серветок;
- формуванні поведінки відповідального використання та споживання вологих серветок.

Ключові слова: екологічні ризики, мікробіологічні характеристики, клініко-імунологічні ризики, санітарно-гігієнічні ризики, громадське здоров'я, соціальні аспекти, вологі серветки

Introduction

Modern global challenges in the field of health care and sustainable development require a comprehensive approach, which is reflected in an important approach to ensuring public health - the concept of "One World - One Health" (WHO, 2022). The basis of this concept is the close interrelationship, interdependence, and mutual influence of human, animal, and environmental health (WHO, 2022). From this perspective, the biological and ecological safety of daily hygiene products is important for preserving human health and the environment (Khalid & Abdollahi, 2021; Lin, 2023).

In the last decade, people have increasingly used wet wipes for medical purposes and in everyday life (Ramya & Amutha, 2021). Cotton and viscose are used to produce wet wipes, as well as plastics such as polyester, polyethylene, and polypropylene (Environmental and economic costs..., n.d.). More expensive wet wipes are made from spunlace and airlaid, and cheaper wet wipes are made from spunbond, hibond, and thermobond (Kyrychenko et al., 2020). Nonwoven wet wipes (bleached cellulose, unbleached cellulose, and low-yield soluble cellulose) were shown to have increased resistance to disintegration, but their tensile strength and disintegration energy remained unchanged (Harter et al., 2022). Sular and Keçeci (2021) reported that the degradation of wet wipes decreased in cases with

increasing polyethylene terephthalate content, and conversely, with an increase in cellulose fiber content, the level of degradation increased.

In general, the problem of environmental pollution by hygiene products, in particular, wet wipes, is acute (Environmental and economic costs..., n.d.; Bondaroff & Cooke, 2020; Allison et al., 2023), notably because they serve as a source of microplastics in the environment (Ó Briain et al., 2020). Solving this problem should be considered using a biotechnological approach - bioremediation using destructor microorganisms as an environmentally friendly method (Lumio et al., 2021; Cao et al., 2022). The growth and development of microorganisms on the surfaces of materials found in the natural environment (soil, water) occurs in the form of a biofilm, and its microbial diversity affects the processes of biodegradation of these materials (Khalid & Elsherif, 2022; Khan et al., 2023). In addition, the issue of antimicrobial properties of wet wipes is important, which should be considered from the angle of antibiotic resistance of microorganisms, since such a group can either be removed when using effective agents (Song et al., 2019; Angulo-Pineda et al., 2025), or spread when using ineffective agents (Cardiff University, 2008; Cheng et al., 2011). Consequently, this study aimed to review the literature on the biomedical and environmental risks associated with the use of wet wipes in the context of public health.

The article is a literature review containing a systematic summary of information on various aspects of the issue of bio- and ecosafety of both new and used wet wipes, including their antibacterial properties, microbiological and environmental characteristics, as well as social aspects in the context of public health.

Materials and methods

This study included a bibliometric study to examine the global dynamics of research on wet wipes. Relevant literature was collected from two leading bibliographic databases, Scopus and the Science Citation Index Expanded (SCI-Expanded) within Web of Science (WoS). Searches covered publications from 1970 to 2025. The search query included the keywords «wet wipes», which ensured comprehensive coverage of research in this area. The bibliometric analysis of relationships was performed using VOSviewer (version 1.6.20) (VOSviewer, n.d.). The following bibliometric indicators were analysed in the final list of publications: types of documents; keywords in the documents; top cited articles; authorship analysis; top

productive countries; international collaboration; top productive institutions/organizations; and preferred journals for publications. Along with the bibliometric analysis, a review of a wide range of publicly available online sources covering the relevant issues was conducted. The study used a number of methods, including general scientific (theoretical analysis of available information), analytical and generalizing (for processing literary sources on the researched issues), empirical (for collecting factual data), and argumentative (for substantiating the proposed positions).

Results and Discussion

A bibliometric review

Among the types of publications on wet wipes, articles prevailed (83.6 %) (Fig. 1). A significantly lower proportion of documents were Proceeding Papers (8.4 %), Editorial Materials, and Review Articles (3.1 % each). Other types of publications ranged from 0.6 % (Early Access) and 0.4 % (Letter) to 0.2 % (Correction, Meeting Abstract, News Item, Poetry) (Fig. 1).

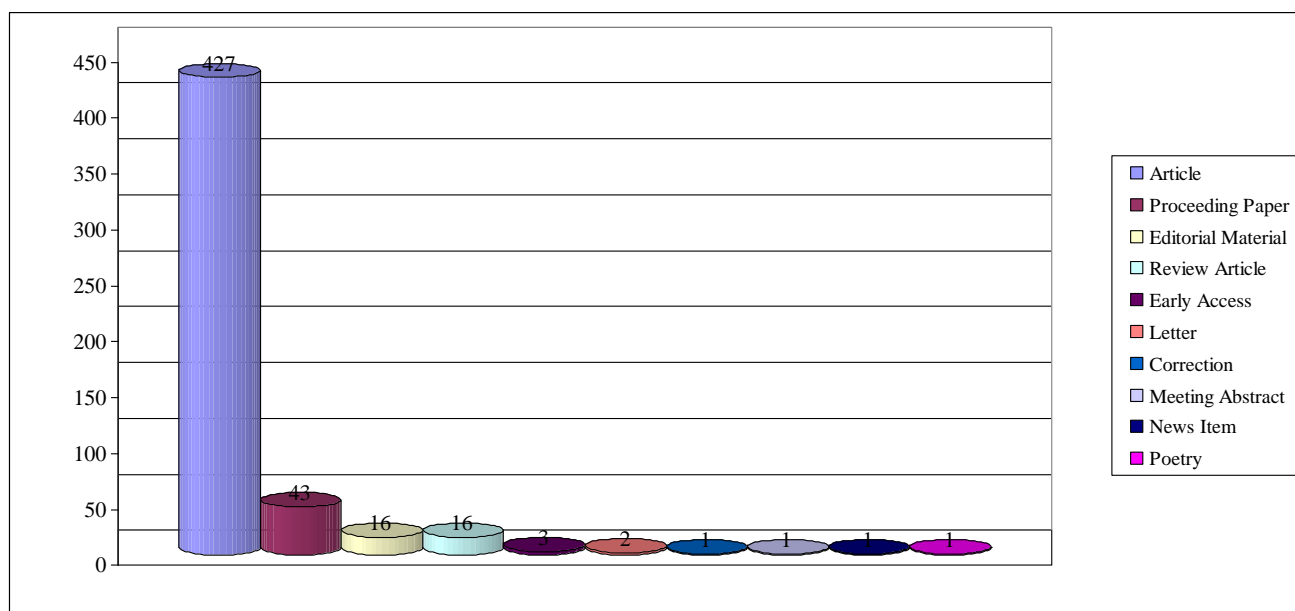


Fig. 1. Types of publications regarding wet wipes

During the years 1978-1985, only 3 publications on wet wipes were published (Fig. 2). From 1987 to 1994, the number of publications increased slightly, and from 1996

it increased to 4-6 publications per year. From 2006 onwards, there has been a notable increase in publications, with the highest count observed in 2021 at 42 (Fig. 2).

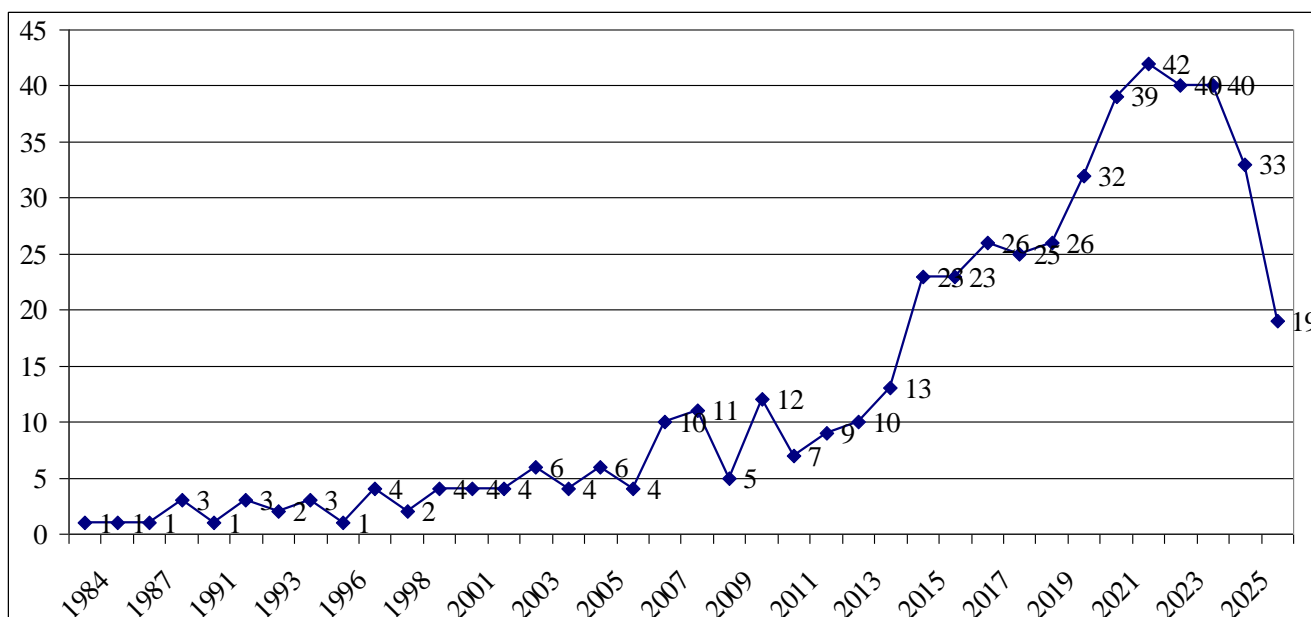


Fig. 2. Annual number of publications on wet wipes

Classification of the published articles by research area reveals the predominance of the following categories: Medical & Health Sciences (191 articles), Environmental & Earth Sciences

(176 articles), Chemistry & Materials Sciences (166 articles) (Fig. 3).

In addition, the distribution of articles by these and other categories is presented in Table 1.

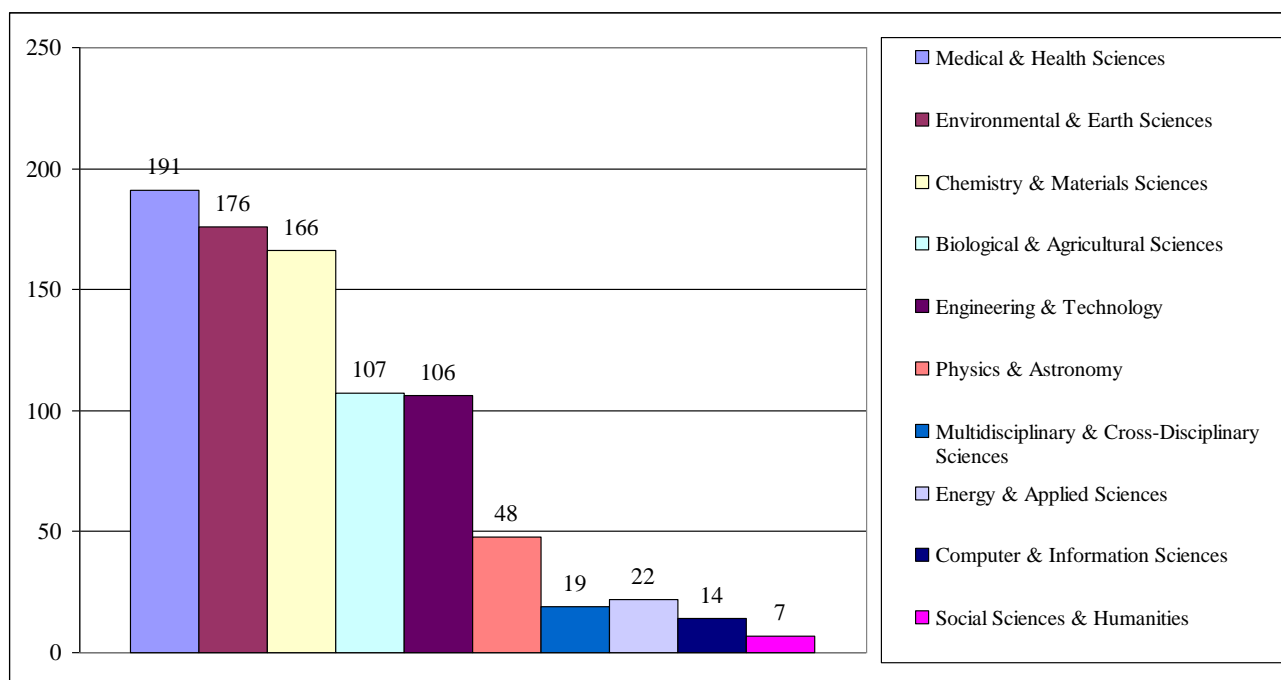


Fig. 3. Representation of key research areas in studies on wet wipes

Table 1

Distribution of retrieved publications by category and subcategory

Categories	Subcategories	Number of publications
1	2	3
Environmental & Earth Sciences	Environmental Sciences	93
	Environmental Studies	2
	Public Environmental Occupational Health	54
	Green Sustainable Science Technology	5
	Water Resources	11
	Meteorology Atmospheric Sciences	3
	Geosciences Multidisciplinary	3
	Biodiversity Conservation	3
	Ecology	1
	Geography Physical	1
	<i>Total</i>	176
Chemistry & Materials Sciences	Chemistry Analytical	19
	Chemistry Applied	9
	Chemistry Multidisciplinary	19
	Chemistry Medicinal	1
	Chemistry Physical	18
	Materials Science Multidisciplinary	33
	Materials Science Textiles	19
	Materials Science Coatings Films	6
	Materials Science Composites	2
	Materials Science Ceramics	1
	Polymer Science	20
	Spectroscopy	6
	Electrochemistry	2
Nanoscience Nanotechnology	11	
	<i>Total</i>	166
Biological & Agricultural Sciences	Biology	4
	Biochemistry Molecular Biology	7
	Microbiology	20
	Biotechnology Applied Microbiology	19
	Genetics Heredity	1
	Plant Sciences	3
	Agriculture Dairy Animal Science	5
	Agronomy	5
	Agriculture Multidisciplinary	3
	Veterinary Sciences	7
	Forestry	5
	Zoology	2
	Entomology	2
	Food Science Technology	20
Marine Freshwater Biology	4	
	<i>Total</i>	107

Continuation of Table 1

1	2	3
Medical & Health Sciences	Medicine General Internal	6
	Infectious Diseases	20
	Tropical Medicine	2
	Dermatology	55
	Pediatrics	17
	Surgery	2
	Obstetrics Gynaecology	2
	Radiology Nuclear Medicine Medical Imaging	4
	Dentistry Oral Surgery Medicine	2
	Nursing	6
	Health Care Sciences Services	2
	Health Policy Services	1
	Immunology	6
	Virology	2
	Allergy	21
	Toxicology	16
	Pharmacology Pharmacy	11
	Medicine Legal	6
Gastroenterology Hepatology	2	
Ophthalmology	8	
<i>Total</i>	<i>191</i>	
Engineering & Technology	Engineering Environmental	31
	Engineering Chemical	22
	Engineering Electrical Electronic	9
	Engineering Mechanical	9
	Engineering Multidisciplinary	8
	Engineering Civil	4
	Engineering Biomedical	6
	Engineering Aerospace	5
	Engineering Manufacturing	6
	Engineering Geological	1
	Engineering Industrial	1
	Construction Building Technology	4
<i>Total</i>	<i>106</i>	
Physics & Astronomy	Physics Applied Physics	19
	Condensed Matter	10
	Physics Atomic Molecular Chemical	3
	Physics Fluids Plasmas	2
	Optics	3
	Astronomy Astrophysics	4
	Nuclear Science Technology	5
	Mechanics	2
<i>Total</i>	<i>48</i>	
Computer & Information Sciences	Computer Science Artificial Intelligence	2
	Computer Science Information Systems	2
	Computer Science Software Engineering	2
	Computer Science Theory Methods	2
	Computer Science Interdisciplinary Applications	1
	Information Science Library Science	1
	Instruments Instrumentation	4
<i>Total</i>	<i>14</i>	

Continuation of Table 1

1	2	3
Social Sciences & Humanities	Education Scientific Disciplines	1
	History Philosophy of Science	1
	Literary Reviews	1
	Asian Studies	1
	Agricultural Economics Policy	1
	Ergonomics	1
	Architecture	1
	<i>Total</i>	7
Multidisciplinary & Cross-Disciplinary Sciences	Multidisciplinary Sciences	10
	Cell Tissue Engineering	3
	Biochemical Research Methods	5
	Imaging Science Photographic Technology	1
	<i>Total</i>	19
Energy & Applied Sciences	Energy Fuels	6
	Metallurgy Metallurgical Engineering	6
	Materials Science Paper Wood	10
	<i>Total</i>	22

Authors from the USA and China have the largest number of publications (Fig. 4).

Medical, environmental, and technical journals are the most prominent among those publishing articles on wet wipes. (Fig. 5).

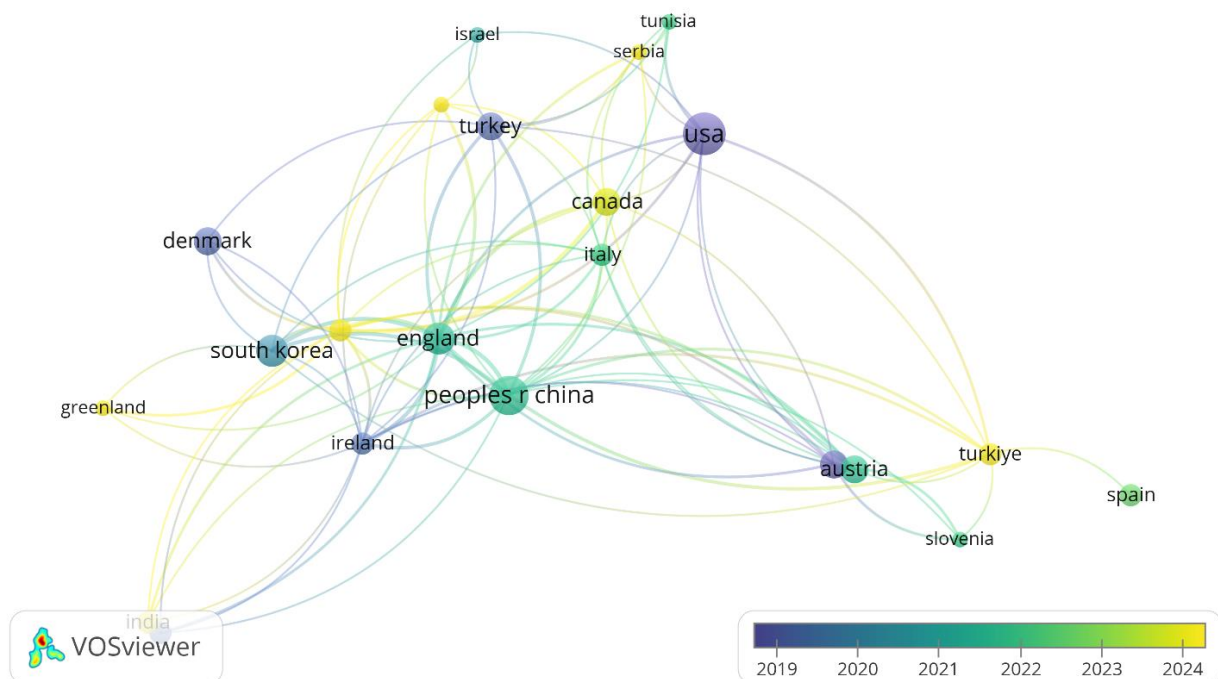


Fig. 4. Grouping of countries based on authorship of wet wipes publications

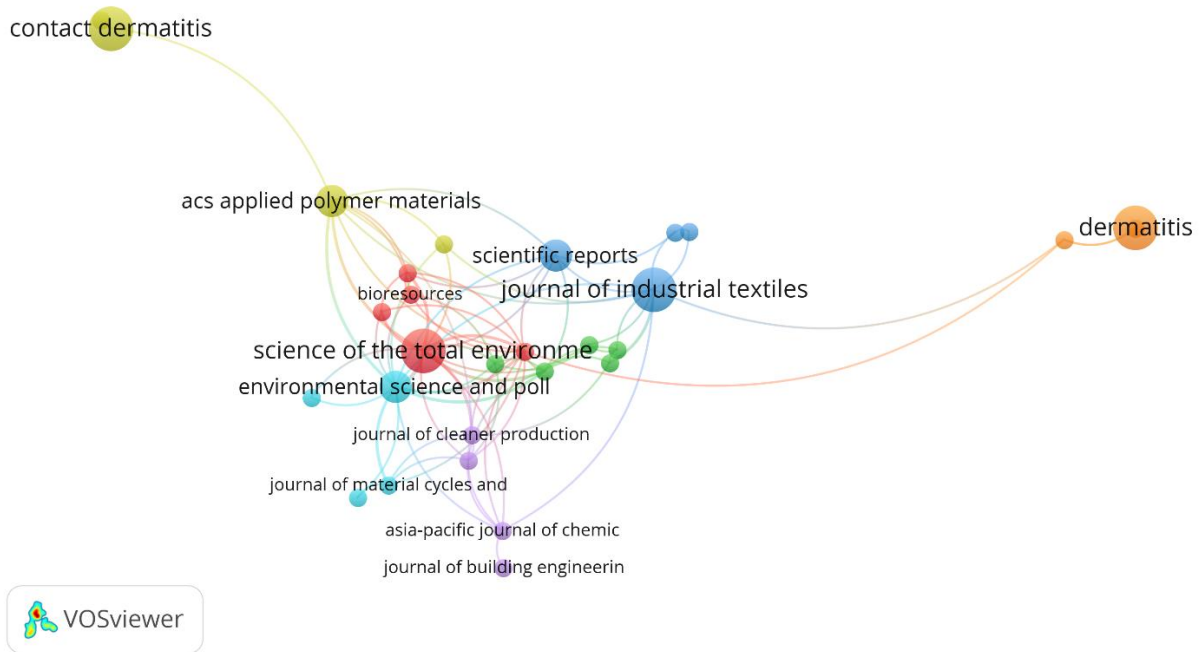


Fig. 5. Journals most prominent for publishing research on wet wipes

The variety of keywords related to wet wipes is shown in Fig. 6. In particular, the predominant keywords were: wet wipes, methylisothiazolinone, plastic pollution, water, degradation, allergic contact dermatitis. Until 2020–2021, research focused more intensively

on the safety of wet wipes for human health and their composition, whereas from 2021 onward, studies on environmental pollution and degradation of wet wipes (including biodegradation) have become increasingly prominent (Fig. 6).

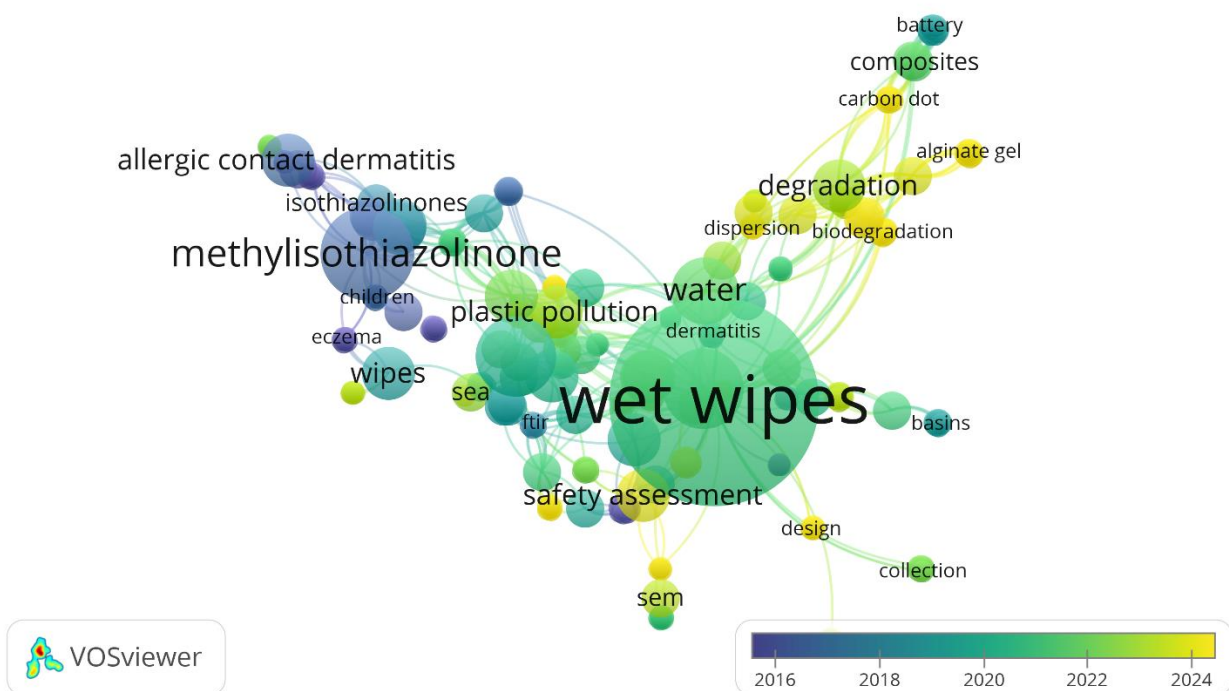


Fig. 6. Trends by year in the application of keywords concerning wet wipes

Antibacterial properties of wet wipes

Wet wipes are disposable daily products for hygienic purposes, in particular, the removal of pathogenic microorganisms from biotic and abiotic surfaces. Among the publications available to us, a number are devoted to studying the sensitivity of model microorganisms to solutions used in wet wipes, i.e. their antibacterial properties to improve the storage conditions of this hygienic product (Yayla et al., 2021; Salama et al., 2021). Antibacterial properties of wet wipes are given by preservatives that are added to the mixtures to moisturize them (Siegert, 2011; Salama et al., 2021). However, wet wipes used in medical facilities are not always active in practice and may be ineffective, which requires stricter labelling control and appropriate efficacy tests (Siani et al., 2011; Seenama et al., 2013). Among the 19 tested antibacterial wipes available on the Ukrainian market, 4 (21.0 %) did not have sufficient antimicrobial activity. Given the results obtained, it is better to use antimicrobial wet wipes from well-known manufacturers, purchased in pharmacy chains (Lekhniuk et al., 2020).

The solutions used to wet the wipe material contain a variety of compounds, including, for example, methylisothiazolinone (Tkachuk & Hrytsenko, 2025) – a pesticide employed to control slime-forming bacteria, fungi, and algae in pulp and paper mills, water-cooling systems, oilfield operations, industrial process water, and air purification systems, and also used as a preservative in adhesives, coatings, fuels, metalworking fluids, resin emulsions, paints, and various other specialty industrial products (United States..., 1998). Methylchloroisothiazolinone and methylisothiazolinone are preservatives, contact allergens, strong sensitizers that can cause contact dermatitis. It is proposed to limit their use in the European Union (EU) for leave-on cosmetics (including wet wipes). Nevertheless, in leave-on cosmetic products, such as «wet wipes», the safe levels of methylisothiazolinone with respect to contact allergy have not been adequately determined. These compounds are recommended for use only in rinse-off products (Regulation (EC) No 1223/2009..., 2009; Castanedo-Tardana and Zug, 2013; Chang and Nakrani, 2014; Scientific Committee on Consumer Safety..., 2014).

Also, the moisturizing solution for wet wipes may contain compounds such as benzalkonium chloride, benzyl alcohol, amyl cinnamal, butylphenylmethylpropional (Lilial), retinyl palmitate (vitamin A). Some features of the sanitary and hygienic characteristics of these compounds are as follows:

- Benzalkonium chloride. This substance is reported to irritate the skin, eyes, and respiratory passages. It is also toxic to aquatic and soil organisms. It is a quaternary ammonium salt, preservative, disinfectant, and sanitizer (Lee & Park, 2019; Liao et al., 2023).

- Benzyl alcohol. It is a solvent and preservative that can cause contact dermatitis, and in infants at high doses can cause «gasping syndrome». Although it is used in cosmetics in small concentrations (McCloskey et al., 1986; PubChem..., n.d.).

- Amyl cinnamal. It is a perfume allergen, a skin sensitizer (Australian Government..., 2016). Amyl cinnamal is included in the list of 26 EU fragrance allergens. The list above comprises 26 allergens identified by the European Commission as the most frequent causes of fragrance-induced contact dermatitis (Scientific Committee..., 2012). The use of this compound is governed by Regulation (EC) No 1223/2009 on cosmetic products, particularly Annex III (List of substances prohibited in cosmetic products unless used within specified limits), which requires manufacturers to declare the ingredient on the packaging if its concentration exceeds 0.001 % in leave-on products or 0.01 % in rinse-off products (Regulation (EC) No 1223/2009..., 2009). This list is intended to allow consumers to identify possible fragrance allergens from the labeling.

- Butylphenylmethylpropional (Lilial). This compound is a perfume allergen, a possible sensitizer, classified as reprotoxic (Repr. 1B) in the EU (Scientific Committee..., 2012, 2019). It is noted that in the EU, hygiene and cosmetic products containing this compound are prohibited from March 1, 2022 (Cosmetics Care..., n.d.).

- Retinyl palmitate (vitamin A). This is an antioxidant that is safe in small doses, but in excess may exhibit teratogenic properties (Ritchie, 1998).

The role of triclosan-containing antibacterial cleaning and hygiene products in promoting antibiotic resistance, a growing public health issue, As highlighted by Aiello and Larson (2003), a limited understanding by manufacturers of the complex chemical composition of biocides and their effects on antimicrobial efficacy – combined with improper use, incorrect dilution, or insufficient contact time – can result in microbial tolerance or resistance and may even contribute to the development of resistance, including antibiotic resistance (Maillard & Pascoe, 2024).

Wet wipes are toxic according to biotesting results with the plant *Lepidium sativum* (Tkachuk & Zelena, 2023a; Tkachuk & Hrytsenko, 2025) and a small planktonic crustacean *Daphnia magna* (Erdoğan, 2025).

Formulations based on plant extracts with antimicrobial activity are being developed to reduce the toxicity of wetting mixtures (Ferreira et al., 2022; Stefi et al., 2022; Subashini et al., 2024). A biocontrol strategy has also been proposed for disinfecting hard surfaces in hospitals using microbial-based wipes, by producing dry wipes containing adequate amounts of beneficial bacteria or spores (Dural-Erem et al., 2017). Once hydrated, these wipes can discharge beneficial bacteria that inhibit pathogens by establishing and proliferating on the surfaces (Dural-Erem et al., 2017).

Thus, the antimicrobial properties of wet wipes for medical and household use are actively being studied, but they do not always meet sanitary and hygienic requirements, which is dangerous from a public health perspective in the form of a risk of the appearance of pathogens and the possible development of infections. The proposed formulations of mixtures for wetting wet wipes based on plant extracts and beneficial bacteria can solve the issue of eco- and biosafety of these hygiene products.

Bacterial contamination of new wet wipes

The issue of bacterial contamination of wet wipes is also important for monitoring compliance with hygiene rules (Chong, 2016). In particular, the method of bacterial culture established bacterial contamination in 9 types of disposable wet wipes provided by restaurants, and its absence in the remaining 23 types (71.9 %) (Chong, 2016). Disposable wet wipes

were found to contain *Staphylococcus haemolyticus*, *S. hominis*, *S. warneri*, and *Pseudomonas fluorescens*, while methicillin-resistant coagulase-negative staphylococci and multidrug-resistant bacteria were absent (Chong, 2016).

Kang et al. (2023) isolated *Pseudomonas aeruginosa* from 238 new wet wipes tested in two variants (0.8 %), with an average count of 9.9×10^2 CFU per towel; *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* were not detected in any sample. Although the *P. aeruginosa* isolates did not exhibit antibiotic resistance, they carried the *toxA* gene and could potentially infect immunocompromised individuals, leading to pathogenic effects. *P. aeruginosa*, a Gram-negative bacterium commonly found in soil and water and part of the normal skin microbiota, can cause a wide range of infections, including skin diseases, keratitis, and peritonitis, particularly in people with weakened immune systems. Contamination of wet wipes may occur due to inadequate personal hygiene during packaging (Kang et al., 2023).

A large outbreak of *P. aeruginosa* ST3875 in Norway (October 2021 – June 2022) was linked to contaminated disposable wipes, affecting nearly 400 patients across 40 hospitals. The median patient age was 70 years, predominantly in intensive care units or other vulnerable populations. Clinically severe infection occurred in 25 % of cases, and *P. aeruginosa* infection was considered a contributing factor in several deaths. Similar products were available in healthcare and care settings in Scotland, and investigations are ongoing into their potential link to cases and outbreaks. These findings underscore the importance of raising awareness among healthcare professionals and ensuring the withdrawal of affected products, especially in healthcare environments (NSS Health..., 2023).

Moreover, Nkemngong et al. (2020) demonstrated that although wipes containing hydrogen peroxide and quaternary ammonium disinfectants exhibited some sporicidal activity, they still retained *Clostridioides difficile* spores (the causative agent of often fatal infections) during and after wiping. This enabled the transfer of *C. difficile* spores from contaminated to previously uncontaminated surfaces.

Information regarding the microbial composition of new wet wipe surfaces is presented in Table 2.

Table 2

Bacterial diversity of the surface of new wet wipes

A species of bacteria	Risk group*	Reference
<i>Staphylococcus haemolyticus</i>	2	(Chong, 2016)
<i>Staphylococcus hominis</i>	2	(Chong, 2016)
<i>Staphylococcus warneri</i>	2	(Chong, 2016)
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	1	(Chong, 2016; Kang et al., 2023; NSS Health..., 2023)

Note: * According TRBA 466... (2015)

Thus, new wet wipes may be contaminated with infectious agents, requiring stricter microbiological control of these products and, possibly, their labelling for pathogen-free testing.

Bacterial contamination of used wet wipes

Currently, information on the microbial diversity of discarded wet wipe surfaces is limited. This topic has only recently gained research attention, particularly due to the increasing human health risks associated with the persistence of pathogens such as *Escherichia coli* on wet wipe surfaces (Metcalf et al.,

2024). Faecal indicator organisms, including *E. coli* and *Vibrio* species, were more frequently detected on wet wipes littering the beaches of the Fourth Estuary than on seaweed (Metcalf et al., 2022). Additionally, four potentially pathogenic *Vibrio* species (*V. alginolyticus*, *V. parahaemolyticus*, *V. cholerae*, and *V. vulnificus*) were identified on wet wipes, and some isolated bacteria exhibited resistance to multiple antibiotics (Metcalf et al., 2022). Consequently, the accumulation of used wet wipes as litter represents a potential threat to human health.

Table 3 presents the microbial diversity found on the surface of used wet wipes.

Table 3

Bacterial diversity of the surface of used wet wipes

A species of bacteria	Risk group*	Reference
<i>Escherichia coli</i>	2	(Metcalf et al., 2022; Metcalf et al., 2024)
<i>Vibrio alginolyticus</i>	2	(Metcalf et al., 2022)
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	2	(Metcalf et al., 2022)
<i>Vibrio cholerae</i>	2	(Metcalf et al., 2022)
<i>Vibrio vulnificus</i>	2	(Metcalf et al., 2022)

Note: * According TRBA 466... (2015)

Effect of wet wipes microbiome on natural microbial communities

Microorganisms that constitute the microbiome of hygiene product surfaces, in addition to being potential pathogens, can also influence the functioning of natural environmental microbial communities. For example, exogenous *Escherichia coli* has been shown to impact benthic archaeal and bacterial communities, altering symbiotic interactions, including mutual regulation and the integration of multiple environmental functions, as well as affecting elemental cycling (Gu et al., 2021). It

was observed that exposure to *E. coli* induced feedback responses in benthic prokaryotic communities, influencing both microbial community structure and geochemical functions.

Representatives of the genus *Pseudomonas*, which produce secondary metabolites, affect competition sensing, antagonistic interactions, and modified secondary metabolites production (Hansen, 2021). The ability of *Pseudomonas fluorescens* to mobilize inorganic phosphate in soils is known (Browne et al., 2009) as well as ability to remove total oil hydrocarbons of a soil (Gutiérrez et al., 2020). In

general, *P. fluorescens* is characterized by significant bioremediation potential (Alsukaibi et al., 2023).

Staphylococcus aureus is able to metabolize phosphorus compounds (Kelliher et al., 2020) and to form biofilms (Hu et al., 2023; Liang et al., 2023).

E. coli, *S. aureus*, *Pseudomonas* spp. Participate in the Sulphur cycle and biotransformation of metals (Plante, 2007). It should be noted that the ecological and physiological group of anaerobic sulphate-reducing bacteria (SRB) is also involved in the sulphur cycle in soils and aquatic environments (Plante, 2007). However, at the moment, there are no reports of the detection of representatives of this group of prokaryotes on the surface of wet wipes that have become garbage. Since SRB are active biodegraders found in the biofilm on the surfaces of materials known to be involved in the biodegradation processes of plastics (Cacciari et al., 1993; McCormick et al., 2014; Pinnell and Turner, 2019; Abdulina et al., 2021; Tang et al., 2022; Tkachuk and Zelena, 2023b), their presence and diversity on the surface of hygiene products that have become waste

should be investigated for possible use in biotechnological processes of disposal of these pollutants.

Therefore, the identified microorganisms on wet wipes are involved in the cycling of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur; however, most belong to risk group 2 and cannot be considered suitable for bioremediation.

Environmental aspects associated with wet wipes

A range of environmental problems associated with wet wipe production and usage is shown in Fig. 7.

Therefore, the main environmental issues associated with wet wipes are (Ó Briain et al., 2020; Tkachuk et al., 2024; Shruti et al., 2021; Zhang et al., 2022):

- environmental accumulation of wet wipes, leading to water and soil contamination;
- enhanced greenhouse gas emissions;
- elevated levels of microplastics in the environment;
- operational problems in wastewater systems.

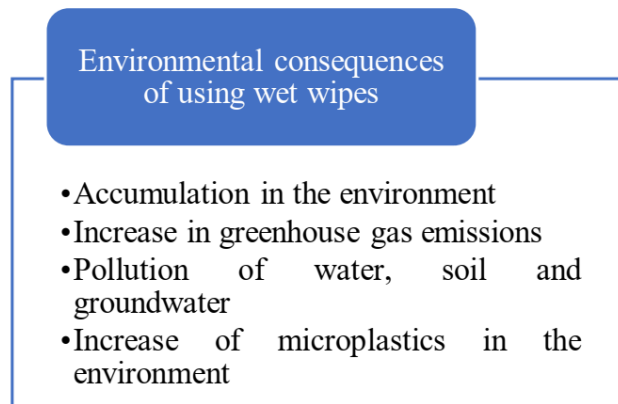


Fig. 7. Ecological problems linked to the use of wet wipes (Tkachuk and Zelena, 2023b)

Addressing the environmental issues related to wet wipes requires the use of eco-friendly, biodegradable materials and non-toxic wetting solutions, which necessitates innovative production technologies. Equally important is fostering consumer awareness regarding proper disposal of wet wipes (Tkachuk et al., 2024; The Rivers Trusts, n.d.).

Social aspects of the use of wet wipes in a public health context

Today, the wet wipes market is significant, with global baby wipe sales rising from USD 4.1

billion in 2018 to USD 16.83 billion in 2020 and projected to reach USD 17.98 billion by 2026 at a CAGR of 6.3% (2021–2026) (Ramya et al., 2021). This growth underscores the increasing environmental and health impacts of these products, emphasizing the need for responsible use. The above-mentioned problems with wet wipes can be solved by joint efforts of politicians, manufacturers and retailers, water supply companies and the general public. Education and public involvement are key to

solving the problem of wet wipes (Zhang et al., 2021; The Rivers Trusts, n.d.).

Young people have significant potential to act as catalysts for change and to raise awareness of environmental issues (Torres et al., 2019). Promoting environmental care and respect is further supported through preventive environmental education programs, which shape individual behavior and enhance people's capacity and motivation to adopt environmentally responsible practices (Torres et al., 2019). Currently, approximately 25 % of students in grades 8–9 at Chernihiv Gymnasium No. 32 (Ukraine) reported having thrown wet wipes into the wrong trash bin, highlighting a lack of awareness regarding recycling and the resulting pollution of the city's green areas with this hygiene product (Tkachuk & Zahryva, 2025). Mitigating the environmental impact of wet wipes requires a systemic approach encompassing production, consumption, and disposal processes. Consumer behavior, influenced by 12 factors, plays a key role in determining the waste flow of wet wipes. These factors are grouped into three categories: «consumption habits», «cost», and «incentives». Among them, «time consumption» was identified as the most significant, suggesting that convenient solid waste management infra-

structure is an effective measure to reduce environmental leakage. Researchers also emphasize that raising awareness about the plastic content of wet wipes – such as by including this information on packaging – is a practical strategy (Zhang et al., 2022).

Advocacy and educational activities aimed at raising awareness about the issue of wet wipes are carried out by The Rivers Trusts (The Rivers Trusts, n.d.). The Plastic Free Mersey project, managed by the Mersey Rivers Trust and Thames21, employs brand survey data to impact the plastics and recycling industry (The Rivers Trusts, n.d.).

A major gap in environmental education regarding critical aspects of daily human behavior drives the negative influence of numerous actions on sustainable development (Alonso-Sainz, 2021). Achieving the Sustainable Development Goals is closely related to the issues of biological and environmental safety of wet wipes (Fig. 8), in particular, with Goal 3 - Good health and well-being (Tkachuk and Zahryva, 2025), which includes, among other things, ending epidemics of major infectious diseases and reducing risk factors associated with environmental pollution (Eurostat, n.d.).



Fig. 8. Sustainable Development Goals addressing environmental issues associated with wet wipes (Tkachuk & Zahryva, 2025) (Figure adapted by us)

A generalized analysis of the effects of wet wipes on selected ecological and public health indicators

In general, the importance of knowledge about the number and diversity of bacteria on hygiene products waste in both terrestrial and

marine environments is as follows (Rakhmawati et al., 2024):

- has significant potential for understanding and solving current environmental and public health problems;

- can help assess their environmental impact and potential impact on ecosystems;
- can encourage responsible disposal practices;
- can promote the use of environmentally friendly materials to minimize the impact on the environment;
- can offer valuable information about their degradation processes in the modern ecological context.

Therefore, wet wipes are a product that can affect the following public health indicators:

1) environmental – safety of consumer products, environmental risks to health, environmental quality, which is associated with the content of compounds in their wetting solutions that can cause allergies, are toxic, as well as the fact that they are a source of microplastics;

2) medical and sanitary - the level of morbidity, which is associated with the facts of non-compliance of a number of wet wipes with sanitary and hygienic standards – their ineffective antibacterial properties, the presence of pathogens and antibiotic-resistant strains;

3) social and behavioural – consumer behaviour of the population, which is associated with the formation of a conscious attitude towards the use and disposal of used wet wipes, appreciating the importance of increasing their biological and environmental safety.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflicts of Interest

Автори Наталія Ткачук та Любов Зелена є членами редакційної колегії *Biota. Human. Technology*. Вони не брали участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийняття цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Authors Nataliia Tkachuk and Liubov Zelena are the members of the editorial board of

Conclusions

Based on a bibliometric review of the literature and available studies, the human health and environmental risks linked to wet wipe use were thoroughly analyzed. In general, the quality of wet wipes and their consumption by the population can determine such public health indicators as environmental, medical and sanitary, social and behavioural. Microbiological and environmental parameters that determine the safety of wet wipes for public health have become the subject of comprehensive scientific analysis. The study emphasizes pathogenic indicator microorganisms as potential health hazards and considers the environmental impact of pollution caused by this hygiene product. However, socio-pedagogical approaches aimed at forming a responsible attitude towards the use and proper disposal of wet wipes remain underdeveloped and not systematic. Future research should focus on:

- further exploring the microbial diversity of hygiene products, considering both harmful microorganisms and potential biodegraders;
- search for eco- and bio-safe materials and solutions for wetting wet wipes;
- shaping the behaviour of responsible use and consumption of wet wipes.

Biota. Human. Technology. They were not involved in the editorial decision-making, peer review, or acceptance process for this manuscript. The authors have no other conflicts of interest to note.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Abdulina, D.R., Chuenko, A.I., Topchiy, A.S., Kopteva, G.E., & Kopteva, Zh.P. (2021). Ability of sulfate reducing bacteria to utilize polymer and rubber materials. *Mikrobiol. Z.*, 83(2), 51-63. <https://doi.org/10.15407/microbiolj83.02.051>

Aiello, A.E., & Larson, E. (2003). Antibacterial cleaning and hygiene products as an emerging risk factor for antibiotic resistance in the community. *Lancet Infect. Dis.*, 3(8), 501-506. [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(03\)00723-0](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(03)00723-0)

Allison, T., Ward, B.D., Harbottle, M., & Durance, I. (2023). Do flushed biodegradable wet wipes really degrade? *Sci. Total. Environ.* 894, 164912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164912>

Alonso-Sainz, T. (2021). Educación para el desarrollo sostenible: Una visión crítica desde la Pedagogía. *Rev. Complut. Educ.* 32, 249–259. <https://doi.org/10.5209/rced.68338>

Alsukaibi, A.K.D., Mechi, L., Alimi, F.R., Alshamari, A.K.A.A., Alshammari, E.M., Otaibi, A.A., Sherwani, S., & Khan, M.W.A. (2023). Bioremediation potential of *Pseudomonas fluorescens* strain isolated from the Ha'il region of Saudi Arabia. *Bioinformation*, 19(9), 901-907. <https://doi.org/10.6026/97320630019901>

Angulo-Pineda, C., Lu, J.R., Cartmell, S., & McBain, A.J. (2025). Compositional factors driving antibacterial efficacy in healthcare wet wipe products. *Front. Microbiol.*, 16, 1582630. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1582630>

Australian Government Department of Health. National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme. (2016). *Amyl and hexyl cinnamaldehyde: Human health tier II assessment* https://www.industrialchemicals.gov.au/sites/default/files/Amyl%20and%20hexyl%20cinnamaldehyde_Human%20health%20tier%20II%20assessment.pdf

Bondaroff, T.Ph., & Cooke, S. (2020). *Masks on the Beach: The impact of COVID-19 on marine plastic pollution*. OceansAsia. <https://oceansasia.org/wp-content/uploads/2020/12/Marine-Plastic-Pollution-FINAL.pdf>

Browne, P., Rice, O., Miller, S.H., Burke, J., Dowling, D., Morrissey, J., & O'Gara, F. (2009). Superior inorganic phosphate solubilization is linked to phylogeny within the *Pseudomonas fluorescens* complex. *Appl. Soil Ecol.*, 43(1), 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.06.010>

Cacciari, I., Quatrini, P., Zirletta, G., Mincione, E., Vinciguerra, V., Lupattelli, P., & Giovannozzi Sermanni, G. (1993). Isotactic polypropylene biodegradation by a microbial community: physicochemical characterization of metabolites produced. *Appl. Environ. Microbiol.*, 59(11), 3695-700. <https://doi.org/10.1128/aem.59.11.3695-3700.1993>

Cao, Z., Yan, W., Ding, M., & Yuan, Y. (2022). Construction of microbial consortia for microbial degradation of complex compounds. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 10, 1051233. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1051233>

Cardiff University. (2008). *Antibacterial Wipes Can Spread Bacteria Around*. ScienceDaily. www.sciencedaily.com/releases/2008/06/080603133410.htm

Castanedo-Tardana, M.P., & Zug, K.A. (2013). Methylisothiazolinone. *Dermatitis*, 24(1), 2-6. <https://doi.org/10.1097/DER.0b013e31827edc73>

Chang, M.W., & Nakrani, R. (2014). Six children with allergic contact dermatitis to methylisothiazolinone in wet wipes (baby wipes). *Pediatrics*, 133(2), e434-8. <https://doi.org/10.1542/peds.2013-1453>

Cheng, K.L., Boost, M.V., & Chung, J.W. (2011). Study on the effectiveness of disinfection with wipes against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and implications for hospital hygiene. *Am. J. Infect. Control*, 39(7), 577-580. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2010.08.024>

Chong, M. (2016). Bacterial Contamination in Disposable Wet Wipes from General Restaurants. *J. Clin. Lab. Sci.*, 48, 237-241. <https://doi.org/10.15324/kjcls.2022.54.1.23>

Cosmetics Care. (n.d.). *Safety Assessment* <https://www.cosmeticscare.eu/en/?s=lilial>

Dural-Erem, A., Wessman, P., Husmark, U., & Nierstrasz, V. (2017). Biocontrol of solid surfaces in hospitals using microbial-based wipes. *Text. Res. J.*, 89(2), 216-222. <https://doi.org/10.1177/0040517517741163>

Environmental and economic costs of disposable wet wipes, menstrual products and baby diaper. (n.d.). https://zerowastelviv.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/ua_doslidzhennya-pidguzky.pdf (in Ukrainian)

Екологічні та економічні витрати від одноразових вологих серветок, менструальних засобів та дитячих підгузків. Режим доступу: https://zerowastelviv.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/ua_doslidzhennya-pidguzky.pdf (дата звернення: 17 листопада 2025)

Erdoğan Ş. (2025). Acute Toxic effects of Disposable Personal Hygiene Products on *Daphnia magna*. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 47-52. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1509243>

Eurostat. (n.d.). *Sustainable Development Goals. 3. Good health and well-being* <https://ec.europa.eu/eurostat/web/sdi/database/good-health-and-well-being>

Ferreira, G.D.S., da Silva, D.J., Zanata, L., Souza, A. G., Ferreira, R.R., & Rosa, D. S. (2022). Antimicrobial cotton wipes functionalized with *Melaleuca alternifolia* Pickering emulsions stabilized with cellulose nanofibrils. *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, 3, 100208. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100208>

Gu, L., Wu, J.Y., & Hua, Z.L. (2021). Benthic prokaryotic microbial community assembly and biogeochemical potentials in *E. coli* – Stressed aquatic ecosystems during plant decomposition. *Environ. Pollut.*, 275, 116643. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116643>

Gutiérrez, E.J., Abraham, M.D.R., Baltazar, J.C., Vázquez, G., Delgadillo, E., & Tirado, D. (2020). *Pseudomonas fluorescens*: A Bioaugmentation Strategy for Oil-Contaminated and Nutrient-Poor Soil. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 17(19), 6959. <https://doi.org/10.3390/ijerph17196959>

- Hansen, M.L. (2021). Control of microbial soil communities by *Pseudomonas*-produced secondary metabolites. [PhD thesis]. Technical University of Denmark, Kongens Lyngby. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/282189434/PhD_thesis.pdf
- Harter, T., Steiner, H., & Hirn, U. (2022). Investigating mechanisms deteriorating the dispersibility of biodegradable and flushable wet wipes. *Cellulose*, 29, 8827–8842. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04816-y>
- Hu, P., Sharaby, Y., Gu, J., Radian, A., & Yona, N.L. (2023). Biogeochemical cycles and health implications potentially mediated by active dust-borne bacteria. *Authorea*, 1-18. <https://doi.org/10.22541/au.169261441.14767355/v1>
- Kang, J., Sung, M., Kim, J.H., & Yoonm, Y. (2023). Pretreatments for Microbial Analysis and Evaluation of Hygiene of Wet Towels and Wet Wipes. *J. Pure Appl. Microbiol.*, 17(2), 780-787. <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.2.03>
- Kelliher, J.L., Leder Macek, A.J., Grudzinski, K.M., Radin, J.N., & Kehl-Fie, T.E. (2020). *Staphylococcus aureus* preferentially liberates inorganic phosphate from organophosphates in environments where this nutrient is limiting. *J. Bacteriol.*, 202, e00264-20. <https://doi.org/10.1128/JB.00264-20>
- Khalid, M., & Abdollahi, M. (2021). Environmental Distribution of Personal Care Products and Their Effects on Human Health. *Iran J. Pharm. Res.*, 20(1), 216-253. <https://doi.org/10.22037/ijpr.2021.114891.15088>
- Khalid, S.A., & Elsherif, W.M. (2022). Types of Microorganisms for Biodegradation. In G.A.M. Ali & A.S.H. Makhlof (Eds.), *Handbook of Biodegradable Materials*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83783-9_2-1
- Khan, M.S., Yang, K., Liu, Z., Zhou, L., Liu, W., Lin, S., Wang, X., & Shang, C. (2023). Microorganisms Involved in the Biodegradation and Microbiological Corrosion of Structural Materials. *Coatings*, 13, 1683. <https://doi.org/10.3390/coatings13101683>
- Kyrychenko, O.V., Hnitii, N.V., & Bidna, K.A. (2020). Market of wet wipes in Ukraine. *Modern Materials Science and Commodity Science: Theory, Practice, Education. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Internet Conference (2020 Mar 12–13, Poltava, Ukraine)*. pp. 84-87. <https://core.ac.uk/download/pdf/326487599.pdf> (in Ukrainian)
Кириченко О. В., Гнітій Н. В., Бідна К. А. Ринок серветок вологих в Україні. Сучасне матеріалознавство та товарознавство: теорія, практика, освіта : матеріали VII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (12–13 березня 2020 року, м. Полтава). Полтава : ПУЕТ, 2020. С. 84-87. Режим доступу: <http://dspace.puet.edu.ua/handle/123456789/8698> (дата звернення: 17.11.2025)
- Lee, H., & Park, K. (2019). Acute toxicity of benzalkonium chloride in Balb/c mice following intratracheal instillation and oral administration. *Environ. Anal. Health Toxicol.*, 34(3), e2019009. <https://doi.org/10.5620/eaht.e2019009>
- Lekhniuk, N., Mykytiuk, S., Konechna, R., Shykula, R., Korniychuk, O., & Konechnyi, Y. (2020). Comparative analysis of antimicrobial and fungicidal activity of commonly available hand sanitizers and antibacterial wet wipes on Ukrainian market. *Proc. Shevchenko Sci. Soc. Med. Sci.*, 59(1), 100-110. <https://doi.org/10.25040/ntsh2020.01.08> (in Ukrainian).
Лехнюк Н., Микитюк С., Конечна Р., Шикюла Р., Корнійчук О., Конечний Ю. Дослідження протимікробної та протигрибкової дії антисептиків для рук та антибактеріальних вологих серветок доступних на ринку України. *Праці Наукового товариства імені Шевченка. Медичні науки*. 2020. Т. 59, № 1. С. 100-110. <https://doi.org/10.25040/ntsh2020.01.08>
- Liang, J., Huang, T.Y., Mao, Y., & Li, X. (2023). Biofilm formation of two genetically diverse *Staphylococcus aureus* isolates under beta-lactam antibiotics. *Front. Microbiol.*, 14, 1139753. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1139753>

- Liao, M., Wei, S., Zhao, J., Wang, J., & Fan, G. (2023). Risks of benzalkonium chlorides as emerging contaminants in the environment and possible control strategies from the perspective of ecopharmacovigilance. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 266, 115613. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115613>
- Lin, N. (2023). Chemicals in personal care products: an important but understudied exposure source for both the human body and ecosystems. *J. Environ. Expo Assess.*, 2, 19. <https://doi.org/10.20517/jeea.2023.31>
- Lumio, R.T., Tan, M.A., & Magpantay, H.D. (2021). Biotechnology-based microbial degradation of plastic additives. *3 Biotech.*, 11(7), 350. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02884-8>
- Maillard, J.Y., & Pascoe, M. (2024). Disinfectants and antiseptics: mechanisms of action and resistance. *Nat. Rev. Microbiol.*, 22, 4–17. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00958-3>
- McCloskey, S.E., Gershanik, J.J., Lertora, J.J., White, L., & George, W.J. (1986). Toxicity of benzyl alcohol in adult and neonatal mice. *J. Pharm. Sci.*, 75(7), 702-705. <https://doi.org/10.1002/jps.2600750718>
- McCormick, A., Hoellein, T.J., Mason, S.A. Schlupe, J., & Kelly, J.J. (2014). Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environ. Sci. Technol.*, 48, 11863–11871. <https://doi.org/10.1021/es503610r>
- Metcalf, R., Fellows, R., White, H.L., & Quilliam, R.S. (2024). Persistence of “wet wipes” in beach sand: An unrecognised reservoir for localised *E. coli* contamination. *Mar. Pollut. Bull.*, 201, 116175. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116175>
- Metcalf, R., White, H.L., Moresco, V. Ormsby, M.J., Oliver, D.M., & Quilliam, R.S. (2022). Sewage-associated plastic waste washed up on beaches can act as a reservoir for faecal bacteria, potential human pathogens, and genes for antimicrobial resistance. *Mar. Pollut. Bull.*, 180, 113766. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113766>
- Nkemngong, C.A., Chaggar, G.K., Li, X., Teska, P.J., & Oliver, H.F. (2020). Disinfectant wipes transfer *Clostridioides difficile* spores from contaminated surfaces to uncontaminated surfaces during the disinfection process. *Antimicrob. Resist. Infect. Control.*, 9, 176. <https://doi.org/10.1186/s13756-020-00844-0>
- NSS Health Facilities Scotland: SAN2205. (2023). *Recall of hygiene products associated with Pseudomonas aeruginosa infection*. <https://www.nss.nhs.scot/media/2737/safety-action-notice-san2205.pdf>
- Ó Briain, O., Marques Mendes, A.R., McCarron, S., Healy, M.G., & Morrison, L. (2020). The role of wet wipes and sanitary towels as a source of white microplastic fibers in the marine environment. *Water Res.*, 182, 116021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116021>
- Pinnell, L.J., & Turner, J.W. (2019). Shotgun metagenomics reveals the benthic microbial community response to plastic and bioplastic in a coastal marine environment. *Front. Microbiol.*, 10, 1252. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01252>
- Plante, A.F. (2007). Soil biogeochemical cycling of inorganic nutrients and metals. In E.A. Paul (Ed.), *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (3rd ed., pp. 389-432). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047514-1.50019-6>
- PubChem Compound Database. National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information (n.d.). *Benzyl alcohol*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/benzyl%20alcohol>

Rakhmawati, A., Octavia, B., Marwati, S., & Kristanti, D. (2024). Bacterial profiling of mask waste from terrestrial and marine environment. *Global J. Environ. Sci. Manage.*, 10(4), 1-18. https://www.gjesm.net/article_713073_27dec80cced13ef57031d459410b6ac6.pdf

Ramya, K., & Amutha, K. (2021). Eco-friendly wet wipes - A review. *Proceedings of the International Conference on Advances in Technical Textiles* (2021 October; Sathyamangalam, Tamilnadu, India). <https://5.imimg.com/data5/SELLER/Doc/2023/9/343153030/WV/GB/VZ/140877384/baby-wet-wipes.pdf>

Regulation (EC) No 1223/2009 of the European Parliament and of the Council of 30 November 2009 on cosmetic products (recast). (2009). Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02009R1223-20250901>

Ritchie, H.E., Webster, W.S., Eckhoff, C., & Oakes, D.J. (1998). Model predicting the teratogenic potential of retinyl palmitate, using a combined *in vivo/in vitro* approach. *Teratology*, 58(3-4), 113-123. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9926\(199809/10\)58:3/4<113::AID-TERA7>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9926(199809/10)58:3/4<113::AID-TERA7>3.0.CO;2-0)

Salama, P., Gliksberg, A., Cohen, M., Tzafrir, I., & Ziklo, N. (2021). Why Are Wet Wipes So Difficult to Preserve? Understanding the Intrinsic Causes. *Cosmetics*, 8(3), 73. <https://doi.org/10.3390/cosmetics8030073>

Scientific Committee on Consumer Safety. (2012). *Opinion on fragrance allergens in cosmetic products (SCCS/1459/11)*. European Commission. https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_102.pdf

Scientific Committee on Consumer Safety. (2019). *Opinion on the safety of Butylphenyl methylpropional (p-BMHCA) in cosmetic products – Submission II (SCCS/1591/17)*. European Commission. https://health.ec.europa.eu/system/files/2021-08/sccs_o_213_0.pdf

Scientific Committee on Consumer Safety. (2014). *Revision of the opinion on Methylisothiazolinone (P94) Submission II (Sensitisation only) (SCCS/1521/14)*. European Commission. https://health.ec.europa.eu/publications/revision-opinion-methylisothiazolinone-p94-submission-ii-sensitisation-only_en

Seenama, C., Tachasirinugune, P., Jintanothaitavorn, D., Kachintorn, K., & Thamlikitkul, V. (2013). Effectiveness of disinfectant wipes for decontamination of bacteria on patients' environmental and medical equipment surfaces at Siriraj Hospital. *J. Med. Assoc. Thai*, 96 Suppl 2, S111-6. <http://www.jmatonline.com/PDF/S111-S116-PB-96-S2.pdf>

Shruti, V.C., Pérez-Guevara, F. & Kutralam-Muniasamy, G. (2021). Wet wipes contribution to microfiber contamination under COVID-19 era: An important but overlooked problem. *Environ. Chall.*, 5, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100267>

Siani, H., Cooper, C., & Maillard, J.Y. (2011). Efficacy of «sporicidal» wipes against *Clostridium difficile*. *Am. J. Infect. Control.*, 39(3), 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2011.01.006>

Siegert, W. (2011). Preservative Trends in Wet Wipes. *SOFW-J.*, 137, 44–51. https://www.researchgate.net/publication/232273400_Preservative_Trends_in_Wet_Wipes

Song, X., Vossebein, L., & Zille, A. (2019). Efficacy of disinfectant-impregnated wipes used for surface disinfection in hospitals: a review. *Antimicrob. Resist. Infect. Control.*, 8, 139. <https://doi.org/10.1186/s13756-019-0595-2>

Stefi, S.M., Joseph, J., Shamy, A.M., Kumar, V.R., Suresh, A., & Thirunavukarasu, R. (2022). Evaluation and formulation of antiseptic herbal hand wipes. *Asia-Pac. J. Pharmacother. Toxicol.*, 2, 11-17. <https://doi.org/10.32948/ajpt.2022.12.30>

Subashini, P., Thilak B., Preetika, S., & Niranjanasree, A.C. (2024). Formulation and evaluation of herbal wet wipes using non-woven fabrics. *J. med. Pharm. Allied Sci.*, 13-I 4, 6713–6716. <https://doi.org/10.55522/jmpas.V13I4.6614>

Sülar, V., & Keçeci, B. (2021). Degradation of nonwoven fabrics suitable for wet wipes buried in soil. *TexTen X: Proceedings of the International Conference on Textiles and Connected R & D Domains* (2021 October 21-22; Bucharest, Romania). <https://doi.org/10.35530/TT.2021.53>

Tang, M., Zhou, S., Huang, J., Sun, L., & Lu, H. (2022). Stress responses of sulfate-reducing bacteria sludge upon exposure to polyethylene microplastics. *Water Res.*, 220, 118646. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118646>

The Rivers Trusts (n.d.). *Wet Wipes Position Statement*. <https://theriverstrust.org/about-us/our-position-statements/wet-wipes-position-statement>

Tkachuk, N.V., & Hrytsenko, O.M. (2025). Ecological and medical-biological risks of using antibacterial wet wipes. *Transformational approaches to sustainable development: environmental education, science and environmental practices for the reconstruction of Ukraine: Abstracts of the International Scientific and Practical Conference* (2025 Sep 22-26; Zhytomyr, Ukraine). Zhytomyr Polytechnic Institute. p. 38. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/10/38.pdf>

Tkachuk, N., & Zahryva, D. (2025). Wet wipes in green ecosystems of Chernihiv, Ukraine. *CIMS*, 4(1), 139-144. <https://doi.org/10.15421/cims.4.268>

Tkachuk, N., & Zelena L. (2023a). Evaluation of the Toxicity of Wet Wipes Based on the Growth Test with *Lepidium sativum* L. *Eng. Proc.*, 56(5). <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15495>

Tkachuk, N., & Zelena, L. (2023b). Some Microbiological Characteristics of the Biofilm on the Surface of Pre-Production Pellets of Polypropylene Microplastics after Short Exposure in Soil. *Eng. Proc.*, 56(1), 1-4. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15350>

Tkachuk, N., Zelena, L., & Novikov, Ya. (2024). Wet wipes as a cause of environmental problems: a mini review. *Selected Papers of VI International Conference on European Dimensions of Sustainable Development* (2024 May 15–17, Kyiv, Ukraine). NUFT. pp. 88-94. <https://doi.org/10.24263/EDSD-2024-6-12>

Torres, H.R., Reynolds, C.J., Lewis, A., Muller-Karger, F., Alsharif, K., & Mastenbrook, K. (2019). Examining youth perceptions and social contexts of litter to improve marine debris environmental education. *Environ. Educ. Res.*, 25, 1400–1415. <https://doi.org/10.1080/13504622.2019.1633274>

TRBA 466. (2015). *Einstufung von Prokaryonten (Bacteria und Archaea) in Risikogruppen*. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBA/pdf/TRBA-466.pdf?__blob=publicationFile&v=4

United States Environmental Protection Agency. (1998). *Methylisothiazolinone. Prevention, pesticides and toxic substances (7508C)*. EPA-738-F-98-008. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/fs_G-58_1-Oct-98.pdf

VOSviewer. (n.d.). <https://www.vosviewer.com/>

WHO Regional Office for Europe. (2022). *A health perspective on the role of the environment in One Health*. WHO Regional Office for Europe. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/354574/WHO-EURO-2022-5290-45054-64214-eng.pdf>

Yayla, O., Özgeç, M., Ay, E., Gençtürk, Ü., & İnce, A. (2021). Application of Anti-Bacterial Feature to Wet Wipes Made of Cellulosic Fibre Based. *Biol. Chem. Res.*, 8, 80-96. <https://www.ss-pub.org/wp-content/uploads/2021/07/BCR2021032901.pdf>

Zhang, Yu., Wen, Z., Hu, Yu., & Zhang, T. (2022). Waste flow of wet wipes and decision-making mechanism for consumers' discarding behaviors. *J. Clean. Prod.*, 364, 132684. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132684>

Zhang, Y., Wen, Z., Lin, W., Hu, Y., Kosajan, V., & Zhang, T. (2021). Life-cycle environmental impact assessment and plastic pollution prevention measures of wet wipes. *Resour. Conserv. Recycl.*, 174, 105803. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105803>

Received: 24.01.2026 **Accepted:** 11.02.2026 **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Tkachuk N., Zelena L., Shkardybarda I., Nikolaienko D., Demchenko N. Sanitary-hygienic, clinical-immunological and environmental risks of wet wipes in public health context. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. P. 100-120. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.9>

Cite this article in APA style as:

Tkachuk, N., Zelena, L., Shkardybarda, I., Nikolaienko, D., & Demchenko, N. (2026). Sanitary-hygienic, clinical-immunological and environmental risks of wet wipes in public health context. *Biota. Human. Technology*, (1), 100-120. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.9>

Information about the authors:

Tkachuk N. [*in Ukrainian: Ткачук Н.*] ¹, Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Prof., email: nataliia.smykun@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5115-7716 Scopus-Author ID: 7801574248 ResearcherID: AAB-4448-2020
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Zelena L. [*in Ukrainian: Зелена Л.*] ², Cand. Sc. (Biol.), Senior Researcher, email: zelenalyubov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5148-1030 Scopus-Author ID: 6506970298 ResearcherID: H-7309-2013
Department of Virus Reproduction, Danylo Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, NAS of Ukraine
154 Akademika Zabolotnoho Street, Kyiv, 03680, Ukraine

Shkardybarda I. [*in Ukrainian: Шкардибарда І.*] ³, PhD student, email: ivanshkardybarda@gmail.com
ORCID: 0009-0007-3557-3561
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Nikolaienko D. [*in Ukrainian: Ніколаєнко Д.*] ⁴, PhD student, email: dmitry.nikolayenko@gmail.com
ORCID: 0009-0007-9262-9779
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Demchenko N. [*in Ukrainian: Демченко Н.*] ⁵, Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Prof., email: nata_demch@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8542-730X Scopus-Author ID: 57190674891
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»,
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

¹ Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

² Manuscript preparation.

³ Data collection, statistical analysis.

⁴ Data collection, statistical analysis.

⁵ Manuscript preparation.

UDC 595.143:612.112:616-001.17

DOI: 10.58407/bht.1.26.10



Copyright (c) 2026 Ruslan Aminov

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Ruslan Aminov**EFFECT OF LEECH EXTRACT ON LYMPHOCYTES IN THERMAL BURNS****Руслан Амінов****ВПЛИВ ЕСТРАКТУ П'ЯВКИ НА ЛІМФОЦИТИ ПРИ ТЕРМІЧНИХ ОПІКАХ****ABSTRACT**

Purpose of the work. The study aimed to evaluate changes in the quantitative composition of lymphocytes and the blast transformation reaction of lymphocytes under spontaneous conditions and concanavalin A stimulation during the healing of a thermal burn, as well as to determine the immunomodulatory effect of the water-salt extract of the medicinal leech (*Hirudo verbana*).

Methodology. The experimental study was conducted using a thermal burn model. Animals were divided into intact, control (thermal burn without treatment), and experimental groups treated with the water-salt extract of *Hirudo verbana*. Blood samples were collected on days 3, 7, 14, and 30 after injury. The percentage of lymphocytes and the blast transformation reaction of lymphocytes were assessed under spontaneous conditions and after stimulation with concanavalin A using standard immunological methods. Results were expressed as $M \pm m$, and statistical analysis was performed using Student's t-test.

Scientific novelty. For the first time, the dynamics of lymphocyte proliferative activity during thermal burn healing under the influence of the water-salt extract of the medicinal leech were quantitatively characterized. It was demonstrated that the extract promotes faster restoration of ConA-induced blast transformation of lymphocytes and prevents prolonged post-burn immunosuppression.

Conclusions. Thermal burn injury caused transient lymphopenia, increased spontaneous blast transformation, and suppression of mitogen-induced lymphocyte proliferation. Application of the water-salt extract of *Hirudo verbana* reduced the severity of these changes and ensured normalization of both quantitative and functional lymphocyte parameters by day 14 of the experiment. The obtained results confirm the pronounced immunomodulatory potential of the medicinal leech extract during reparative processes.

Key words: lymphocytes, blast transformation, thermal burn, leech extract, immunomodulation

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Метою дослідження було оцінити зміни кількісного вмісту лімфоцитів та реакції бластної трансформації лімфоцитів за спонтанних умов і при стимуляції конканаваліном А в процесі загоєння термічного опіку, а також визначити імуномодулювальний вплив водно-сольового екстракту медичної п'явки (*Hirudo verbana*).

Методологія. Дослідження проведено на експериментальній моделі термічного опіку. Тварин розподілили на інтактну, контрольну (термічний опік без лікування) та дослідну групи, у якій застосовували водно-сольовий екстракт *Hirudo verbana*. Забір матеріалу здійснювали на 0, 3, 7, 14 та 30 добу після травми. Визначали відсотковий вміст лімфоцитів і реакцію бластної трансформації лімфоцитів у спонтанних умовах та після стимуляції конканаваліном А за стандартними імунологічними методиками. Статистичну обробку результатів проводили з використанням критерію Стьюдента.

Наукова новизна. Уперше кількісно охарактеризовано динаміку проліферативної активності лімфоцитів у процесі загоєння термічного опіку за умов застосування водно-сольового екстракту медичної п'явки. Показано, що екстракт сприяє ранньому відновленню КонА-індукованої бластної трансформації лімфоцитів та зменшує тривалість постопікової імунної дисфункції.

Висновки. Термічний опік супроводжується розвитком транзиторної лімфопенії, підвищенням спонтанної проліферації та пригніченням мітоген-індукованої активності лімфоцитів. Застосування водно-сольового екстракту *Hirudo verbana* забезпечує нормалізацію кількісних і функціональних показників лімфоцитарної ланки імунітету вже до 14 доби, що свідчить про його виражений імуномодулювальний ефект.

Ключові слова: лімфоцити, бластна трансформація, термічний опік, екстракт п'явки, імуномодуляція

Introduction

Thermal burn injury induces a complex systemic immune response that influences wound healing and susceptibility to complications such as infection, systemic inflammatory response syndrome (SIRS), and immunosuppression (Burgess et al., 2022). Burns trigger an initial pro-inflammatory phase driven by innate immune cells, followed by compensatory anti-inflammatory mechanisms that may lead to transient impairment of adaptive immunity, including suppression of T-lymphocyte function and reduction in lymphocyte counts (Dincer et al., 2025; Mulder et al., 2022). Quantitative and functional evaluation of lymphocytes, including blast transformation reactions under spontaneous conditions and after stimulation with mitogens such as concanavalin A (ConA), provides crucial insights into the cellular immune status after injury.

The blast transformation reaction of lymphocytes is an established method for assessing proliferative responses of T-cells. Changes in spontaneous and mitogen-induced blast transformation can reflect T-cell responsiveness and is used to detect immunosuppression in pathological conditions (Simon-Molas et al., 2021). In addition, clinical and experimental evidence suggests that severe burns create a prolonged inflammatory milieu, with elevated cytokines and immune cell recruitment, which may delay the resolution of inflammation and impair adaptive immune processes (Mulder et al., 2022).

Natural biologically active compounds with anti-inflammatory and immunomodulatory properties are increasingly studied for their potential to support immune regulation and tissue repair. Medicinal leech (*Hirudo verbana*) saliva and extracts contain diverse bioactive molecules, including anticoagulants, protease inhibitors, and anti-inflammatory peptides, which have been shown to modulate cytokine production and macrophage activation, suggesting a potential immunomodulatory role in injury contexts (Amani et al., 2021; Zakian et al., 2022; Ünal et al., 2023; Ayhan et al., 2024; Aminov et al., 2021,2022,2023,2025;). While these effects have been documented primarily in vitro, their influence on post-burn immune dysregulation

and lymphocyte function is not yet fully characterized.

Therefore, further investigation into both quantitative and functional changes in lymphocytes under the influence of leech-derived extracts during burn healing is essential to clarify their therapeutic potential and mechanisms of action.

The aim of this study was to evaluate changes in the percentage of lymphocytes and the blast transformation reaction of lymphocytes under spontaneous conditions and ConA stimulation during thermal burn healing, and to assess the immunomodulatory effects of a water-salt extract of *Hirudo verbana*.

Materials and methods

Preparation of aqueous-saline leech extract

For the preparation of the aqueous-saline extract, 50 specimens of medicinal leeches (*Hirudo verbana* Carena, 1820) were used. The leeches were bred at the Educational and Research Laboratory of Cellular and Organismal Biotechnology of Zaporizhzhia National University according to technical specifications TU U 05.0-02125243-002:2009 "Medicinal leech" and had a valid sanitary and epidemiological certificate (Ministry of Health of Ukraine No. 05.03.02-06/49982, 12.08.2009).

The final extract concentration was 0.022 mg/mL, and protein content was determined by colorimetric assay using pyrogallol red and molybdate on a Beckman Coulter AU480 biochemical analyzer (Aminov et al., 2025).

Experimental animals and housing conditions

The study included 80 outbred white laboratory rats weighing 260–300 g. Animals were housed individually in standard cages under controlled conditions (temperature 20–25 °C, relative humidity ≤ 55 %, natural light-dark cycle) and fed a balanced diet. Throughout the experiment, no signs of bacterial infection were detected.

Experimental design

Rats were randomly assigned to two groups (n = 40 each):

1. Control group – spontaneous wound healing without treatment;
2. Experimental group – daily topical applications of the aqueous-saline extract of *Hirudo verbana*.

All experimental manipulations complied with the International Guidelines for Biomedical Research Involving Animals, the national Joint Ethical Principles for Animal Experiments (Ukraine, 2001), and Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council (22 September 2010). The protocol was approved by the Bioethics Commission of the Zaporizhzhia National University (protocol no. 1, October 30, 2025).

Thermal burn modeling

Second-degree (II–III) thermal burns were induced on a shaved dorsal area under ketamine anesthesia (50 mg/kg, intraperitoneally). A copper plate (1.6 × 5 cm) heated to 100 °C ± 2 °C was applied for 10 seconds to create a standardized burn injury.

Treatment and sample collection

Treatment began 24 hours after burn induction and was applied once daily until complete healing. Blood samples were collected from the tail vein on days 0 (intact), 3, 7, 14, and 30 after injury.

Peripheral blood lymphocytes were analyzed in whole blood samples without prior cell isolation.

The percentage of lymphocytes was determined using standard hematological analyzers and confirmed by microscopic examination of Giemsa-stained blood smears.

The blast transformation reaction (BTR) was assessed in whole blood under spontaneous conditions and after stimulation with concanavalin A (ConA, 10 µg/mL). Blood samples were incubated at 37 °C for 24 hours, after which the percentage of blast-transformed lymphocytes was determined by cytomorphological analysis of stained blood smears.

Results were expressed as the percentage of lymphocytes and the percentage of blast-transformed lymphocytes.

Statistical analysis

Data are presented as mean ± SD. Comparisons were performed:

Between intact and control groups, and intact and experimental groups at each time point;

Between control and experimental groups at corresponding time points.

Normality was verified with the one-sample Kolmogorov–Smirnov test. Parametric comparisons were conducted using Student's t-test with Bonferroni correction. Analysis was performed using IBM SPSS Statistics 21.0 (IBM, USA). Differences were considered significant at $p < 0.05$.

Results and Discussion

The results of the present study demonstrated that thermal burn trauma significantly altered both the quantitative and functional parameters of peripheral blood lymphocytes. In the control group, lymphocyte percentage significantly decreased by day 3 after injury (61.8 ± 1.2 % vs intact 73.91 ± 1.0 %), indicating early lymphopenia – a hallmark of burn-induced immunosuppression noted in multiple studies of burn immunology (Burgess et al., 2022; Osuka et al., 2024). This early lymphocyte drop reflects the complex systemic immune response triggered by thermal damage, which involves not only inflammatory activation but also regulatory suppression of adaptive immunity (Osuka et al., 2024).

In control animals the spontaneous blast transformation (SP) of lymphocytes increased transiently on day 3, whereas ConA-induced blast transformation showed a marked decrease (11.6 ± 0.8 % vs intact 19.6 ± 1.1 %). Concanavalin A (ConA) is a widely used plant mitogen that induces T-cell proliferation and is considered a robust indicator of lymphocyte functional capacity in immune assays (Simon-Molas et al., 2021). The suppression of ConA-induced blast transformation in the control group is consistent with observed functional impairment of T cell responsiveness early after burn, as part of the mixed compensatory anti-inflammatory response syndrome (CARS) and persistent immunosuppression post-burn (Osuka et al., 2024; Korkmaz, 2023).

Animals treated with the water-salt extract of *Hirudo verbana* showed higher lymphocyte percentages at day 3 (67.9 ± 1.1 %) and improved ConA-stimulated blast transformation (15.8 ± 0.9 %) compared with controls. This suggests that the extract mitigated early post-burn immune suppression, facilitating both preservation of lymphocyte counts and maintenance of proliferative responsiveness. The immunomodulatory potential of leech-derived bioactive compounds has been documented in recent studies showing anti-inflammatory and immune-regulating effects in vitro, including down-regulation of pro-inflammatory cytokine production in activated immune cells (Ayhan et al., 2024).

At later time points (days 7–30), experimental animals continued to demonstrate accelerated restoration of immune parameters compared with controls. By day 30, the experimental group had lymphocyte percentages ($75.2 \pm 0.8 \%$) and ConA-induced blast transformation ($21.3 \pm 1 \%$) exceeding intact values, whereas controls did not fully reach baseline. These trends suggest that the leech extract promotes not only earlier recovery but potentially enhanced adaptive responsiveness beyond normal levels. Such enhanced recovery may involve modulation of inflammatory signaling, attenuation of excessive pro-inflammatory cascades, and support of T-cell regenerative

processes, aligning with broader evidence that persistent systemic inflammation and immune dysregulation are key barriers to immune restoration post-burn (Mulder et al., 2021; Korkmaz, 2023).

Overall, these data support the view that thermal burns induce complex immune changes – initially driven by systemic inflammation and subsequent regulatory suppression – and that immunomodulatory interventions like *Hirudo verbana* extracts may support the restoration of cellular immunity by preserving lymphocyte numbers and functional responsiveness to mitogenic stimulation.

Table 1

Total percentage of lymphocytes and blast transformation reaction of rat blood lymphocytes

Animal group	Lymphocytes, %	Type of lymphocyte stimulation	Blast-transformed lymphocytes, %
Intact	73.91 ± 1.0	Spontaneous	9.3 ± 0.5
		ConA	$19.6 \pm 1.1^*$
Day 3 – Control	$61.8 \pm 1.2^*$	Spontaneous	$13.8 \pm 0.7^*$
		ConA	$11.6 \pm 0.8^*$
Day 3 – Experimental	$67.9 \pm 1.1^*$	Spontaneous	$11.2 \pm 0.6^*$
		ConA	$15.8 \pm 0.9^*$
Day 7 – Control	$65.4 \pm 1.1^*$	Spontaneous	$12.1 \pm 0.6^*$
		ConA	$14.2 \pm 0.9^*$
Day 7 – Experimental	71.8 ± 1.0	Spontaneous	10.1 ± 0.5
		ConA	18.6 ± 1.0
Day 14 – Control	69.1 ± 1.0	Spontaneous	10.6 ± 0.5
		ConA	17.1 ± 1.0
Day 14 – Experimental	74.6 ± 0.9	Spontaneous	9.5 ± 0.4
		ConA	20.9 ± 1.1
Day 30 – Control	71.0 ± 0.9	Spontaneous	9.8 ± 0.4
		ConA	18.0 ± 0.9
Day 30 – Experimental	75.2 ± 0.8	Spontaneous	9.2 ± 0.3
		ConA	21.3 ± 1.0

Note: ConA – blast transformation reaction of lymphocytes with lectin; % – relative value; * – $p < 0.05$, values significantly different from the spontaneous reaction

Conclusions

Thermal burn injury causes suppression of cellular immunity, manifested as decreased lymphocyte counts and impaired T-cell proliferative responses. The aqueous-saline extract of *Hirudo verbana* positively modulates the immune response, supporting both

lymphocyte numbers and functional activity. Treatment with the extract accelerates recovery of cellular immunity, which may contribute to improved wound healing and reduced post-burn complications. Leech-derived extracts have potential as immunomodulatory agents in post-burn therapy, warranting further investigation.

Фінансування / Funding

Робота виконана в рамках науково-дослідного проекту під назвою «Розробка засобу для стимуляції процесів репаративної регенерації при пораненнях та загоєнні ран» (№ 125U000690) та фінансувалася з Державного бюджету України / This work was carried out within the framework of the research project entitled “Development of an agent for stimulating reparative regeneration processes in injuries and wound healing” (No. 125U000690) and was funded by the State Budget of Ukraine.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до автора / Dataset available on request from the author.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Експериментальні процедури були схвалені Комісією з біоетики Запорізького національного університету (№ протоколу: 1 від 30 жовтня 2025 р.) / The experimental procedures were approved by the Bioethics Committee of Zaporizhzhia National University (Protocol No. 1, October 30, 2025).

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів / The author declares no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

- Ali, S. K., & Wunu, A. G. (2025). *A review of bioactive molecules in leech saliva and their medical importance*. Preprints, 2025041943. <https://doi.org/10.20944/preprints202504.1943.v1>
- Amani, L., Motamed, N., Mirabzadeh, A. M., Dehghan, S. M., Malek, M., & Shamsa, F. (2021). Semi-solid product of medicinal leech enhances wound healing in rats. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 16(4), e113910. <https://doi.org/10.5812/jjnpp.113910>
- Aminov, R. (2023). The influence of the water-salt extract of the medicinal leech *Hirudo verbana* Carena, 1820 on the general course of embryogenesis in rats after intraperitoneal administration. *Studia Biologica*, 17(2), 85–94. <https://doi.org/10.30970/sbi.1702.713>
- Aminov, R., & Aminova, A. (2021). Indirect effect of substances of the hemophagous parasite *Hirudo verbana* on the immune system of the host rats. *Annals of Parasitology*, 67(4), 603–610. <https://doi.org/10.17420/ap6704.376>
- Aminov, R., Frolov, A., & Aminova, A. (2022). The effect of the biologically complex of a medical leech active substances on the immunosuppressive state of rats. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 15(2), 257–261. <https://doi.org/10.54319/jjbs/150213>

Aminov, R. F., & Aminova, A. S. (2025). Excisional wound morphological characteristics under the influence of medicinal leech biologically active substances. *Innovative Biosystems and Bioengineering*, 9(3), 3–13. <https://doi.org/10.20535/ibb.2025.9.3.322167>

Aminov, R. F., & Aminova, A. S. (2025). Method for obtaining a water-salt extract of the medicinal leech. *Ukrainian Patent No. 161697*. Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations. (in Ukrainian)

Амінов Р. Ф., Амінова А. С. Спосіб отримання водно-сольового екстракту медичної п'явки. Патент України № 161697. Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій.

Ayhan, H., Sevin, S., Karaaslan, S., & Ayaz, F. (2025). Immunomodulatory effects of medicinal leech saliva extract on in vitro activated macrophages. *Immunologic Research*, 73(1), 9–16. <https://doi.org/10.1007/s12026-024-09575-5>

Burgess, M., Valdera, F., Varon, D., Kankuri, E., & Nuutila, K. (2022). The immune and regenerative response to burn injury. *Cells*, 11(19), 3073. <https://doi.org/10.3390/cells11193073>

Dincer, H. A., Ozsahin, A. G., & Bayraktaroglu, T. (2025). Pan immune inflammation value as a novel marker in burn injury prognostics. *Medicina (Kaunas)*, 61(9), 1705. <https://doi.org/10.3390/medicina61091705>

Jiang, L., Zhu, Y., Zhang, W., Xie, S., Wu, M., Xu, D., Wang, S., Xian, S., Lu, J., Tong, X., Liu, Y., Huang, J., Guo, X., Gu, M., Jin, S., Ma, Y., Huang, R., Ji, S., & Xia, Z. (2024). Scholarly knowledge fundamentals and dynamic research hotspots in the field of burns and immunology: A bibliometric analysis. *Burns*. 50(9), 107220. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2024.07.024>

Korkmaz, H. I., Flokstra, G., Waasdorp, M., Pijpe, A., Papendorp, S. G., de Jong, E., Rustemeyer, T., Gibbs, S., & van Zuijlen, P. P. M. (2023). The complexity of the post-burn immune response. *Cells*, 12(3), 345. <https://doi.org/10.3390/cells12030345>

Mulder, P. P. G., Vlig, M., Fasse, E., Stoop, M. M., Pijpe, A., van Zuijlen, P. P. M., Joosten, I., Boekema, B. K. H. L., & Koenen, H. J. P. M. (2022). Burn injured skin is marked by a prolonged local acute immune response. *Frontiers in Immunology*, 13, 1034420. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.1034420>

Nourigheimasi, S., Amiresmaili, M., & Hosseinpour, M. (2024). Association of inflammatory biomarkers with overall survival in burn patients. *BMC Emergency Medicine*, 24, 88. <https://doi.org/10.1186/s12873-024-00988-x>

Osuka, A., Shigeno, A., Matsuura, H., Onishi, S., & Yoneda, K. (2024). Systemic immune response of burns from the acute to chronic phase. *Journal of Burn Care & Research*, 11(1), e976. <https://doi.org/10.1002/ams2.976>

Rasheed, B. N. (2023). Lymphocytic immune response of children after thermal burn injury. *History of Medicine*, 9(1), 898–901. <https://doi.org/10.17720/2409-5834.v9.1.2023.102>

Simon-Molas, H., Vallvé-Martínez, X., Caldera-Quevedo, I., Fontova, P., Arnedo-Pac, C., Vidal-Alabré, A., Castaño, E., Navarro-Sabaté, À., Lloberas, N., Bartrons, R., & Manzano, A. (2021). TP53 induced glycolysis and apoptosis regulator (TIGAR) is upregulated in lymphocytes stimulated with concanavalin A. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(14), 7436. <https://doi.org/10.3390/ijms22147436>

Ünal, K., Erol, M. E., & Ayhan, H. (2023). Literature review on the effectiveness of medicinal leech therapy in wound healing. *Ankara Medical Journal*, (1), 151–164. <https://doi.org/10.5505/amj.2023.20280>

Bilden, A., Sabancılar, İ., Yalçın Azarkan, S., Karadağlı, K., Kaya, S., Kahraman, M., & Çiçek, M. (2025). Investigating the Therapeutic Potential of Crude Leech Saliva Based on Its Anticancer, Antioxidant, and Anti-Inflammatory Effects. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(5), 328. <https://doi.org/10.3390/cimb47050328>

Zakian, A., Ahmadi, H. A., Keleshteri, M. H., Madani, A., Tehrani-Sharif, M., & Rezaie, A. (2022). Study on the effect of medicinal leech therapy (*Hirudo medicinalis*) on full-thickness excisional wound healing in an animal model. *Research in Veterinary Science*, 153, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2022.10.015>

Received: 14.02.2026. **Accepted:** 02.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Aminov R. Effect of leech extract on lymphocytes in thermal burns. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. P. 121-127. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.10>

Cite this article in APA style as:

Aminov, R. (2026). Effect of leech extract on lymphocytes in thermal burns. *Biota. Human. Technology*, (1), 121-127. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.10>

Information about the authors:

Aminov R. [*in Ukrainian: АМІНОВ Р.*], PhD in Biology, Associate Professor, email: 91_amin_91@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8471-1525

The Laboratory of Cellular and Organismal Biotechnology of The Research Department, Zaporizhzhia National University
66 Universytetska Street, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine

UDC 612.1:613.7:796.012.1

DOI: 10.58407/bht.1.26.11



Copyright (c) 2026 Anna Apetsko, Natalia Kurhaluk, Halina Tkaczenko

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Anna Apetsko, Natalia Kurhaluk, Halina Tkaczenko

RELATIONSHIP BETWEEN RUFFIER INDEX-DERIVED FITNESS LEVELS AND RESTING CARDIOVASCULAR PERFORMANCE IN YOUNG ADULTS

Анна Апецько, Наталія Кургалюк, Галина Ткаченко

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК РІВНЯ ФІЗИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ЗА ІНДЕКСОМ РУФ'Є З ПОКАЗНИКАМИ СЕРЦЕВО-СУДИННОЇ СИСТЕМИ У МОЛОДИХ ДОРОСЛИХ**ABSTRACT**

Purpose of the work. Physical fitness plays a crucial role in cardiovascular health, influencing stroke volume (SV), cardiac output (CO), heart rate (HR), and blood pressure. The Ruffier Index (RI) is a simple, field-based measure of cardiovascular efficiency, but evidence linking RI-assessed fitness to resting SV and CO in young adults is limited. This study aimed to investigate the relationship between RI-derived fitness levels and resting cardiovascular parameters (SV, CO, HR, SBP, DBP) in healthy young adults, and to examine potential sex-specific differences.

Methodology. A cross-sectional study was conducted with 51 healthy students (28 women, 23 men) from Pomeranian University in Słupsk, Poland (mean age: 20.8 ± 4.2 years for women; 19.9 ± 2.9 years for men). Physical fitness was classified using the RI into very good, good, average, and poor categories. Resting SBP, DBP, HR, SV, and CO were measured under standardised conditions. SV was calculated using the Starr formula, and CO was derived from SV × HR. Statistical analyses included ANOVA, post hoc Tukey tests, Pearson correlations, and linear/multivariate regression models with sex and blood pressure as covariates.

Scientific novelty. Most participants demonstrated average fitness, with very good fitness observed only in one male participant. Stroke volume decreased progressively as fitness declined in both sexes, while cardiac output increased among participants with lower fitness, indicating compensatory mechanisms via increased heart rate. Women with poor fitness had the highest resting CO (5485 ± 940 ml/min) and lowest SV (57.4 ± 7.9 ml), while men with poor fitness had CO of 5418 ± 510 ml/min and SV of 63.4 ± 3.1 ml. Significant negative correlations were found between RI and SV (women: $r = -0.52$; men: $r = -0.48$), and moderate positive correlations between RI and CO (women: $r = 0.46$; men: $r = 0.41$). Linear and multivariate regression confirmed RI as a significant predictor of SV and CO ($p < 0.01$). Sex differences were observed, with men exhibiting higher SV and slightly higher SBP.

Conclusions. Higher RI-assessed fitness is associated with greater stroke volume, lower cardiac output at rest, and more efficient myocardial function. Individuals with lower fitness compensate via increased HR, resulting in higher cardiovascular workload. These findings highlight the utility of RI as a practical tool for assessing cardiovascular efficiency in young adults and reinforce the importance of promoting regular physical activity to enhance cardiac function. Future studies should involve larger, longitudinal cohorts and include comprehensive physiological assessments.

Key words: Ruffier Index, physical fitness, stroke volume, cardiac output, resting heart rate, blood pressure, young adults, cardiovascular efficiency

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Фізична підготовка відіграє ключову роль у здоров'ї серцево-судинної системи, впливаючи на ударний об'єм (SV), серцевий викид (CO), частоту серцевих скорочень (HR) та артеріальний тиск. Індекс Руф'є (RI) є простим польовим методом оцінки ефективності серцево-судинної системи, проте дані про взаємозв'язок RI та показників SV і CO у молодих дорослих обмежені. Дослідження було спрямоване на вивчення взаємозв'язку між рівнем фізичної підготовки за RI та показниками серцево-судинної системи у стані спокою (SV, CO, HR, SBP, DBP) у здорових молодих дорослих, а також на виявлення можливих статевих відмінностей.

Методологія. Проведено поперечне дослідження за участю 51 здорового студента (28 жінок, 23 чоловіки) Поморського університету в Слупську, Польща (середній вік: 20,8 ± 4,2 років у жінок; 19,9 ± 2,9 років у чоловіків). Фізична підготовка класифікувалася за RI на категорії «дуже добра», «добра», «середня» та «слабка». Вимірювалися SBP, DBP, HR, SV і CO за стандартизованих умов у стані спокою. SV розраховувався за формулою

Старра, CO – як добуток SV × HR. Статистичний аналіз включав ANOVA, постхок-тести Тьюкі, кореляції Пірсона та лінійні/мультиваріативні регресії з урахуванням статі та артеріального тиску.

Наукова новизна. У більшості учасників спостерігався середній рівень фізичної підготовки, дуже високий – лише у одного чоловіка. У обох статей ударний об'єм знижувався зі зменшенням рівня фізичної підготовки, тоді як серцевий викид зростав у учасників з низькою підготовкою, що свідчить про компенсаторні механізми через підвищення частоти серцевих скорочень. Жінки з слабкою фізичною підготовкою мали найвищий CO у стані спокою (5485 ± 940 мл/хв) та найнижчий SV ($57,4 \pm 7,9$ мл), у чоловіків з слабкою підготовкою CO становив 5418 ± 510 мл/хв, а SV – $63,4 \pm 3,1$ мл. Виявлено значущу негативну кореляцію між RI та SV (жінки: $r = -0,52$; чоловіки: $r = -0,48$) та помірну позитивну кореляцію між RI та CO (жінки: $r = 0,46$; чоловіки: $r = 0,41$). Регресійний аналіз підтвердив RI як значущий предиктор SV та CO ($p < 0,01$). Статеві відмінності виявилися у вищому SV та дещо вищому SBP у чоловіків.

Висновки. Вищий рівень фізичної підготовки за RI асоціюється з більшим ударним об'ємом, меншим серцевим викидом у стані спокою та більш ефективною роботою серця. У осіб з нижчим рівнем підготовки серцевий викид підтримується за рахунок підвищення HR, що збільшує серцево-судинне навантаження. Результати підтверджують корисність RI як простого інструменту оцінки серцево-судинної ефективності у молодих дорослих та підкреслюють важливість регулярної фізичної активності для підтримки серцевої функції. Подальші дослідження мають включати більші когорти та довготривалі спостереження з комплексними фізіологічними вимірюваннями.

Ключові слова: індекс Руф'є, фізична підготовка, ударний об'єм, серцевий викид, частота серцевих скорочень у стані спокою, артеріальний тиск, молоді дорослі, ефективність серцево-судинної системи

Introduction

Physical fitness has a strong influence on cardiovascular health, encompassing the functional capacity of the heart, blood vessels and skeletal muscles to supply oxygen during sustained physical activity. Regular aerobic exercise induces well-documented structural and functional adaptations in the cardiovascular system. These include increased stroke volume (SV), enhanced ventricular compliance, improved diastolic filling and more efficient autonomic regulation of heart rate (HR) (Seo et al., 2023; Dores et al., 2024; Dou, 2026). These adaptations reduce cardiac workload at rest and enhance systemic perfusion during rest and exercise, thereby contributing to long-term cardiovascular resilience (Nystoriak and Bhatnagar, 2018).

Stroke volume (SV) and cardiac output (CO) are key indicators of cardiac efficiency. SV represents the volume of blood ejected by a ventricle during a single contraction, while CO denotes the total volume of blood pumped per minute. Both parameters are influenced by physical fitness level, sex, age, and cardiovascular health status (Bruss and Raja 2022; King and Lowery, 2023). Higher fitness levels are generally linked to higher SV and lower resting HR, indicating more efficient myocardial function and improved oxygen delivery. Conversely, lower fitness levels often lead to compensatory increases in heart rate (HR) to maintain cardiac output (CO), which imposes higher cardiovascular stress and may

reduce cardiac efficiency over time (Stickland et al., 2012; Roh et al., 2016; Nystoriak and Bhatnagar, 2018).

The Ruffier Index (RI) is a practical, field-based method of assessing the cardiovascular response to short-term exercise. It calculates cardiovascular efficiency based on resting heart rate (HR), post-exercise HR and recovery HR, providing a simple measure of aerobic fitness and autonomic cardiac regulation (Guo et al., 2018; Alahmari et al., 2020). Although the RI is widely used in educational and sports settings, evidence linking RI-assessed fitness to resting stroke volume (SV) and cardiac output (CO) in young adults is limited, particularly with regard to potential sex-specific differences in cardiac performance. Understanding these associations is crucial for identifying individuals with suboptimal cardiovascular efficiency and for guiding early interventions to improve cardiovascular health (Horn et al., 2015; Bassareo and Crisafulli, 2020).

This study investigated the relationship between physical fitness, as measured by the RI, and resting cardiovascular parameters (including SV, CO, HR and blood pressure) in healthy young adults. We hypothesised that higher RI-assessed fitness would be associated with greater SV, lower resting CO and improved cardiovascular efficiency overall. We also hypothesised that these relationships might differ between the sexes due to inherent physiological differences in cardiac structure, ventricular compliance and autonomic regulation.

Materials and methods

Study design and participants. This cross-sectional study included 51 participants (28 women and 23 men), all of whom were students at Pomeranian University in Słupsk, Poland. The mean age was 20.8 ± 4.2 years for women and 19.9 ± 2.9 years for men. All participants were healthy and free from known cardiovascular, metabolic or musculoskeletal disorders. They were also not taking any medications that could affect heart rate or blood pressure. They were instructed to avoid caffeine, nicotine and intense physical activity for at least 12 hours prior to testing.

Participants were classified according to their level of physical fitness using the Ruffier Index (RI). Among the women, 32.1 % were classified as having good fitness, 50.0 % as having average fitness, and 17.9 % as having poor fitness. Among the men, 4.3 % demonstrated very good fitness ($n = 1$), 39.1 % demonstrated good fitness ($n = 9$), 47.8 % demonstrated average fitness ($n = 11$), and 8.7 % demonstrated poor fitness ($n = 2$). Overall, most participants exhibited average fitness levels, whereas very good fitness was observed in only one male participant.

Assessment of physical fitness. Physical fitness was evaluated using the RI, which assesses cardiovascular efficiency in response to short-term exercise. The RI was calculated using the formula described by Jastrzębska (2010): $IR = [(P + P1 + P2) - 200] / 10$. Here, IR denotes the Ruffier Index, P represents the resting heart rate, P1 represents the heart rate measured immediately after exercise and P2 represents the heart rate recorded after one minute of recovery. The results were interpreted as follows: 0-0.1 points: very good fitness; 0.1-5.0 points: good fitness; 5.01-10.0 points: average fitness; >10.01 points: poor fitness. Based on the obtained RI values, women and men from different age groups were classified into categories reflecting their level of physical fitness.

Cardiovascular measurements. Resting systolic blood pressure (SBP), diastolic blood pressure (DBP) and heart rate (HR) were measured in standardised resting conditions. All measurements were taken between 8:00 and 11:00 a.m. in a quiet, temperature-controlled room (22-24°C). Participants were seated with their arms supported at heart level throughout the procedure. Each measurement was

repeated three times at one-minute intervals and the mean value was recorded.

Stroke volume (SV), i.e. the volume of blood ejected by one ventricle during a single cardiac contraction, was calculated using the Starr formula: $SV = 90.97 + 0.54 \times \text{pulse pressure} - 0.57 \times \text{diastolic blood pressure} - 0.61 \times \text{age}$. In this formula, pulse pressure is defined as the difference between systolic and diastolic blood pressure, and age is expressed in years. These equations enable the estimation of stroke volume at rest, which reflects the efficiency of the left ventricle during each cardiac cycle.

Cardiac output (CO), which represents the total volume of blood pumped by a ventricle in one minute, is an important indicator of cardiovascular performance. In resting conditions, CO averages approximately 6 litres per minute, though this varies depending on sex, age and physical fitness level. CO is calculated by multiplying SV by HR: $CO = SV \times HR$. This calculation provides an indication of overall cardiac workload and circulatory efficiency at rest, enabling cardiovascular performance to be compared between individuals with different levels of physical fitness. For each participant, SV and CO values are presented as the mean \pm standard deviation (SD).

Statistical analysis. The data were analysed separately for women and men. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to determine the differences in resting systolic blood pressure (SBP), diastolic blood pressure (DBP), heart rate (HR), stroke volume (SV) and cardiac output (CO) across fitness categories. Effect sizes were calculated using eta-squared (η^2) to estimate the proportion of variance explained by fitness level. Post hoc comparisons were performed using the Tukey honest significance difference (HSD) test to identify specific differences between fitness groups. Pearson's correlation coefficients were calculated to assess the association between the Ruffier index and cardiovascular parameters (SV, CO, HR and SBP/DBP). Linear regression analysis was conducted to determine whether the Ruffier index significantly predicted resting stroke volume and cardiac output. A multivariate regression model including sex and blood pressure variables as covariates was also performed to examine independent predictors of cardiovascular performance. Prior to statistical testing, the assumptions of normality

and homogeneity of variances were verified using Shapiro-Wilk and Levene's tests, respectively (Zar, 1999). Statistical significance was set at $p < 0.05$. All analyses were performed using Statistica, version 13.3 (TIBCO, Palo Alto, USA).

Results and discussion

Among the female participants ($n = 30$), the largest proportion (46.7 %) demonstrated an average level of physical fitness, followed by a good level (33.3 %). Meanwhile, 20.0 % were classified as having poor fitness and none achieved a "very good" level according to the Ruffier Index classification. Among the men ($n = 23$), most also demonstrated an average level of

physical fitness (47.8 %), followed by good fitness (39.1 %). A smaller proportion (8.7 %) exhibited poor fitness, while 4.3 % achieved a very good level. Overall, average fitness predominated in both sexes, whereas very good fitness was only observed in men and represented the smallest subgroup. These findings suggest that the studied population was generally characterised by moderate cardiovascular fitness.

Resting systolic blood pressure (SBP), diastolic blood pressure (DBP), stroke volume (SV) and cardiac output (CO) were analysed according to sex and physical fitness level, as determined by the Ruffier Index (RI). The results are summarised in Table 1.

Table 1

Resting systolic blood pressure (SBP), diastolic blood pressure (DBP), heart rate (HR), stroke volume (SV) and cardiac output (CO) according to sex and physical fitness level assessed by the Ruffier Index. Values are presented as mean \pm standard deviation (S.D.)

Sex	Fitness level	n	SBP, mmHg	DBP, mmHg	HR, bpm	SV (ml)	CO (ml/min)
Women	Good	9	111.9 \pm 19.4	66.6 \pm 7.2	71.9 \pm 6.6	63.7 \pm 6.2	4575 \pm 540
Women	Average	14	109.9 \pm 14.0	70.1 \pm 7.7	81.9 \pm 6.0	61.0 \pm 7.3	4820 \pm 810
Women	Poor	5	110.0 \pm 6.9	75.2 \pm 3.6	94.6 \pm 4.7	57.4 \pm 7.9	5485 \pm 940
Men	Very good	1	109.0	76.0	63.0	53.9	3394
Men	Good	9	128.1 \pm 10.6	67.7 \pm 10.8	67.6 \pm 3.5	72.8 \pm 8.6	4870 \pm 720
Men	Average	11	132.4 \pm 24.1	72.0 \pm 9.3	82.3 \pm 8.0	70.1 \pm 9.2	5655 \pm 930
Men	Poor	2	119.5 \pm 0.7	72.0 \pm 1.4	88.5 \pm 6.4	63.4 \pm 3.1	5418 \pm 510

Abbreviation: systolic blood pressure (SBP), diastolic blood pressure (DBP), heart rate (HR), stroke volume (SV), cardiac output (CO)

In women, stroke volume decreased progressively as fitness levels declined. Participants classified as having good fitness had a mean stroke volume (SV) of 63.7 ± 6.2 ml, whereas those with average fitness had slightly lower values (61.0 ± 7.3 ml). The lowest SV values were observed in the poor fitness group (57.4 ± 7.9 ml). This gradual reduction in stroke volume with decreasing fitness level may reflect diminished myocardial efficiency and reduced ventricular filling capacity in individuals with lower levels of cardiovascular conditioning.

Conversely, cardiac output increased with declining fitness levels. Women with good fitness demonstrated a mean cardiac output (CO) of approximately 4575 ml/min, while

those in the average group exhibited 4820 ml/min. The highest values were observed among participants with poor fitness (5485 ml/min). This pattern suggests that individuals with poorer fitness compensate for lower stroke volume by increasing their heart rate in order to maintain adequate systemic perfusion at rest.

A similar pattern was observed in men. Those with good fitness demonstrated relatively high stroke volume values (72.8 ± 8.6 ml), while the average fitness group showed slightly lower values (70.1 ± 9.2 ml). Those with poor fitness exhibited an additional reduction in SV (63.4 ± 3.1 ml). These findings are consistent with the physiological

adaptations that occur in response to regular physical activity, which typically enhance ventricular contractility and stroke volume.

Cardiac output was highest in the average fitness group of men (5655 ± 930 ml/min), followed by the poor fitness group (5418 ± 510 ml/min). Lower values were observed in the good fitness group (4870 ± 720 ml/min). The lower resting cardiac output observed in the good fitness group may reflect greater cardiovascular efficiency, whereby a higher stroke volume enables the heart to maintain adequate circulation with a reduced heart rate.

In women, resting systolic blood pressure remained relatively stable across fitness categories, with only minor differences between groups. However, diastolic blood pressure tended to increase with decreasing fitness, suggesting reduced vascular efficiency in individuals with poorer cardiovascular fitness. Elevated DBP in lower fitness categories may also indicate increased peripheral vascular resistance and reduced arterial compliance.

In men, SBP values were generally higher than in women across most categories, particularly in the average fitness group, where the highest mean values were observed. DBP values in men demonstrated less consistent variation across fitness categories. These sex-related differences in blood pressure parameters are often linked to variations in body composition, hormonal regulation and autonomic cardiovascular control.

A one-way ANOVA revealed a significant effect of physical fitness level on stroke volume in both women ($F_{2,27} = 6.84$, $p = 0.004$, $\eta^2 = 0.34$) and men ($F_{3,19} = 5.26$, $p = 0.008$, $\eta^2 = 0.45$). These effect sizes suggest that fitness level moderately to strongly influences cardiac stroke performance. The relatively high values of the partial eta squared (η^2) suggest that a considerable proportion of the variability in stroke volume can be explained by differences in physical fitness level among the participants.

Similarly, a significant effect of fitness level on cardiac output was observed (women: $F_{2,27} = 7.12$, $p = 0.003$; men: $F_{3,19} = 4.89$, $p = 0.011$). Post hoc Tukey analysis showed that individuals with poor fitness differed significantly from those with good fitness, primarily due to lower stroke volume and compensatory increases in cardiac output. These results suggest that the cardiovascular

adaptations associated with higher fitness levels enable more efficient cardiac function at rest, characterised by a greater stroke volume and a reduced reliance on increased cardiac output.

Sex differences were also observed. Independent sample t-tests revealed that men had significantly higher stroke volumes than women ($p < 0.01$), whereas women had slightly lower SBP values across most fitness categories. This is consistent with the known physiological differences between the sexes, including larger cardiac dimensions, greater blood volume and higher muscle mass, which are typically observed in men. Prior to conducting ANOVA, the assumptions of normality and homogeneity of variances were verified using Shapiro-Wilk and Levene's tests, respectively. All statistical analyses were performed at a significance level of $p < 0.05$.

Pearson's correlation analysis revealed a significant negative correlation between the Ruffier Index and stroke volume in both women ($r = -0.52$, $p = 0.004$) and men ($r = -0.48$, $p = 0.016$). This suggests that lower physical fitness (i.e. higher RI values) is associated with reduced cardiac stroke efficiency. In practical terms, individuals with poorer cardiovascular fitness tend to eject a smaller volume of blood from the left ventricle during each cardiac cycle.

A moderate positive correlation was observed between the Ruffier index and cardiac output (women: $r = 0.46$, $p = 0.012$; men: $r = 0.41$, $p = 0.039$), suggesting that individuals with poorer cardiovascular fitness experience compensatory increases in cardiac workload. This relationship likely reflects the physiological mechanism whereby reduced stroke volume is compensated for by an increase in heart rate in order to maintain adequate systemic blood flow at rest.

No significant correlations were found between the RI and systolic blood pressure in either sex. This suggests that resting SBP may be less sensitive to differences in physical fitness within the studied population, particularly among young or otherwise healthy individuals. The correlation analysis supports the concept that cardiovascular efficiency, as indicated by a higher stroke volume and a lower cardiac workload at rest, is associated with better physical fitness levels.

Linear regression analysis confirmed that the Ruffier Index significantly predicted stroke

volume ($\beta = -0.61$, $p < 0.001$). The model explained 37% of SV variability ($R^2 = 0.37$). This relatively high coefficient of determination indicates that a substantial proportion of the variance in stroke volume can be attributed to differences in physical fitness as assessed by the Ruffier Index. The negative regression coefficient further confirms that higher RI values (indicating lower physical fitness) are associated with reduced stroke volume.

In a multivariate regression model including sex and blood pressure variables, the Ruffier Index remained a significant independent predictor of stroke volume ($\beta = -0.58$, $p < 0.001$) and cardiac output ($\beta = 0.42$, $p = 0.009$). These findings suggest that the association between the Ruffier Index and cardiac function persists even after adjusting for potential confounding variables such as sex and resting blood pressure. The regression analysis highlights the Ruffier Index as an important predictor of resting cardiovascular performance in the studied population.

The present findings demonstrate a clear relationship between physical fitness and cardiovascular performance, particularly with regard to stroke volume and cardiac output. Those in better physical condition exhibited higher stroke volume and lower cardiac output at rest, indicating greater myocardial efficiency. This pattern reflects the well-known physiological adaptation to regular physical activity whereby an increased stroke volume enables the heart to maintain adequate systemic circulation with fewer contractions per minute (González-Alonso et al., 2000; Asrar Ul Haq et al., 2015; Schierbauer et al., 2021).

The observed reduction in stroke volume among less fit individuals may indicate reduced myocardial contractility and lower ventricular filling capacity. Consequently, cardiac output is maintained through compensatory increases in heart rate, thereby increasing the overall cardiac workload. Such compensatory mechanisms are commonly observed in individuals with lower cardiorespiratory fitness and may lead to less efficient cardiovascular regulation at rest (Drzyzga et al., 2021; Farrell and Turgeon, 2023).

These findings are consistent with previous studies demonstrating that aerobic training enhances cardiac stroke volume, ventricular compliance, and autonomic regulation (Farrell and Turgeon, 2023;

Bonganha et al., 2026). This results in improved cardiovascular efficiency and a reduced resting cardiac workload. Regular endurance activity is known to induce structural and functional cardiac adaptations, including increased left ventricular volume, improved diastolic filling, and enhanced parasympathetic regulation of heart rate (Martinez et al., 2021; Epelde, 2024).

The sex differences observed in the present study are also consistent with physiological expectations. Men had higher stroke volume values than women, which is likely due to greater cardiac mass, a higher circulating blood volume, and differences in body composition (Wooten et al., 2021; St Pierre et al., 2022). Additionally, hormonal factors and differences in haemoglobin concentration may contribute to the greater oxygen transport capacity typically observed in men (Haferanke et al., 2025). These results support the idea that higher levels of physical fitness are associated with more efficient cardiovascular function, characterised by a greater stroke volume, a lower resting cardiac workload, and improved haemodynamic regulation (Nystoriak and Bhatnagar, 2018).

Several previous studies have confirmed the effectiveness of the Ruffier or Ruffier-Dickson test in providing a simple assessment of cardiorespiratory fitness (CRF) in young people. A cross-sectional study of college students aged 18-23 demonstrated that most participants had moderate cardiovascular endurance according to the Ruffier-Dickson index. Specifically, nearly half of the subjects were classified as having "average endurance", while only a small proportion achieved "very good" results. These results imply that even among university students specialising in health-related subjects, optimal cardiorespiratory fitness is not universal, emphasising the importance of regularly monitoring and promoting physical activity in this group (Modi and Jain, 2024). The endurance category distribution observed in the study supports the idea that the Ruffier index can identify different levels of cardiovascular efficiency in young adults.

The association between cardiorespiratory fitness and cardiovascular, as well as anthropometric, risk factors has also been widely documented. Alahmari et al. (2020) demonstrated that CRF, as estimated by the Ruffier test, was significantly associated with several physiological and lifestyle-related

variables. In particular, estimated VO_2 max showed an inverse relationship with age, body weight, body mass index, waist circumference, blood pressure and resting heart rate, and a positive correlation with physical activity levels and pulmonary function. Importantly, their multivariable analysis indicated that body weight and resting heart rate were independent predictors of CRF. These findings reinforce the idea that simple, field-based fitness tests can reflect broader physiological processes related to cardiovascular efficiency and metabolic health.

Age-related changes in cardiovascular functional capacity have also been reported among university students. In a study of female students aged 18-22, Chernenko et al. (2022) found that indices of cardiovascular and respiratory performance, such as the Ruffier index and heart rate responses to exercise, differed between academic years. The authors also reported that compensatory cardiovascular mechanisms appeared to be most efficient around the age of 21, as indicated by improved heart rate recovery after exercise. However, the proportion of students with satisfactory Ruffier index values increased with age, while the proportion demonstrating good cardiovascular performance decreased. These findings suggest that lifestyle factors during the university years may influence trajectories of cardiovascular fitness, particularly among female students.

Lifestyle-related factors also play a significant role in determining cardiorespiratory fitness in young adults. A large cross-sectional study of Pakistani university students showed that physical activity level, body weight, body mass index and resting heart rate were significantly associated with CRF, as assessed by the Ruffier-Dickson test (Ehsan and Asim, 2023). The authors emphasised that sedentary behaviours, such as prolonged screen time, can negatively impact cardiovascular fitness, even in otherwise healthy young individuals. These results highlight the importance of considering behavioural factors when interpreting CRF outcomes, and emphasise the value of simple screening tests in identifying individuals at risk of reduced cardiovascular fitness.

Further evidence from younger populations supports the relationship between body composition and cardiorespiratory performance. Studies conducted among

children and adolescents have shown that overweight and obese individuals have significantly lower CRF levels than their normal-weight peers (Sepúlveda et al., 2025). In these groups, lower maximal oxygen consumption, a higher exercise heart rate and poorer recovery responses were observed, as reflected in worse Ruffier and Dickson index scores. Furthermore, individuals with lower CRF exhibited higher energy expenditure and greater perceived exertion during exercise. These findings suggest that excess body mass may increase cardiovascular strain during physical activity and impair recovery efficiency.

A large meta-analysis including more than 5,000 children and adolescents with overweight or obesity also confirmed the beneficial effects of exercise interventions on CRF (Men et al., 2025). This analysis showed that structured exercise programmes significantly improved several indicators of cardiovascular health, including maximal oxygen uptake, systolic and diastolic blood pressure, and resting heart rate. Notably, moderate-to-high-intensity exercise performed at least three times per week was associated with the greatest improvements in CRF. These results support the idea that regular physical activity is one of the most effective ways to improve cardiovascular efficiency and reduce long-term cardiometabolic risk.

These studies suggest that cardiorespiratory fitness is affected by the interplay of various physiological, behavioural and anthropometric factors. The Ruffier and Ruffier-Dickson indices provide a practical and accessible method of evaluating these relationships in large populations, particularly among students and young adults. Their ability to reflect variations in the cardiovascular response to exercise makes them suitable for use in both research and preventive health screening. Several limitations should be considered when interpreting the results. Firstly, some fitness subgroups had relatively small sample sizes, particularly among men with very good or poor fitness levels. This may limit statistical power. This may increase the risk of type II error and reduce the generalisability of the findings to broader populations. Secondly, the cross-sectional design prevents any causal inferences regarding the relationship between physical fitness and cardiovascular parameters. Therefore, the

observed associations should be interpreted as correlational rather than causal.

A further limitation is related to the use of the Ruffier Index as the primary indicator of physical fitness. While it is a practical and widely used field test, it does not provide as precise an assessment of cardiorespiratory fitness as laboratory-based measures such as maximal oxygen uptake (VO_2 max). Future studies should include larger cohorts and longitudinal designs to confirm these findings. In addition, incorporating more comprehensive physiological assessments and controlling for potential confounding factors such as age, body composition and habitual physical activity levels could strengthen future analyses further.

Conclusions

This study clearly shows that there is a strong relationship between physical fitness, as measured by the Ruffier Index, and resting cardiovascular performance in both women and men. Those with higher fitness levels exhibited greater stroke volume and lower cardiac output at rest, indicating more efficient myocardial function and a reduced cardiac workload. Conversely, lower fitness levels were associated with reduced stroke volume and compensatory increases in heart rate, reflecting a higher cardiovascular burden required to maintain adequate systemic perfusion. These findings emphasise the physiological adaptations associated with regular physical activity, such as enhanced ventricular contractility, improved diastolic filling and more effective autonomic regulation of heart rate. The observed sex differences, with men exhibiting higher stroke volumes and slightly higher blood pressure values, align with recognised variations in cardiac mass, circulating blood volume, body composition, and haemoglobin concentration.

Statistical analyses, including ANOVA, correlation, and regression models, consistently confirmed that the Ruffier Index is a significant

predictor of stroke volume and cardiac output, even when adjusting for sex and blood pressure. This emphasises the usefulness of simple, field-based fitness assessments for identifying individuals with suboptimal cardiovascular efficiency.

Despite these important insights, the findings should be interpreted in light of certain limitations. Small sample sizes in some fitness subgroups (particularly men with very good or poor fitness) and the cross-sectional study design limit statistical power and preclude causal inferences. Additionally, while the Ruffier Index is practical, it provides a less precise measure of cardiorespiratory fitness than laboratory-based assessments such as VO_2 max.

Future research should employ larger, longitudinal cohorts and incorporate comprehensive physiological measurements in order to confirm and extend these findings. Nevertheless, this study provides compelling evidence that higher physical fitness is linked to more efficient cardiovascular function. This supports the idea that promoting regular physical activity is a vital strategy for maintaining cardiovascular health and reducing cardiac workload at rest.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude for the support provided through the CRASP and Elsevier scholarships for the increase of research potential of Ukrainian Ph.D. students and academics. Without this support, it would not have been possible to conduct the present research at the Institute of Biology, Pomeranian University in Słupsk. We are deeply grateful for the opportunity to carry out this study in such a stimulating scientific environment, and for the institutional assistance which contributed significantly to the successful completion of this work.

Фінансування / Funding

Це дослідження було підтримано стипендіями CRASP та Elsevier для підвищення дослідницького потенціалу українських аспірантів та науковців, що дозволило реалізувати це дослідження в Інституті біології Поморського університету в Слупську, Польща. Автори висловлюють щире подяку за фінансову та інституційну підтримку, яка зробила це дослідження можливим / This research was supported by the CRASP and Elsevier Scholarships for Increasing the Research Potential of Ukrainian PhD Students and Academics, which enabled the implementation of this study at the Institute of Biology, Pomeranian University in Słupsk, Poland. The authors gratefully acknowledge the financial and institutional support that made this research possible.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Дані, що підтверджують результати цього дослідження, можна отримати у відповідального автора за обґрунтованим запитом / The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Дослідження було проведено відповідно до етичних стандартів Гельсінської декларації та схвалено Комітетом з біоетики при Окружній медичній палаті в Гданську, Польща (номер схвалення KB-2/26). Усі учасники надали письмову інформовану згоду перед участю / The study was conducted in accordance with the ethical standards of the Declaration of Helsinki and was approved by the Bioethics Committee at the District Medical Chamber in Gdańsk, Poland (Approval No. KB-2/26). All participants provided written informed consent prior to participation.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Інформовану згоду було отримано від усіх учасників дослідження. Учасників було повністю поінформовано про мету, процедури та потенційні ризики дослідження, і вони добровільно погодилися на участь / Informed consent was obtained from all subjects involved in the study. Participants were fully informed about the purpose, procedures, and potential risks of the study, and they voluntarily agreed to participate.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори Наталія Кургалюк та Галина Ткаченко є членами редакційної колегії *Biota. Human. Technology*. Вони не брали участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийняття цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Authors Natalia Kurhaluk and Halina Tkaczhenko are the members of the editorial board of *Biota. Human. Technology*. They were not involved in the editorial decision-making, peer review, or acceptance process for this manuscript. The authors have no other conflicts of interest to note.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Автори заявляють, що для створення, редагування або суттєвого перегляду змісту цього рукопису не використовувалися генеративний штучний інтелект (ШІ) або технології на базі ШІ. Усі написання, аналіз та інтерпретація були проведені виключно авторами / The authors declare that no generative artificial intelligence (AI) or AI-enabled technologies were used to create, edit, or substantively revise the content of this manuscript. All writing, analysis, and interpretation were conducted solely by the authors.

References

- Alahmari, K. A., Rengaramanujam, K., Reddy, R. S., Samuel, P. S., Kakaraparthi, V. N., Ahmad, I., & Tedla, J. S. (2020). Cardiorespiratory Fitness as a Correlate of Cardiovascular, Anthropometric, and Physical Risk Factors: Using the Ruffier Test as a Template. *Canadian respiratory journal*, 2020, 3407345. <https://doi.org/10.1155/2020/3407345>
- Asrar Ul Haq, M., Goh, C. Y., Levinger, I., Wong, C., & Hare, D. L. (2015). Clinical utility of exercise training in heart failure with reduced and preserved ejection fraction. *Clinical Medicine Insights. Cardiology*, 9, 1–9. <https://doi.org/10.4137/CMC.S21372>
- Bassareo, P. P., & Crisafulli, A. (2020). Gender Differences in Hemodynamic Regulation and Cardiovascular Adaptations to Dynamic Exercise. *Current cardiology reviews*, 16(1), 65–72. <https://doi.org/10.2174/1573403X15666190321141856>

Bonganha, V., Bonfante, I. L. P., Mateus, K. C. D. S., Gáspari, A. F., Baracat, J., De Rossi, G., Nadruz, W., Cavaglieri, C. R., & Chacon-Mikahil, M. P. T. (2026). Effects of combined training on heart rate variability and cardiac function and structure in individuals with grade 1 obesity. *Physiological reports*, 14(4), e70779. <https://doi.org/10.14814/phy2.70779>

Bruss, Z.S., Raja, A. Physiology, Stroke Volume. [Updated 2022 Sep 12]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK547686/>

Chernenko, S., Muszkiet, R., Dolynnyy, I., Oliynyk, O., & Honcharenko, O. (2022). Impact of Physical Education on Peculiarities of Functional State of 18-22 Year Old Female Students' Cardiovascular and Respiratory Systems. *Journal of Learning Theory and Methodology*, 3(1), 41–45. <https://doi.org/10.17309/jltm.2022.1.06>

Dores, H., Antunes, M., Caldeira, D., & Pereira, H. V. (2024). Cardiovascular benefits of resistance exercise: It's time to prescribe / Benefícios cardiovasculares do exercício de força: está na hora de prescrever. *Revista Portuguesa de Cardiologia*, 43(10), 573–582. <https://doi.org/10.1016/j.repc.2024.02.009>

Dou L. (2026). The impact of aerobic exercise on cardiopulmonary function: A bibliometric and visualization analysis. *Medicine*, 105(6), e47549. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000047549>

Drzyzga, C. J., Bahls, M., Ittermann, T., Völzke, H., Bülow, R., Hammer, F., Ewert, R., Gläser, S., Felix, S. B., Dörr, M., & Markus, M. R. P. (2021). Lower Cardiorespiratory Fitness Is Associated With Right Ventricular Geometry and Function - The Sedentary's Heart: SHIP. *Journal of the American Heart Association*, 10(22), e021116. <https://doi.org/10.1161/JAHA.120.021116>

Ehsan, F., & Asim, M. (2023). Assessment Of Cardiorespiratory Fitness By The Ruffier Dickson Test And Its Correlation With Lifestyle Related Factors: A Cross Sectional Study Among Pakistani Youth. *JPMA. The Journal of the Pakistan Medical Association*, 73(9), 1833–1836. <https://doi.org/10.47391/JPMA.7669>

Epelde F. (2024). Impact of Exercise on Physiological, Biochemical, and Analytical Parameters in Patients with Heart Failure with Reduced Ejection Fraction. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 60(12), 2017. <https://doi.org/10.3390/medicina60122017>

Farrell, C., Turgeon, D.R. Normal Versus Chronic Adaptations to Aerobic Exercise. [Updated 2023 May 29]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK572066/>

González-Alonso, J., Mora-Rodríguez, R., & Coyle, E. F. (2000). Stroke volume during exercise: interaction of environment and hydration. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 278(2), H321–H330. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.278.2.H321>

Guo, Y., Bian, J., Li, Q., Leavitt, T., Rosenberg, E. I., Buford, T. W., Smith, M. D., Vincent, H. K., & Modave, F. (2018). A 3-minute test of cardiorespiratory fitness for use in primary care clinics. *PloS one*, 13(7), e0201598. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201598>

Haferanke, J., Baumgartner, L., Dettenhofer, M., Huber, S., Mühlbauer, F., Engl, T., Oberhoffer, R., Schulz, T., & Freilinger, S. (2025). Sex- and Age-Specific Trajectories of Hemoglobin and Aerobic Power in Competitive Youth Athletes. *Oxygen*, 5(4), 25. <https://doi.org/10.3390/oxygen5040025>

Horn, P., Ostadal, P., & Ostadal, B. (2015). Rowing increases stroke volume and cardiac output to a greater extent than cycling. *Physiological research*, 64(2), 203–207. <https://doi.org/10.33549/physiolres.932853>

Jastrzębska A. (2010). *Testy fizjologiczne w ocenie wydolności fizycznej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

King, J., Lowery, D.R. Physiology, Cardiac Output. [Updated 2023 Jul 17]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470455/>

Martinez, M. W., Kim, J. H., Shah, A. B., Phelan, D., Emery, M. S., Wasfy, M. M., Fernandez, A. B., Bunch, T. J., Dean, P., Danielian, A., Krishnan, S., Baggish, A. L., Eijssvogels, T. M. H., Chung, E. H., & Levine, B. D. (2021). Exercise-Induced Cardiovascular Adaptations and Approach to Exercise and Cardiovascular Disease: JACC State-of-the-Art Review. *Journal of the American College of Cardiology*, 78(14), 1453–1470. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2021.08.003>

Men, J., Yu, Z., An, W., Wang, P., Hou, X., Zhang, Y., Wu, S., Zhu, G., Wang, P., Cui, C., Zhang, Y., Wang, J., Ding, J., & Wang, Y. (2025). Effects of exercise on cardiorespiratory fitness in children and adolescents with overweight and obesity: a systematic review and meta-analysis of 72 randomized controlled trials. *BMC public health*, 25(1), 3899. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-25254-y>

Modi, K., & Jain, S. (2024). A cross-sectional study evaluating cardiorespiratory fitness of college youth using Ruffier Dickson test. *International Journal of Health Sciences and Research*, 14(3), 87–91. <https://doi.org/10.52403/ijhsr.20240315>

Nystoriak, M. A., & Bhatnagar, A. (2018). Cardiovascular Effects and Benefits of Exercise. *Frontiers in cardiovascular medicine*, 5, 135. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2018.00135>

Roh, J., Rhee, J., Chaudhari, V., & Rosenzweig, A. (2016). The Role of Exercise in Cardiac Aging: From Physiology to Molecular Mechanisms. *Circulation research*, 118(2), 279–295. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.115.305250>

Schierbauer, J., Hoffmeister, T., Treff, G., Wachsmuth, N. B., & Schmidt, W. F. J. (2021). Effect of Exercise-Induced Reductions in Blood Volume on Cardiac Output and Oxygen Transport Capacity. *Frontiers in physiology*, 12, 679232. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.679232>

Seo, D. Y., Bae, J.-H., Li, X., & Han, J. (2023). Exercise training and cardiovascular health: Mechanisms, benefits, and therapeutic implications in cardiovascular disease. *Cardiometabolic Syndrome Journal*, 3(2), 123–134. <https://doi.org/10.51789/cmsj.2023.3.e20>

Sepúlveda, C., Monsalves-Álvarez, M., Troncoso, R., & Weisstaub, G. (2025). Children and adolescents with overweight or obesity exhibit poor cardiorespiratory performance and elevated energy expenditure during an exercise task. *PloS one*, 20(7), e0327875. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327875>

St Pierre, S. R., Peirlinck, M., & Kuhl, E. (2022). Sex Matters: A Comprehensive Comparison of Female and Male Hearts. *Frontiers in physiology*, 13, 831179. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.831179>

Stickland, M. K., Butcher, S. J., Marciniuk, D. D., & Bhutani, M. (2012). Assessing exercise limitation using cardiopulmonary exercise testing. *Pulmonary medicine*, 2012, 824091. <https://doi.org/10.1155/2012/824091>

Wooten, S. V., Moestl, S., Chilibeck, P., Alvero Cruz, J. R., Mittag, U., Tank, J., Tanaka, H., Rittweger, J., & Hoffmann, F. (2021). Age- and Sex-Differences in Cardiac Characteristics Determined by Echocardiography in Masters Athletes. *Frontiers in physiology*, 11, 630148. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.630148>

Zar, J. H. (1999). *Biostatistical Analysis*. 4th ed., Prentice Hall, New Jersey, U.S.

Received: 10.03.2026. **Accepted:** 20.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Apetsko A., Kurhaluk N., Tkaczenko H. Relationship between Ruffier index-derived fitness levels and resting cardiovascular performance in young adults. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. P. 128-139. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.11>

Cite this article in APA style as:

Apetsko, A., Kurhaluk, N., & Tkaczenko, H. (2026). Relationship between Ruffier index-derived fitness levels and resting cardiovascular performance in young adults. *Biota. Human. Technology*, (1), 128-139. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.11>

Information about the authors:

Apetsko A. [*in Ukrainian: Апецько А.*]¹, PhD student, email: annaapetsko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2383-4422

Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine
Lecturer, email: annaapetsko@stu.cn.ua

Department of Physical Rehabilitation, Chernihiv Polytechnic National University,
95 Shevchenko Street, Chernihiv, 14030, Ukraine

Tkaczenko H. [*in Ukrainian: Ткаченко Г.*]², Dr. of Biol. Sc., Prof., email: halina.tkaczenko@upsl.edu.pl
ORCID: 0000-0003-3951-9005 Scopus-Author ID: 16032082200

Department of Zoology, Institute of Biology, Pomeranian University in Słupsk
22B Arciszewskiego Street, Słupsk, 76-200, Poland

Kurhaluk N. [*in Ukrainian: Кургалюк Н.*]³, Dr. of Biol. Sc., Prof., email: natalia.kurhaluk@upsl.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4669-1092 Scopus-Author ID: 55520986600

Department of Animal Physiology, Institute of Biology, Pomeranian University in Słupsk
22B Arciszewskiego Street, Słupsk, 76-200, Poland

¹ Study design, data collection, manuscript preparation.

² Study design, data collection, manuscript preparation.

³ Study design, data collection, manuscript preparation.



BIOTA AND ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF ECOSYSTEMS

**БІОТА ТА АНТРОПОГЕННА
ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕКОСИСТЕМ**



UDC 628.4.042:620.925:631.8

DOI: 10.58407/bht.1.26.12



Copyright (c) 2026 Natalia Bublienko, Oksana Salavor, Oksana Nychyk, Olga Togachynska

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Наталія Бублієнко, Оксана Салавор, Оксана Ничик, Ольга Тогачинська
КОМПЛЕКСНА УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ ПЛОДОООВОЧЕВОГО ВИРОБНИЦТВА
ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАНОВОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ



Natalia Bublienko, Oksana Salavor, Oksana Nychyk, Olga Togachynska

COMPLEX DISPOSAL OF FRUIT AND VEGETABLE WASTE
USING METHANE FERMENTATION

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідження метанової ферментації відходів плодоовочевого виробництва, що має три головні аспекти: ліквідація відходів (екологічний), отримання альтернативного виду палива – біогазу (біоенергетичний), отримання біостимулятора росту рослин – дигестату (відновлюване землеробство).

Методологія. Проведені дослідження метанової ферментації відходів плодоовочевого виробництва в мезофільних умовах у періодичному режимі. Для здійснення процесу використано лабораторні установки: метантенк, водяний газгольдер. Визначена інтенсивність газогенерації, якісний склад біогазу. Показники процесу бродіння визначали за стандартними методиками у дослідницькій лабораторії кафедри екології та екоменеджменту НУХТ. Досліджений стимулювальний вплив розчину дигестату на насіння райграсу.

Наукова новизна. У результаті дослідження виявлено, що відходи плодоовочевого підприємства є доступним субстратом для метанового бродіння в періодичному режимі (мезофільні умови). При цьому утворюється біогаз із високим вмістом метану, що робить його цінним альтернативним видом палива. Досліджена можливість використання розчину дигестату для біостимулювання насіння газонних трав (райграсу), що є важливим для розвитку відновлюваного землеробства.

Висновки. Метанова ферментація технологічних відходів плодоовочевого підприємства дає можливість комплексно вирішити кілька проблем: екологічних, енергетичних та аграрних.

У процесі метанової ферментації повністю ліквідується цей тип відходів. Причому утворюється біогаз із високим вмістом метану, що робить його якісним альтернативним енергоресурсом. Зафіксована значна інтенсивність газогенерації; у перерахунку на 1 кг сухих речовин плодоовочевих відходів сумарний вихід біогазу становив 320 дм³. Вміст горючого компоненту – метану – досягав 60–62 %.

Ще один продукт метанового бродіння відходів плодоовочевого виробництва, а саме дигестат, є перспективним для біостимулювання рослин, що є сучасним напрямком відновлюваного землеробства. Біостимульоване насіння характеризувалось прискореним ростом коріння та паростків на 21–28 % та 22–31 %, відповідно. Енергія проростання підвищилась на 20,4 % порівняно з контролем.

Ключові слова: плодоовочеві відходи, метанове бродіння, біогаз, дигестат, стимуляція рослин

ABSTRACT

Purpose of the work. Research into methane fermentation of fruit and vegetable production waste, which has three main aspects: waste elimination (ecological), obtaining alternative fuel – biogas (bioenergy), and plant growth biostimulant – digestate (renewable agriculture).

Methodology. Research on methane fermentation of fruit and vegetable production waste in mesophilic conditions in a periodic mode was conducted. Laboratory installations were used: methane tank, water gasholder. The intensity of gas generation, qualitative composition of biogas were determined. Fermentation indicators were determined using standard methods in the laboratory of the Department of Ecology and Ecomanagement of the NUFT. The stimulating effect of digestate solution on ryegrass seeds was studied.

Scientific novelty. It has been found that fruit and vegetable waste is an available substrate for methane fermentation in a periodic mode (mesophilic conditions). This produces biogas with a high methane content, making it a valuable alternative fuel. The possibility of using a digestate solution for biostimulation of lawn grass seeds (ryegrass), which is important for the development of renewable agriculture, has been investigated.

Conclusions. Methane fermentation of technological waste of a fruit and vegetable enterprise makes it possible to comprehensively solve several problems: environmental, energy and agricultural.

In the process of methane fermentation, this type of waste is completely eliminated. Moreover, biogas with a high methane content is formed, which makes it a high-quality alternative energy resource. A significant intensity of gas generation was recorded; per 1 kg of dry waste, the total biogas yield was 320 dm³. And the content of the combustible component – methane – reached 60–62 %.

Another product of methane fermentation of fruit and vegetable waste, namely digestate, is promising for plant biostimulation, which is a modern direction of renewable agriculture. Biostimulated seeds were characterized by accelerated growth of roots and shoots by 21–28 % and 22–31 %, respectively. Germination energy increased by 20.4 % compared to the control.

Key words: fruit and vegetable waste, methane fermentation, biogas, digestate, plant stimulation

Вступ

Флодоовочева галузь харчової промисловості виробляє широкий асортимент різноманітної консервованої продукції із рослинної сировини. Але підприємства такого профілю характеризуються досить значним тиском на навколишнє природне середовище, перш за все, за рахунок утворення значних обсягів виробничих відходів рослинного походження.

Так, при виробництві соку вихід томатних вичавок досягає 20–40 % до маси початкової сировини, яблучних вичавок – 24–40 %; при виготовленні овочевих консервів відходи від переробки баклажанів і кабачків становлять 10 %, перцю – 25 %, капусти – 20–25 %, моркви – 20 %, буряка – 25 %, зеленого горошку – до 80 % (у вигляді гички та стручків) (Teplitski et al., 2023, Chervotkina et al., 2024, Rajapakshe et al., 2025).

За даними (Taheri & Hosseini, 2025) виробництво й технологічна переробка фруктово-овочевої сировини посідає третє місце в світовій харчовій промисловості за загальною кількістю відходів (до 14,8 %).

Такі відходи містять пектинові речовини, целюлозу, прості вуглеводи, деякі відходи (від переробки горошку тощо) – речовини білкового походження. Причому значну частину відходів переробки рослинної сировини, а саме шкірку, вичавки, насіння, гичку тощо не використовують, а найчастіше викидають на звалища. Кількість невикористаних відходів становить понад 20 % (Nirmal et al., 2023). Це спричиняє погіршення екологічної ситуації як на локальному, так і глобальному рівнях. Потрапляння відходів переробки рослинної сировини у довкілля зумовлює забруднення ґрунтів, підземних вод, поверхневих водойм, змінює оптимальне співвідношення вмісту

біогенних компонентів у ґрунтах тощо. Внаслідок розкладання відходів утворюються газоподібні компоненти, у тому числі парникові гази, що сприяє глобальному потеплінню (Bain et al., 2024, Taheri & Hosseini, 2025).

Нині в світі використовують різні підходи до утилізації відходів консервної промисловості. Це екстрагування пектину із яблучних, апельсинових, вишневих вичавок, відходів баклажанів, отримання антиоксидантів та інших біоактивних сполук (Taheri & Hosseini, 2025). Із фруктових та овочевих відходів отримують полісахаридні та інші екстракти, які надалі використовують для виготовлення емульгаторів, інкапсулюючих агентів, пребіотиків, біорозкладаної упаковки, біопестицидів тощо (Abbasi-Parizad et al., 2023, Gupta et al., 2024, Khan et al., 2024, Ozcan et al., 2024). Такі технології скорочують кількість відходів, але повністю не вирішують проблему, крім того таке виробництво є немасовим і достатньо дороговартістним.

Частину рослинних відходів переробляють на комплексні органо-мінеральні добрива (у суміші із відходами свинокомплексів), компостують для одержання біодобрива (Chervotkina et al., 2024). Але це досить розтягнутий у часі процес, який водночас потребує великих земельних ділянок для компостних куп (Bubliencko et al., 2020).

Останніми роками у світі набирає обертів використання біотехнологій для утилізації відходів харчової та переробної промисловості, сільського господарства, а саме їх анаеробного метанового зброджування (ферментації). Найактивніше розвиваються біотехнології метанової ферментації відходів цукрової промисловості (жом цукрового буряка, багасса цукрової тростини), сільського господарства (солома,

поживні рештки, кукурудзяний силос), тваринництва (гній великої рогатої худоби, свиней, курячий послід тощо) (Boldrin et al., 2016, Şenol et al., 2020, Gómez-Quiroga et al., 2022).

Це пояснюється тим, що метанова ферментація таких відходів є джерелом утворення альтернативного джерела енергії – біогазу, що особливо важливо для України в умовах збройної агресії з боку росії, а також дигестату, що використовують як добриво для сільськогосподарських угідь (Boldrin et al., 2016, Bublenco et al., 2020, Song et al., 2021, Lu & Xu, 2021, Bumharter et al., 2023, Ngabala & Emmanuel, 2024). Також як джерело отримання біогазу увагу дослідників привертають відходи винокурень, фруктових та овочевих решток (Gebresilasie et al., 2025).

Актуальним є дослідження біотехнологічної переробки відходів плодоовочевого виробництва для отримання біогазу як альтернативного палива та дигестату як стимулятора росту рослин. Особливу актуальність має можливість посилення енергонезалежності країни в умовах російсько-української війни.

Мета роботи – дослідження метанової ферментації відходів плодоовочевого виробництва, що має три головні аспекти: ліквідація відходів (екологічний), отримання альтернативного виду палива – біогазу (біоенергетичний), отримання біостимулятора росту рослин – дигестату (відновлюване землеробство).

Завданнями роботи є аналіз стану питання щодо обсягів, характеристик та поширених способів утилізації відходів плодоовочевої промисловості, дослідження процесу метанового бродіння цих відходів, визначення енергопотенціалу відходів, дослідження стимулювальної дії дигестату на рослини.

Об'єктом дослідження в даній роботі були рослинні технологічні відходи плодоовочевого консервного заводу (Черкаська область).

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проведені науковцями кафедри екології та екоменеджменту НУХТ у дослідницькій лабораторії.

Метанове бродіння рослинних відходів проводили у лабораторній установці із

метантенка, корисним об'ємом 3 дм³, й водяного газгольдера для збирання біогазу. Метантенк поміщали у термостат при температурі 40–42 °С, забезпечуючи мезофільний режим бродіння. Саме такі температурні значення достатні і для створення оптимальних умов для метаногенезу, і є менш енерговитратними, ніж термофільний режим. Використано анаеробний активний мул із ЮМБК (Юзефо-Миколаївський біогазовий комплекс, Вінницька область). Цей активний мул являє собою біоценоз різних груп бактерій (гідролітичних, гетероацетогенних, метаногенних).

Для прискорення метанової ферментації таких целюлозовмісних відходів спершу їх механічно подрібнили до фрагментів розміром 1–2 см. Після чого подрібнені відходи замочили (протягом 3-х діб) у водопровідній воді температурою 18–20 °С. Співвідношення рослинних відходів і води становило 1:3.

Контроль процесу метанового бродіння проводили за вмістом сухих речовин, рН, температурою, виходом біогазу, вмістом метану в біогазі. Також здійснювали розрахунок ефективності очищення за сухими речовинами (СР), виходом біогазу відносно початкового вмісту СР (Semenova, 2024).

Вихід біогазу визначали у водяному газгольдері за кількістю води, що була витіснена біогазом із газгольдера в приймальну ємність. Вміст метану і вуглекислого газу, як основних компонентів біогазу, визначали прискореним методом, пропускаючи газову суміш крізь 10 %-й розчин NaOH (Semenova, 2024).

Для контролювання параметра рН був використаний рН-метр AZ-86021. Показники процесу бродіння визначали за стандартними методиками (Semenova, 2024).

Для вивчення впливу дигестату на насіння рослин використаний водний розчин зброженої біомаси з метантенку.

Спершу отримали біологічно активний розчин із дигестату, для чого розвели його водопровідною водою (на 2 см³ дигестату використано 10 см³ води). Насіння райграсу обробляли біоактивним розчином 40 хвилин. Паралельно проведено контрольний

дослід із використанням водопровідної води для замочування насіння.

Після цього рівномірно розподілили оброблене насіння на тонкому шарі промитого дистильованою водою, підсушеного і просіяного піску в чашках Петрі. Попередньо чашки Петрі прокип'ятили 40 хвилин і обробили спиртом.

У кожній чашці Петрі помістили по 25 насінин райграсу. Температура пророщування 20 °С, зволоження насінин – щоденне, помірне, рівномірне. Використовували по три чашки Петрі для обробленого і необробленого насіння.

Контролювали такі показники: висота проростків та довжина коріння; розраховано також показник енергії пророщування досліджуваного насіння (SSTU 4138:2002).

Статистичне оброблення результатів досліджень здійснено з допомогою табличного процесора Microsoft Excel з використанням критерію Стьюдента (статистична достовірність з рівнем значущості $p < 0,05$) (Yakymenko & Melnychenko, 2018).

Результати дослідження та обговорення

Науковці кафедри екології та екоменеджменту Національного університету харчових технологій впродовж багатьох років досліджують екологічно ефективні та економічно привабливі способи утилізації біологічно розкладаних відходів харчової та переробної промисловості, сільського господарства, тваринництва, муніципального господарства тощо.

Попередньо оброблені відходи завантажували у лабораторний біореактор, в якому під впливом мікроорганізмів анаеробного активного мулу відбувався процес метанової ферментації в періодичному режимі.

Температура в анаеробному біореакторі становила 40–42 °С, що відповідає кінцевим показникам мезофільного режиму метанового бродіння.

Результати проведених досліджень представлені на рисунку 1.

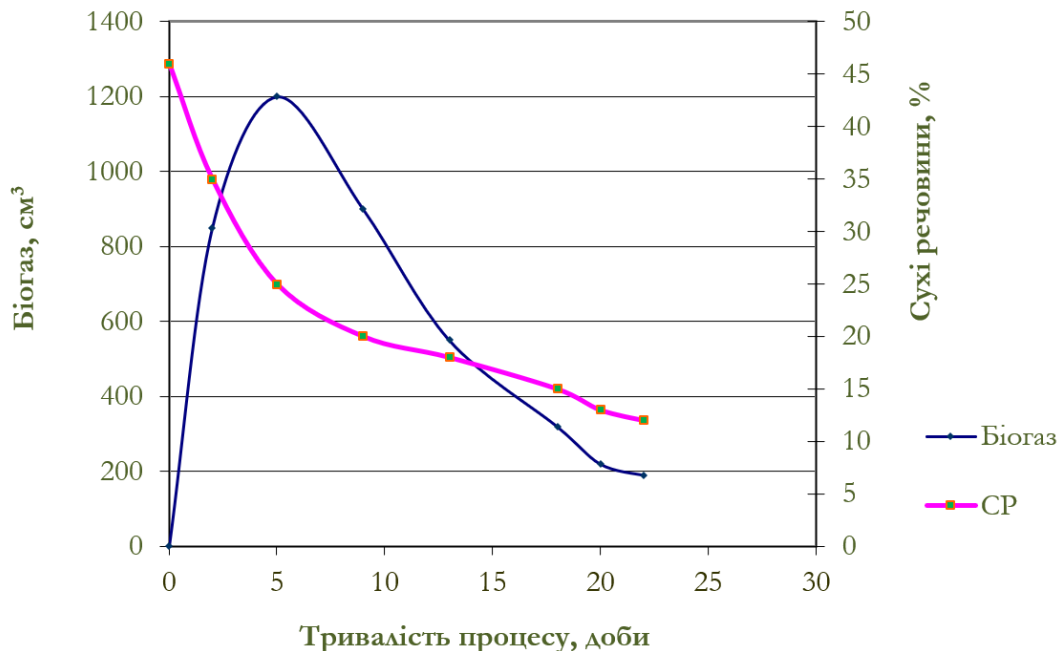


Рис. 1. Зміна основних показників у процесі метанової ферментації відходів плодоовочевого підприємства

Метанове зброджування відходів плодоовочевого виробництва здійснювали протягом 22 діб через високий вміст у субстраті важких до біологічного розкладання складових, перш за все, целюлози.

Протягом усього періоду бродіння відбулось значне зменшення вмісту сухих речовин у субстраті, ефективність їх вилучення досягла 74 %.

pH зброджуваної маси змінюється протягом ферментації, зростаючи від 6,5 до 8,25 одиниць. Це характеризує оптимальний перебіг процесу, без закисання культурального середовища.

Дослідження засвідчили значну інтенсивність газогенерації, у перерахунку на 1 кг сухих речовин плодовоочевих відходів сумарний вихід біогазу становив 320 дм³. Визначення вмісту основних компонентів у біогазі (прискореним методом) підтвердило високий вміст горючого компоненту – метану. Так, протягом усього процесу метанового зброджування вміст метану коливався від 60 до 62 %, а отже генерований біогаз може бути використаний як альтернативний енергоресурс.

На 14–22 доби інтенсивність процесу (біотрансформація сухих речовин відходів у біогаз) суттєво спадає через практично повне використання доступних для організмів анаеробного активного мулу компонентів відходів. І хоча надалі ще спостерігається незначна газогенерація, подальше здійснення процесу не буде економічно доцільним.

Крім біогазу, ще одним важливим активом метанової ферментації відходів плодовоочевої галузі є дигестат. Згідно

даних ряду дослідників (Bublienko et al., 2020, Song et al., 2021, Lu & Xu, 2021) дигестат містить біологічно активні компоненти, є вільний від насіння бур'янів, термочутливих патогенів. Тому перспективним є застосування розчинів дигестату для передпосівного обробітку насіння різних культур стимулюванням його проростання.

Були проведені пошукові дослідження щодо можливості застосування дигестату як стимулятора для проростання насіння газонних трав (райграс газонний сорт Адріана). Райграс широко використовують в екологічних/агрономічних наукових дослідженнях через його швидкий ріст, високу продуктивність. Ця культура є поширеним тест-об'єктом, який активно накопичує азот, ефективно запобігає ерозії, стійкий до механічного впливу.

Біологічно активним розчином, отриманим при розведенні дигестату водопровідною водою, обробляли насіння райграсу 40 хв. Пророщування насіння здійснювали у чашках Петрі в оптимальних температурних умовах із постійним зволоженням.

Через дві доби щоденно здійснювали вимірювання таких параметрів: довжина коріння, висота паростків. Отримані дані представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні параметри проростання насіння

Тривалість процесу пророщування насіння райграсу, діб	Довжина коріння, см		Висота паростка, см	
	наявність біостимулятора	відсутність біостимулятора	наявність біостимулятора	відсутність біостимулятора
1	-	-	-	-
2	0,80	0,65	0,35	0,20
3	1,10	0,75	0,90	0,75
4	1,60	1,20	2,15	1,80
5	2,20	1,35	3,25	2,70
6	2,45	1,70	4,55	4,10
7	2,85	2,10	5,50	5,10
8	3,10	2,25	7,35	6,70

Через три доби від початку дослідження порахували кількість пророслих насінин райграсу, на основі чого розраховували енергію проростання. Останній показник характеризує «дружність» появи нормальних паростків після триденного пророщування і виражається

у відсотках. Енергія проростання для біостимульованого насіння становила 95,5 %, для контрольного дослідження – 76 % (проростання до 24 і 19 насінин на третю добу експерименту, відповідно).

Біостимульоване насіння характеризувалось прискореним ростом корінців та паростків на 21–28 % та 22–31 %, відповідно. Енергія проростання підвищилась на 20,4 % порівняно з контролем.

Аналогічні показники отримані при дослідженні впливу біостимуляторів із дигестату, отриманого при зброджуванні целюлозовмісних відходів цукрової промисловості (жом буряковий) (Bublienko & Semenova, 2021).

Отримані дані свідчать про позитивний стимулювальний вплив розчинів дигестату для передпосівного обробітку насіння та є перспективним для використання у сучасному землеробстві.

Висновки

Метанова ферментація технологічних відходів плодоовочевого підприємства дає можливість комплексно вирішити кілька проблем: екологічних, енергетичних та аграрних.

У процесі метанової ферментації повністю ліквідується цей тип відходів.

Причому утворюється біогаз із високим вмістом метану, що робить його якісним альтернативним енергоресурсом. Зафіксована значна інтенсивність газогенерації; у перерахунку на 1 кг сухих речовин плодоовочевих відходів сумарний вихід біогазу становив 320 дм³. Вміст горючого компоненту – метану – досягав 60 – 62 %. Отриманий біогаз можливо використовувати для отримання теплової чи електричної енергії або ж у когенераційних системах.

Ще один продукт метанового бродіння відходів плодоовочевого виробництва, а саме дигестат, є перспективним для біостимулювання рослин, що є сучасним напрямком відновлюваного землеробства. Використання таких біостимуляторів дасть змогу замінити хімічні добрива та стимулятори росту рослин на екологічні біоактивні розчини. Біостимульоване насіння характеризувалось прискореним ростом корінців та паростків на 21–28 % та 22–31 %, відповідно. Енергія проростання підвищилась на 20,4 % порівняно з контролем.

Фінансування / Funding



Co-funded by the
European Union

За підтримки проєкту програми Еразмус+ Кафедра Жана Моне (101127175 – JM REW – ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH) / Supported by the Erasmus+ Project Jean Monnet Chair (101127175 – JM REW – ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH)

Фінансується Європейським Союзом. Однак висловлені погляди та думки належать лише авторам і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з питань освіти та культури (ЕАСЕА). Ні Європейський Союз, ні ЕАСЕА не несуть за них відповідальності / Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Усі дані представлені безпосередньо в статті. За додатковою інформацією звертайтеся до авторів / All data are presented directly in the article. For additional information, please contact the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI technologies to collect, analyze, or interpret data

References

Abbasi-Parizad, P., Salvino, R.A., Passera, A., Follador, A.R.V., Cosentino, C., Jucker, C., Savoldelli, S., Bacenetti, J., Casati, P., & Scaglia, B. (2023). Development of a cascade production system finalized to the extraction of all-tomatine-rich fraction using the tomato cannery waste as feedstock. *Journal of Cleaner Production*, 401, 136743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136743>

Bain, M., Soligo, D., van der Werf, P., & Parizeau, K. (2024). The limitations of an informational campaign to reduce household food waste at the community scale. *Cleaner Waste Systems*, 9, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100167>

Boldrin, A., Baral, K.R., Fitamo, T., Vazifekhoran, A.H., Jensen, I.G., Kjærgaard, I., Lyng, K.-A., van Nguyen, Q., Skovsgaard Nielsen, L., & Triolo, J. M. (2016). Optimised biogas production from the co-digestion of sugar beet with pig slurry: Integrating energy, GHG and economic accounting. *Energy*, 112, 606–617. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.068>

Bublienکو, N.O., & Semenova, O.I. (2021). Biological utilization of beet pulp using methane fermentation. *Food industry*, 30, 50–57. <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2021-30-7> (in Ukrainian)

Бублієнко Н.О., Семенова О.І. Біологічна утилізація бурякового жому з використанням метанової ферментації. *Харчова промисловість*. 2021. № 30. С. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2021-30-7>

Bublienکو, N.O., Semenova, O.I., Skydan, O.V., Tymoshchuk, T.M., & Tkachuk, V.P. (2020). Biotechnological utilization of fallen leaves. *Scientific horizons*, 2(87), 7–14. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-87-02-7-14> (in Ukrainian)

Бублієнко Н.О., Семенова О.І., Скидан О.В., Тимошук Т.М., Ткачук В.П. Біотехнологічна утилізація опалого листя. *Наукові горизонти*. 2020. № 2 (87). С. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-87-02-7-14>

Bumharter, C., Bolonio, D., Amez, I., Martínez, M.J.G., & Ortega, M.F. (2023). New opportunities for the European Biogas industry: A review on current installation development, production potentials and yield improvements for manure and agricultural waste mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135867>

Chervotkina, O., Prokopenko, O., & Palianychk, N. (2024). Complex use of waste from fruit and vegetable production in fertilizer production. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 14(2). <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-18> (in Ukrainian)

Червоткіна О., Прокопенко О., Паляничка Н. Комплексне використання відходів плодоовочевого виробництва при виробництві добрив. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. 14 (2). <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-18>

Gebresilasie, G.G., Gebreslassie, M.G., & Gebresemati M. (2025). Comparative potential of biogas production from the distillery, fruit and vegetable waste and their mixtures (digestion). *Heliyon*, 11(2), e42068. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42068>

Gómez-Quiroga, X., Aboudi, K., Álvarez-Gallego, C. J., & Romero-García, L.I. (2022). Successful and stable operation of anaerobic thermophilic co-digestion of sun-dried sugar beet pulp and cow manure under short hydraulic retention time. *Chemosphere*, 293, 133484. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133484>

Gupta, R.K., Ali, E.A., Gawad, F.A.E., Daood, V.M., Sabry, H., Karunanithi, S., & Srivastav, P.P. (2024). Valorization of fruits and vegetables waste byproducts for development of sustainable food packaging applications. *Waste Management Bulletin*, 2(4), 21–40. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.08.005>

Khan, R., Anwar, F., Ghazali, F.M., & Mahyudin, N.A. (2024). Valorization of waste: Innovative techniques for extracting bioactive compounds from fruit and vegetable peels – A comprehensive review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 97, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103828>

Lu, J., & Xu, S. (2021). Posttreatment of food waste digestate towards land application. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127033. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127033>

Ngabala, F.J., & Emmanuel, J.K. (2024). Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion-an alternative energy source. *Heliyon*, 10(23), e40632. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40632>

Nirmal, N.P., Khanashyam, A.C., Mundanat, A.S., Shah, K., Babu, K.S., Thorakkattu, P., Al-Asmari, F., & Pandiselvam, R. (2023). Valorization of fruit waste for bioactive compounds and their applications in the food industry. *Foods*, 12(3), 556. <https://doi.org/10.3390/foods12030556>

Ozcan, B.E., Tetik, N., & Aoglu, H.S. (2024). Polysaccharides from fruit and vegetable wastes and their food applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 276(2), 134007. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134007>

Rajapakshe, P., Rathnasinghe, N., Guruge, K., Nilmini, R., Jayasinghe, R., Karunaratne, V., Wijesena, R., & Priyadarshana, G. (2025). Strategies to minimize post-harvest waste of fruits and vegetables: Current solutions and future perspectives. *Journal of Future Foods*, 6(3), 400–412. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2025.04.013>

Seeds of agricultural crops. Methods of determining quality. SSTU 4138:2002. [Valid from 28.12.2002]; State Standard of Ukraine: Kyiv, 2003; p 170. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91465 (in Ukrainian)

Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. ДСТУ 4138:2002. [Чинний від 28.12.2002 р.]; Держспоживстандарт України: Київ, 2003; с 170. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91465

Semenova, O.I. (2024). Environmental technologies and equipment : Laboratory Workshop. Kyiv. NUFT <https://elibrary.nuft.edu.ua/library/DocDownloadForm?docid=412829> (in Ukrainian)

Семенова О.І. Природоохоронні технології та обладнання : Лабораторний практикум. Київ: НУХТ, 2024. 29. <https://elibrary.nuft.edu.ua/library/DocDownloadForm?docid=412829>

Şenol, H., Açıkel, Ü., Demir, S., & Oda, V. (2020). Anaerobic digestion of cattle manure, corn silage and sugar beet pulp mixtures after thermal pretreatment and kinetic modeling study. *Fuel*, 263, 116651. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116651>

Song, S., Lim, J., Lee, J., Cheong, J. Ch., Hoy, Sh.H., Hu, Q., Tan, J. K. N., Chiam, Zh., Arora, Sr., Lum, Ti.Q.H., Lim, E.Y., Wang, Ch.-Hw., Tan, H. T.W., & Tong, Y. W. (2021). Foodwaste anaerobic digestate as a fertilizer : The agronomic properties of untreated digestate and biochar-filtered digestate residue. *Waste Management*, 136, 143 – 152. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.011>

Taheri, S., & Hosseini, S.S. (2025). Waste not, want not: Comprehensive valorization of fruit and vegetable waste from single-product recovery to zero-waste strategies. *Cleaner Waste Systems*, 11, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100300>

Teplitski, V., Touchman, J., Almenar, E., Evanega, S., Aust, D., Yoshinaka, M., & Estes, V. (2023). Bio-based solutions for reducing loss and waste of fresh fruits and vegetables: an industry perspective. *Current Opinion in Biotechnology*, 83, 102971. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102971>

Yakymenko, I.L., & Melnychenko, O.P. (2018). Statistical processing in ecology. Kyiv. <https://elibrary.nuft.edu.ua/library/DocDownloadForm?docid=369919> (in Ukrainian)

Якименко І.Л., Мельниченко О.П. Статистична обробка в екології. Київ: НУХТ, 2018. 53. <https://elibrary.nuft.edu.ua/library/DocDownloadForm?docid=369919>

Received: 06.01.2026. **Accepted:** 18.02.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Бублієнко Н., Салавор О., Ничик О., Тогачинська О. Комплексна утилізація відходів плодоовочевого виробництва із використанням метанової ферментації. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 141-149. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.12>

Cite this article in APA style as:

Bublienko, N., Salavor, O., Nychyk, O., & Togachynska, O. (2026). Kompleksna utylizatsiia vidkhodiv plodoovochevoho vyrobnytstva iz vykorystanniam metanovoi fermentatsii [Complex disposal of fruit and vegetable waste using methane fermentation]. *Biota. Human. Technology*, (1), 141-149. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.12> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Bublienko N. [*in Ukrainian: Бублієнко Н.*] ¹, Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., email: 3110nb@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0299-4646 Scopus-AuthorID: 55683913900
Department of ecology and eco-management, National University of Food Technologies
68 Volodymyrska Street, Kyiv, 01033, Ukraine

Salavor O. [*in Ukrainian: Салавор О.*] ², Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., email: oksanasalavor7@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5784-3127 Scopus-Author ID: 57219904957
Department of ecology and eco-management, National University of Food Technologies
68 Volodymyrska Street, Kyiv, 01033, Ukraine

Nychyk O. [*in Ukrainian: Ничик О.*] ³, Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., email: oksananychyk0710@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4679-8607 Scopus-AuthorID: 57219905601
Department of ecology and eco-management, National University of Food Technologies
68 Volodymyrska Street, Kyiv, 01033, Ukraine

Togachynska O. [*in Ukrainian: Тогачинська О.*] ⁴, Assoc. Prof., Ph.D. in Agricul. Sc., email: tytyn29@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6672-6539
Department of ecology and eco-management, National University of Food Technologies
68 Volodymyrska Street, Kyiv, 01033, Ukraine

¹ Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

² Data collection, manuscript preparation.

³ Statistical analysis, manuscript preparation.

⁴ Data collection, manuscript preparation.

UDC 628.112.3(477.51)

DOI: 10.58407/bht.1.26.13



Copyright (c) 2026. Andrij Kotelchuk, Olena Bondar, Iryna Kurmakova, Leonid Kotelchuk, Svitlana Tkachenko. Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Андрій Котельчук, Олена Бондар, Ірина Курмакова,
Леонід Котельчук, Світлана Ткаченко

ЯКІСТЬ ПІДЗЕМНИХ ВОДОЗАБОРІВ НІЖИНЬСЬКОГО РАЙОНУ ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ



Andrij Kotelchuk, Olena Bondar, Iryna Kurmakova,
Leonid Kotelchuk, Svitlana Tkachenko

QUALITY OF GROUNDWATER INTAKES OF VILLAGES NIZHYN DISTRICT (CHERNIGIV REGION)

АНОТАЦІЯ

В роботі досліджено зразки водозаборів підземних вод селищ (с. Дмитрівка, с. Козацьке, с. Кропивне, с. Кобижча, с. Макіївка, с. Марківці) Ніжинського району Чернігівської області. Зразки води для дослідження відібрані в осінній період 2024 та 2025 р.р. (глибина водозаборів 100-140 метрів).

Мета роботи. Дослідити особливості складу води водозаборів селищ Ніжинського району Чернігівської області, визначити відповідність нормативним показникам для науково-обґрунтованого вирішення проблеми забезпечення населення якісною питною водою.

Методологія. Загальноприйнятими методами визначено органолептичні (запах, забарвленість, каламутність), основні фізико-хімічні (рН, загальна жорсткість, загальна лужність, сухий залишок) та мікробіологічні (загальне мікробне число, наявність *E.coli* та ентерококів) показники зразків води. Також встановлена концентрація катіонів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} та Fe^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Al^{3+} , Mo^{2+} , Na^{+} та K^{+} , NH_4^{+}) та аніонів (HCO_3^{-} , F^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_2^{-} , NO_3^{-} , PO_4^{3-}). Одержані результати порівняні з нормативними значеннями, зокрема ДСанПін 2.2.4-171-10.

Наукова новизна полягає в проведенні ґрунтового аналізу водозаборів підземних вод селищ Ніжинського району Чернігівської області.

Висновки. Для вирішення проблеми забезпечення населення Ніжинського району Чернігівської області якісною питною водою, яка прозора, некаламутна, не забарвлена, з хорошими органолептичними ознаками, відповідним чинним нормативам фізико-хімічними та мікробіологічними показниками, не справляє негативного впливу на нервово-психічний стан людини, вживання якої є корисним необхідно більш детальне дослідження складу води, постійний розширений моніторинг, застосування сучасних технологій водопідготовки, які враховують особливості її складу. При цьому слід застосовувати індивідуальний підхід, як єдине правильне технічне рішення, оскільки вода з водозаборів має унікальний хімічний профіль.

Ключові слова: водозабір, підземна вода, органолептичні показники, фізико-хімічні показники, мікробіологічні показники

ABSTRACT

The study examined groundwater intakes in the villages of Dmitrivka, Kozatske, Kropyvne, Kobizhcha, Makiyivka, and Markivtsi in the Nizhyn district of the Chernihiv region. Water samples for research were collected in the autumn of 2024 and 2025 (water intake depth 100-140 meters).

Purpose of the work. To study the composition of water from water intakes in settlements of the Nizhyn district of the Chernihiv region, to determine compliance with regulatory indicators for a scientifically sound solution to the problem of providing the population with high-quality drinking water.

Methodology. Organoleptic (smell, color, turbidity), basic physicochemical (pH, total hardness, total alkalinity, dry residue), and microbiological (total microbial count, presence of *E. coli* and enterococci) indicators of water samples were determined using generally accepted methods. The concentration of cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} and Fe^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Al^{3+} , Mo^{2+} , Na^{+} and K^{+} , NH_4^{+}) and anions (HCO_3^{-} , F^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_2^{-} , NO_3^{-} , PO_4^{3-}) was also determined. The results obtained were compared with the normative values, in particular ДСанПін 2.2.4-171-10.

The scientific novelty lies in conducting a thorough analysis of groundwater intakes in the settlements of the Nizhyn district of the Chernihiv region.

Conclusions. To solve the problem of providing the population of the Nizhyn district of the Chernihiv region with high-quality drinking water that is transparent, not cloudy, not colored, with good organoleptic characteristics, corresponding to current standards for physical, chemical, and microbiological indicators, and does not have a negative impact on the nervous and mental state of humans, and is beneficial to consume, it is necessary to conduct a more detailed study of the composition of the water, constant expanded monitoring, and the use of modern water treatment technologies that take into account the peculiarities of its composition. In this case, an individual approach should be applied as the most suitable technical solution, since the water from water intakes has a unique chemical profile.

Keywords: water intake, groundwater, organoleptic indicators, physicochemical indicators, microbiological indicators

Вступ

Питання моніторингу підземних водозаборів є актуальним у межах реалізації Водної стратегії України до 2050 року та інтеграції з водними директивами Європейського Союзу. Особливої актуальності набуває питання відповідності якості води нормативним вимогам у воєнний час, оскільки підземні води є стратегічним джерелом питного водопостачання населення (Hienova et al., 2023).

Чернігівська область майже повністю забезпечує населення питною водою саме з підземних джерел, використовуючи водоносні горизонти крейдяних, палеогенових, неогенових та четвертинних відкладів. Чернігівщина, як прикордонна область, зазнала суттєвого впливу на екосистему бойових дій, що поставило питання ґрунтового дослідження якості питної води. Згідно обласної програми «Питна вода Чернігівської області на 2022–2026 роки» пріоритетними напрямками є будівництво та реконструкція водозабірних споруд, впровадження систем доочищення води, що також потребує оцінки якості водозаборів.

Моніторинг якості питної води є надзвичайно актуальним, оскільки ця проблема має відношення до здоров'я та якості життя людства (Luvhimbi et al., 2022), а фізико-хімічні властивості природної води змінюються під різними впливами (Gianni et al., 2025). Визначається виснаження водних ресурсів у водоносних горизонтах країн Африки, Євразії, Америки (Khilchevskiy, 2020).

Згідно з даними сучасних досліджень проблема високої концентрації заліза в ґрунтових водах в різних країнах світу, що робить її непридатною до вживання, викликає корозію водогонів, замулення колодязів (Ye et al., 2020).

Крім даної проблеми в Україні досліджується проблема забруднення свердловин внаслідок активних військових дій (Matviichuk et al., 2023)

Зокрема встановлено, що певна кількість свердловин в Херсонській та Дніпропетровській областях стали непридатними через забруднення підземних горизонтів внаслідок не контрольованого потрапляння забруднюючих речовин у відкритий ґрунт (Manoiu et al., 2026).

Хімічний аналіз ґрунтових вод (Запорізька область) виявив значне забруднення нітратами важких металів горизонтів на глибинах 5 та 14 метрів (Kovalov et al., 2025).

Метою роботи було дослідити особливості складу води водозаборів селищ Ніжинського району Чернігівської області, визначити відповідність нормативним показникам для науково-обґрунтованого вирішення проблеми забезпечення населення якісною питною водою.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження зразків води з водозаборів селищ Ніжинського району Чернігівської області проводили в осінній період 2024 та 2025 р.р. Зразки води відбирали з водозаборів селищ (с. Дмитрівка, с. Козацьке, с. Кропивне, с. Кобижча, с. Макіївка, с. Марківці) Ніжинського району Чернігівської області.

Водозабірні свердловини розміщені на території, що в геоструктурному відношенні знаходиться в межах північно-західної частини Дніпровсько-Донецької западини між Воронезьким щитом на півночі і Українським щитом на півдні та характеризується складною геологічною будовою. Всі водозабірні свердловини побудовані на водоносний горизонт в еоценових відкладах (P2). Наявність водотриву в покрівлі обумовлює напірний характер підземних вод і

надійну захищеність від поверхневого забруднення. Представлений водоносний горизонт кийвською, бучацькою і канівською світами. Водомісткі породи представлені пісками бучацької і канівської світ. Найбільш водозбагачені відклади бучацької світи, потужність яких не перевищує 20,0 м.

Визначали органолептичні (запах при 20 °С та при 60 °С, смак, забарвленість, каламутність), фізико-хімічні (рН, сухий залишок, окислюваність перманганатна, загальна жорсткість, загальна лужність, вміст в мг/дм³ катіонів та аніонів) мікробіологічні (загальне мікробне число, наявність *E.coli* та ентерококів) показники зразків води (Malyna et al, 2014).

Органолептичні показники оцінювали згідно ДСТУ EN 1420-1:2004. Для характеристики інтенсивності запаху води використовували п'ятибальну шкалу: 0 (без запаху)...5 (дуже сильний). Забарвленість води в градусах визначали згідно ДСТУ EN ISO 7887:2025. Для вимірювання каламутності використовували набір суспензій у дистильованій воді з вмістом білої глини від 0,1 до 0,5 мг/дм³ (імітуюча каолінова шкала).

Мікробіологічні показники визначали згідно з МВ 10.2.1.-113-2005.

рН зразків води вимірювали з застосуванням рН-метра MW 804 виробництва «Milwaukee» (Bila et al, 2020). Сухий залишок визначали гравіметричним методом з 50 см³ проби води при температурі 105 °С згідно МВВ 081/12-0109-03, окиснюваність перманганатну – МВВ 081/12-0016-01.

Загальну жорсткість води визначали згідно з ДСТУ ISO 6059-2003 методом комплексонометрії: титрант – 0,01н розчину трилону Б; індикатор – хромоген чорний. Загальну лужність (карбонатна жорсткість) та концентрацію йонів HCO₃⁻ визначали методом прямої ацидиметрії за ДСТУ ISO 9963-1:2007: аліквоту води (100 мл) титрували 0,01н розчином хлоридної кислоти в присутності метилового оранжевого.

Вміст катіонів та аніонів визначали згідно нормативної документації: Ca²⁺ (ДСТУ ISO 6058:2003), Mg²⁺ (ДСТУ ISO 6059:2003), Fe²⁺ та Fe³⁺ (ДСТУ ISO 6332:2003), Mn²⁺ (МВВ 081/12-0107-03), Zn²⁺ (МВВ 081/12-0173-05), Cu²⁺ (ДСТУ 7525:2014), Al³⁺ (ДСТУ ISO

10566:2017), Mo²⁺ (ДСТУ 7525:2014), Na⁺ та K⁺ (з використанням йон-селективних електродів), NH₄⁺ (ДСТУ ISO 7150-1:2003), F⁻ (ДСТУ 7525:2014), SO₄²⁻ (ДСТУ EN ISO 5667-6:2025), Cl⁻ (ДСТУ ISO 7393-3:2004), NO₂⁻ (ДСТУ ISO 6777:2003), NO₃⁻ (ДСТУ 7525:2014), PO₄³⁻ (ДСТУ ISO 6878:2008).

Кількість паралельних вимірювань при визначенні кожного показника становила 3. Статистичну обробку даних проводили з використанням комп'ютерної програми Microsoft Excel загальноприйнятими методами варіаційної статистики з використанням t-критерію Стьюдента (Tarasova, 2008). Відносна похибка для наведених значень показників не перевищує 5-10 %.

Результати дослідження та обговорення

Органолептичні та мікробіологічні показники водозаборів підземних вод селищ (с. Дмитрівка, с. Козацьке, с. Кропивне, с. Кобижча, с. Макіївка, с. Марківці) Ніжинського району Чернігівської області представлені в табл. 1. Такі органолептичні показники, як запах і забарвленість води, знаходяться у межах норми.

Показник каламутності водозаборів с. Марківці, с. Макіївка, с. Козацьке перевищує нормативне значення в 1,46; 1,19 та 1,80 рази відповідно. Найбільш каламутна вода з водозабору с. Козацьке. Як відомо, підвищена каламутність може бути зумовлена природними, кліматичними, біологічними та антропогенними факторами. У зазначених селищах підземна вода знаходиться в горизонтах де переважають піщані породи. До утворення мутності може приводити наявність у воді розчиненого заліза, марганцю або гумінових кислот, які при контакті з киснем повітря окислюються.

Значна кількість розчинного заліза сприяє розвитку залізобактерій, життєдіяльність яких підвищує каламутність. Також, враховуючи інтенсивну сільськогосподарську діяльність у Ніжинському районі можливо просочування добрив через ґрунтові масиви, що може змінювати склад води на глибині до 30 м. Процес замулення підземних вод може посилюватися при зміні температурного режиму та режиму опадів.

Таблиця 1

Органолептичні та мікробіологічні показники водозаборів

Показник	с. Дмитрівка	с. Кобижча	с. Марківці	с. Макіївка	с. Козацьке	с. Кропивне	Норматив ДСанПін 2.2.4-171-10
Запах при 20 °С, бали	0	2 хлор	0	0	2	2	≤ 2
Запах при 60 °С, бали	0	1 - 2	0 - 1	0	1	1	≤ 2
Забарвленість, град	1,2	10,7	18,5	15,8	18	15	≤ 20
Каламутність, мг/дм ³	1,85	0,97	2,19	1,79	2,7	2,2	≤ 1,5
Загальне мікробне число, КУО/см ³	3	0	14	1	5	4	≤ 50

Загальне мікробне число досліджених водозаборів не перевищує нормативне значення (табл.1). Оскільки воно є орієнтовним і показує всі мікроорганізми, що знаходяться в пробі води, оцінювали

наявність патогенних бактерій *E.coli* та ентерококи у досліджених зразках водозаборів не виявлені.

Основні фізико-хімічні показники представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Основні фізико-хімічні показники

Показник	с. Дмитрівка	с. Кобижча	с. Марківці	с. Макіївка	с. Козацьке	с. Кропивне	Норматив ДСанПін 2.2.4-171-10
pH	6,87	7,09	7,39	7,41	7,29	7,18	6,5 – 8,5
Загальна жорсткість, ммоль/дм ³	6,19	4,37	2,98	2,3	3,38	4,8	< 7
Вміст Ca ²⁺ , мг/дм ³	80,80	50,98	37,5	23,6	56,95	74,63	-
Вміст Mg ²⁺ , мг/дм ³	27,36	23,1	14,0	14,0	6,7	13,4	-
Залізо загальне (Fe ²⁺ , Fe ³⁺), мг/дм ³	1,11	0,79	0,88	0,17	0,48	1,31	< 0,2
Лужність, ммоль/дм ³	7,18	8,26	8,06	8,25	9,6	6,9	-
Вміст HCO ₃ ⁻ мг/дм ³	438,12	504	491,8	503,4	585,8	421,0	-
Окислюваність перманганатна, мг/дм ³	1,83	2,0	3,0	1,75	2,41	2,08	≤ 5
Сухий залишок, мг/дм ³	368	597	513	542	617	407	≤ 1000

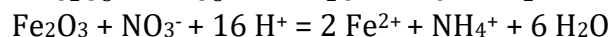
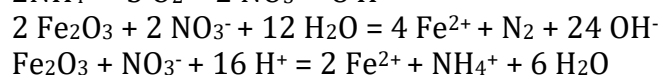
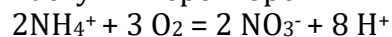
Примітка: «-» показник не входить до ДСанПін 2.2.4-171-10

Слід зазначити, що показник загальної жорсткості, крім нормативних вимог, важливий для врахування господарсько-побутових інтересів населення, яке уникає користуватися водою з високою жорсткістю,

тому що в такій воді погано розварюються м'ясо та овочі, збільшуються витрати мила, погіршується якість прання білизни, спостерігається подразнення шкіри внаслідок утворення нерозчинних речовин.

Аналіз наведених даних свідчить, що з нормованих показників рН, загальна жорсткість, окислювальність перманганатна і сухий залишок відповідають ДСанПін 2.2.4-171-10. При цьому фіксується перевищення по вмісту загального заліза (до 5,55 рази, с. Дмитрівка). Лише зразок води з с. Макіївка містить допустиму кількість йонів Fe^{2+} та Fe^{3+} . При дослідженні концентрації загального заліза в підземних водах Кіптівської сільської територіальної громади Чернігівського району нами також було встановлено перевищення гранично допустимої концентрації в 1,25-19,0 разів (Kotelchuk et al., 2025). Це узгоджується з загальною тенденцією збільшення заліза у водних джерелах в останні роки у більшості частинах світу, яку відмічають (Peter et al., 2019).

Згідно (Jia et al., 2017) накопиченню йонів Fe^{2+} у підземних водах за наявності у ґрунтах ферум(III) оксиду можуть сприяти наступні перетворення:



Хоча промислових покладів руди, що містить ферум(III) оксид, в Ніжинському районі немає, розсіяне залізо у складі пісків та глин, як відомо, є типовим для геології Полісся, що робить запропоновані перетворення вірогідними. В той же час Ніжинський район багатий на торфовища. Органічні речовини та гумінові кислоти, що вимиваються з торфу, сприяють переходу заліза у розчинну форму та його накопиченню у верхніх водоносних шарах.

Звертає увагу високі значення показника загальна жорсткість (табл. 2). Результати вказують, що вміст інших катіонів, які титруються з трилоном Б, на рівні з вмістом йонів Ca^{2+} та Mg^{2+} і становлять 49 % від загальної жорсткості. Зокрема для зразка с. Дмитрівка вміст інших катіонів становить 3,01 ммоль/дм³, с. Кобижча – 2,12 ммоль/дм³, с. Марківці – 1,45 ммоль/дм³, с. Макіївка – 1,13 ммоль/дм³, с. Козацьке – 1,67 ммоль/дм³, с. Кропивне – 2,34 ммоль/дм³. Як відомо, трилон Б утворює також стійкі водорозчинні комплекси з багатьма багатовалентними катіонами

металів, зокрема з іонами Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} та іншими, зв'язуючи їх у співвідношенні 1:1.

Тому подальші дослідження були спрямовані на більш широке визначення катіонного складу зразків води.

Результати дослідження вмісту катіонів, які входять до переліку нормованих в ДСанПін 2.2.4-171-10, представлені в табл. 3. Звертає увагу підвищений вміст йонів амонію, що може вказувати на небіологічне відновлення NO_3^- з утворенням розчинного заліза (Fe^{2+}) і надлишку NH_4^+ , як зазначено вище.

Підвищений вміст йонів Mn^{2+} , що виявлено практично для всіх зразків, є небезпечним, оскільки вони накопичується в організмі та уражають нервову систему, печінку, нирки, серце, легені, кістки. Аналогічні результати (перевищення гранично допустимої концентрації в 1,2-8,2 рази) були одержані нами раніше для Кіптівської територіальної громади (Kotelchuk et al., 2025).

Враховуючи, всі одержані результати по кількості йонів металів, які осаджуються трилоном Б, можна зробити висновок, про наявність у воді інших йонів, які не були досліджені, наприклад таких як Pb^{2+} , Hg^{2+} . Вірогідність такого забруднення узгоджується з даними, що станом на січень 2026 року, у промислових зонах до 86 % проб підземних вод можуть мати ознаки забруднення йонами важких металів, серед яких миш'як, марганець та свинець є основними факторами ризику (Manoïu et al., 2026).

Результати аналізу вмісту аніонів у селах Ніжинського району представлено у табл. 4. Звертає увагу відхилення від нормативного вмісту фторид йонів як у бік недостачі, так і у бік надлишку. Як відомо, основними наслідками дефіциту F^- є: передчасне руйнування зубів, розвиток остеопорозу, уповільнення обмінних процесів. Але, якщо дефіцит цих йонів може бути компенсованим шляхом оздоровчого харчування, то надлишок F^- призводить до негативних наслідків у вигляді флюорозу, впливу на інтелект та порушення роботи щитоподібної залози.

Таблиця 3

Вміст катіонів у зразках води водозаборів Ніжинського району

Показник	с. Дмитрівка	с. Кобижча	с. Марківці	с. Макіївка	с. Козацьке	с. Кропивне	Норматив ДСанПін 2.2.4-171-10
Mn ²⁺ , мг/дм ³	0,26	0,1	0,05	0,08	0,2	0,18	≤ 0,05
Zn ²⁺ , мг/дм ³	0,19	0,11	0,24	0,01	0,07	0,094	≤ 1
Cu ²⁺ , мг/дм ³	0,02	0,04	0,02	0,01	0,03	0,02	≤ 1
Al ³⁺ , мг/дм ³	<0,03	0,07	<0,03	<0,03	0,072	0,1	< 0,2
Mo ²⁺ , мг/дм ³	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	≤ 0,07
Na ⁺ , K ⁺ мг /дм ³	26,14	124,3	140,6	160,7	143,2	53,1	≤ 200
NH ₄ ⁺ , мг /дм ³	0,42	0,86	0,73	0,64	0,67	0,57	≤ 0,5

Таблиця 4

Вміст аніонів у зразках води водозаборів Ніжинського району

Показник	с. Дмитрівка	с. Кобижча	с. Марківці	с. Макіївка	с. Козацьке	с. Кропивне	Норматив ДСанПін 2.2.4-171-10
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	3,66	0,23	0,12	<0,05	0,13	4,72	≤ 250
Cl ⁻ , мг/дм ³	5,05	56,6	39,4	38,5	64	7,5	≤ 250
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	0,019	0,017	0,007	0,012	0,014	0,007	≤ 0,05
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	≤ 50
Поліфосфати, PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	≤ 3,5
F ⁻ , мг /дм ³	0,58	0,63	0,32	1,57	1,46	0,42	0,7...1,2

Висновки

Вода з водозаборів Ніжинського району Чернігівської області прозора, некаламутна, з хорошими органолептичними ознаками і за мікробіологічними показниками відповідає чинним нормативам. В той же час вона характеризується підвищеною каламутністю та концентрацією загального заліза, яка більше за нормативні значення в 1,25-19,0 разів. Також виявлено підвищений вміст катіонів

Mn²⁺ (до 4 кратного) та амонію і відхилення як у бік низьких (до 2 разів), так і перевищених (до 1,3 раза) концентрацій фтори-йонів. Це вказує на необхідність постійного моніторингу та застосування сучасних технологій водопідготовки, які враховують особливості складу водозаборів.

При цьому слід застосовувати до кожного джерела індивідуальне технічне рішення, оскільки вода з водозаборів має унікальний хімічний профіль.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори Олена Бондар та Ірина Курмакова є членами редакційної колегії Biota. Human. Technology. Вони не брали участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийняття цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Authors Olena Bondar and Iryna Kurmakova are the members of the editorial board of Biota. Human. Technology. They were not involved in the editorial decision-making, peer review, or acceptance process for this manuscript. The authors have no other conflicts of interest to note.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Bila, T.A., Liashenko, Ye.V., & Okhrimenko, O.V. (2021). Potentiometric method of determining the pH of surface waters. *Aquatic bioresources and aquaculture*, 1, 228-234. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.17> (in Ukrainian).

Біла Т.А., Ляшенко Є.В., Охріменко О.В. Потенціометричний метод визначення рН поверхневих вод. Водні біоресурси та аквакультура. 2021. Вип. 1. С. 228-234. DOI: <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.17>

Gianni, E., & Papazotos, P. (2025). Research Progress in Groundwater Contamination and Treatment *Environments*, 12(11), 419. <https://doi.org/10.3390/environments12110419>

Hienova A., Bigdan S., Shmandiy V., Kharlamova O., Rigas T. (2023). Implementation of an integrated monitoring system to ensure the environmental safety of water resources. *Technogenic and ecological safety*, 13(1/2023), 27–30. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2023.1.4> (in Ukrainian).

Реалізація інтегрованої системи моніторингу задля забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів / A.V. Генова, С.А. Бігдан, В.М. Шмандій, та ін. *Техногенно-екологічна безпека*. 2023. Вип. 13(1). С. 27-30. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2023.1.4>

Jia Y., Guo, H., Xi, B., Jiang, Y., Zhang, Z. & Yuan, R. (2017). Sources of groundwater salinity and potential impact on arsenic mobility in the western Hetao basin, Inner Mongolia. *Sci. Total Environ.* 601, 691–702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.196>

Khilchevskiy, V. (2020) Global water resources: challenges of the 21st century. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography* 1/2(76/77), 6-16. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2020.76-77.1>

Kotelchuk A., Bondar O., Savchenko O., Kurmakova I., Kotelchuk Л., Rybalochko O., & Rudenko A. (2025). the quality of groundwater of Kiptivska rural territorial community (Chernihiv region). *Biota. Human. Technology*, (2), 85–94. <https://doi.org/10.58407/bht.2.25.6> (in Ukrainian).

Якість підземних вод Кіптівської сільської територіальної громади (Чернігівська область) / А. Котельчук, О. Бондар, О. Савченко, та ін. *Biota. Human. Technology*. 2025. №2. С. 85–94. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.25.6>

Kovalov, O. O., Kolesnyk, Y. M., Sevalniev, A. I., Sharavara, L. P., Hancheva, O. V., Kovalov, K. O., Tyshchenko, T. M., & Tulushev, Y. O. (2025). Peculiarities of the composition of surface and groundwater in eastern Ukraine during the war: assessment of environmental and carcinogenic risks. *Modern Medical Technology*, 17(2), 83–90. <https://doi.org/10.14739/mmt.2025.2.328977>

Luvhimbi, N., Tshitangano, T.G., Mabunda, J.T., Olaniyi, F.C. & Edokpayi, J. N. (2022). Water quality assessment and evaluation of human health risk of drinking water from source to point of use at Thulamela municipality, Limpopo Province. *Scientific Reports*, 12, 6059 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10092-4>

Malyna, V.V., Liasota, V.P., & Hryshko, V.A. (2014). *Physical, chemical and biological indicators of water quality: methodological guidelines*. Bila Tserkva: Bila Tserkva National Agrarian University (in Ukrainian).

Малина В.В., Лясота В.П., Гришко В.А. Фізичні, хімічні та біологічні показники якості води: метод. вказівки. Біла Церква, 2014. 48 с.

Manoiu, V.-M., Costache, M.-S., & Nica, M.-A. (2026). The Impact of the Russia–Ukraine War on Water Resources and Infrastructure of Ukraine – A Comprehensive Review. *World*, 7(1), 3. <https://doi.org/10.3390/world7010003>

Matviichuk, O., Yeromenko, R., Lytvynova, O., Dolzhykova, O., Matviichuk, A., Karabut, L., Lytvynenko, H., Gladchenko, O., & Lytvynenko, N. (2023). Hygienic assessment of potential health risks for the population of Ukraine and the Kharkiv region as a result of the deterioration of drinking water supply in the conditions of war. *ScienceRise: Medical Science*, (5(56), 16–24. <https://doi.org/10.15587/2519-4798.2023.295104>

Peter, B., Kenneth, B., James, E. & Tyler, D. (2019). Elevated manganese concentrations in united states groundwater, role of land surface-soil-aquifer connections. *Environ. Sci. Technol.* 53, 29–38. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04055>

Tarasova, V.V. (2008). *Ecological statistics (with a block-modular form of knowledge control): a textbook*. Kyiv: Centre of scientific literature. (in Ukrainian).

Тарасова В.В. Екологічна статистика (з блочно-модульною формою контролю знань): навчальний підручник Київ: Центр учбової літератури, 2008. 392 с.

Ye, X., Cui, R., Wang, L., Du, X (2020). The influence of riverbank filtration on regional water resources: A case study in the second Songhua River Catchment, China. *Water Supply*, 20, 1425–1438. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.055>

Received: 26.01.2026. **Accepted:** 20.02.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Котельчук А., Бондар О., Курмакова І., Котельчук Л., Ткаченко С. Якість підземних водозаборів Ніжинського району Чернігівської області. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 150–158. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.13>

Cite this article in APA style as:

Kotelchuk, A., Bondar, O., Kurmakova, I., Kotelchuk, L., & Tkachenko, S. (2026). Yakist pidzemnykh vodozaboriv Nizhynskoho raionu Chernihivskoi oblasti [Quality of groundwater intakes of villages Nizhyn district (Chernihiv region)]. *Biota. Human. Technology*, (1), 150–158. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.13> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Kotelchuk A. [*in Ukrainian: Котельчук А.*] ¹. Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof., email: kotelchuka@ukr.net
ORCID: 0009-0007-6000-6825

Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Bondar O. [*in Ukrainian: Бондар О.*] ², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof., email: bondar4elena@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9612-0546 Scopus-Author ID: 54583088800 ResearcherID: AAH-6361-2019

Department of Physics and Astronomy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine.

Kurmakova I. [*in Ukrainian: Курмакова І.*] ³, Sc. D. (Tech.), Prof., email: i.kurmakova@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8916-6546 Scopus-Author ID: 6603630402 ResearcherID: H-2041-2019

Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine.

Kotelchuk L. [*in Ukrainian: Котельчук Л.*] ⁴. Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof. email: lkotelchuk42@gmail.com
ORCID: 0009-0001-4528-281X

Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Tkachenko S. [*in Ukrainian: Ткаченко С.*] ⁵. Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Prof., email: lkotelchuk42@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7215-1196 Scopus-Author ID: 57207466413 ResearcherID: AAE-4311-2020

Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

¹ Funds collection, data collection.

² Manuscript preparation, data collection.

³ Study design, manuscript preparation.

⁴ Manuscript preparation.

⁵ Statistical analysis.

UDC 595.143:612.112:616-001.17

DOI: 10.58407/bht.1.26.14



Copyright (c) 2026 Volodymyr Cherkudinov, Yuliia Zelenko

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).**Володимир Черкудінов, Юлія Зеленько****ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НАФТОПРОДУКТІВ
ЗА ЕКОЛОГІЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ**

Volodymyr Cherkudinov, Yuliia Zelenko

**OPTIMIZATION OF ROAD TRANSPORTATION OF PETROLEUM PRODUCTS
ACCORDING TO ENVIRONMENTAL CRITERIA****АНОТАЦІЯ**

Мета роботи. Вирішення задачі розподілу об'ємів вантажу та знаходження найбільш екологічних маршрутів, враховуючи пропускну спроможність залізничних станцій відвантаження, мінімальні потреби в кожному з населених пунктів призначення. Приймались до уваги ризики воєнного стану, коли необхідно виключити або мінімізувати накопичення нафтопродуктів на проміжних етапах транспортування. Вантаж транспортування – бензин моторний.

Методологія. Дослідження ґрунтується на системному підході до еколого-енергетичного аналізу процесів автомобільного перевезення небезпечних вантажів, поєднує математичне моделювання та оптимізаційні методи. У роботі використано модель транспортної задачі лінійного програмування, що дозволяє оптимізувати розподіл вантажопотоків між пунктами відправлення та призначення за критерієм мінімізації викидів шкідливих речовин. Розрахунки виконано з використанням програмних засобів інженерних розрахунків, що забезпечує відтворюваність результатів і можливість адаптації моделі до різних умов експлуатації автомобільного транспорту.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні підходу до оцінювання екологічності автомобільних перевезень небезпечних вантажів шляхом урахування питомих енерговитрат для конкретного маршруту транспортування, а не усереднених показників за напрямками або типами перевезень. Запропонована модель поставки нафтопродуктів дозволяє комплексно оцінювати вплив автомобільного транспорту на довкілля з урахуванням особливостей ризиків воєнного стану в Україні. На відміну від існуючих підходів, модель орієнтована на практичне використання при плануванні реальних транспортно-логістичних операцій та може бути адаптована до різних видів небезпечних вантажів і умов перевезення.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що оцінювання екологічності автомобільних перевезень доцільно здійснювати на основі питомих енерговитрат за повним маршрутом транспортування, що дозволяє отримати більш об'єктивні результати порівняно з використанням середньостатистичних показників. Запропонована модель дає змогу визначати екологічно доцільні маршрути автомобільних перевезень небезпечних вантажів з урахуванням реальних умов експлуатації транспортних засобів. Практичне застосування розробленого підходу сприяє зниженню негативного впливу автомобільного транспорту на довкілля за рахунок оптимізації транспортно-логістичних рішень. Отримані результати можуть бути використані у подальших наукових дослідженнях, спрямованих на підвищення екологічної безпеки транспортних систем.

Ключові слова: автомобільні перевезення, нафтопродукти, екологічна ефективність, забруднюючі речовини, логістичні маршрути, небезпечні вантажі

ABSTRACT

Purpose of the work. The study addresses the problem of cargo volume allocation and the identification of the most environmentally efficient routes, taking into account the throughput capacity of railway loading stations and the minimum demand of each destination settlement. The risks associated with martial law conditions were considered, particularly the need to eliminate or minimize the accumulation of petroleum products at intermediate stages of transportation. The transported cargo is motor gasoline.

Methodology. The research is based on a systemic approach to the environmental and energy analysis of hazardous goods transportation by road and combines mathematical modeling with optimization methods. A linear

programming transportation problem model is applied, enabling the optimization of cargo flow distribution between origin and destination points according to the criterion of minimizing pollutant emissions. The calculations were performed using engineering computation software, ensuring the reproducibility of results and allowing the model to be adapted to various operating conditions of road transport.

Scientific novelty. The scientific novelty of the study lies in improving the approach to assessing the environmental performance of hazardous goods transportation by road through the consideration of specific energy consumption for a particular transportation route, rather than using averaged indicators by direction or transport type. The proposed petroleum products supply model allows for a comprehensive assessment of the environmental impact of road transport while accounting for the specific risks associated with martial law conditions in Ukraine. Unlike existing approaches, the model is oriented toward practical application in planning real transport and logistics operations and can be adapted to different types of hazardous cargo and transportation conditions.

Conclusions. The results of the study demonstrate that the assessment of the environmental performance of road transportation should be based on specific energy consumption along the entire transportation route, which provides more objective results compared to the use of average statistical indicators. The proposed model makes it possible to identify environmentally justified routes for hazardous goods transportation by road, taking into account real vehicle operating conditions. Practical implementation of the developed approach contributes to reducing the negative environmental impact of road transport through the optimization of transport and logistics decisions. The obtained results can be used in further scientific research aimed at improving the environmental safety of transport systems.

Key words: road transportation, petroleum products, environmental efficiency, pollutants, logistics routes, hazardous goods

Вступ

В умовах воєнного стану, коли вітчизняні нафтопереробні потужності зазнають значних втрат унаслідок ракетно-дронових атак, забезпечення споживачів паливно-мастильними матеріалами в Україні набуває критичного значення. За відсутності стабільного внутрішнього виробництва основним шляхом покриття потреб є імпорт нафтопродуктів через кордони з країнами Європейського Союзу, де ключову роль у внутрішньому розподілі відіграє автомобільний транспорт. Водночас саме автомобільні перевезення формують підвищене екологічне навантаження, пов'язане з викидами діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів азоту (NO_x) та вуглеводнів (CH).

В умовах обмеженої пропускної спроможності транспортної інфраструктури та підвищених ризиків воєнного часу особливо актуальним є мінімізування накопичення небезпечних вантажів у проміжних логістичних вузлах. Застосування безскладських схем постачання дозволяє скоротити обсяги перевантажувальних операцій, зменшити технологічні втрати пального та знизити ризик аварійних ситуацій, що супроводжуються локальними викидами забруднюючих речовин у довкілля.

Автомобільний транспорт у таких схемах забезпечує високу оперативність і маршрутну гнучкість, однак потребує

екологічно обґрунтованого планування. Неоптимальний вибір маршрутів і обсягів перевезення призводить до зростання питомих енерговитрат, а відповідно – до підвищення питомих викидів CO_2 , CH та NO_x на одиницю перевезеного вантажу. У зв'язку з цим екологічна ефективність автомобільних перевезень повинна оцінюватися не за середньостатистичними показниками, а з урахуванням реальних умов руху, довжини маршруту, режимів роботи двигуна та рівня завантаження транспортних засобів.

Оптимізація автомобільних маршрутів доставки нафтопродуктів з урахуванням питомих викидів забруднюючих речовин дозволяє одночасно знизити енергоємність перевезень і негативний вплив на атмосферне повітря. Такий підхід сприяє зменшенню сумарних викидів CO_2 , CH та NO_x , що є особливо важливим у контексті екологічної безпеки регіонів, через які проходять основні транспортні коридори.

У роботі (Zelenko & Kalimbet, 2024) авторами здійснено ймовірнісну оцінку екологічних та техногенних ризиків, пов'язаних із транспортуванням небезпечних вантажів. На основі аналізу розроблено моделі прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій та ідентифіковано потенційні джерела екологічної небезпеки під час перевезень. Водночас у дослідженні не враховано показники екологічної ефективності транспортних процесів, зокрема рівень

шкідливих викидів, енерговитрати та оптимізацію розподілу вантажопотоків з позицій мінімізації впливу на довкілля.

У роботі (Zelenko & Kalimbet, 2022) проведено аналіз заходів із підвищення ефективності перевезень та реалізації принципів ресурсозбереження у випадках аварійних розливів небезпечних вантажів на залізничному транспорті. Показано, що застосування спеціалізованих типів вагонів для транспортування універсальних абсорбуючих матеріалів у складі вантажних поїздів дозволяє суттєво зменшити негативні екологічні наслідки аварій. Разом із тим дослідження обмежується лише аварійними сценаріями та не містить оцінки енергоефективності перевезень і рівня викидів забруднюючих речовин у штатних умовах експлуатації.

У дослідженні (Sakhno & Khrutba, 2025) розглянуто сучасний стан перевезень небезпечних вантажів в Україні, проведено оцінку ризиків та визначено основні проблеми організації транспортування небезпечних речовин. Автори проаналізували фактори, що впливають на безпеку та ефективність перевезень, а також запропонували напрями вдосконалення системи управління ризиками під час транспортування таких вантажів. В роботі недостатньо уваги приділено оптимізації маршрутів перевезення та оцінці екологічних наслідків транспортування небезпечних вантажів.

У науковій роботі (Demchenko et al., 2025) проаналізовано використання сучасних інформаційних систем на ринку вантажних перевезень України. Автори проаналізували роль цифрових технологій у підвищенні ефективності логістичних процесів. Недоліком дослідження є відсутність детального аналізу впливу транспортних процесів на довкілля та недостатня увага до екологічної оптимізації перевезень.

У роботі (Hermanyuk & Palenyuk, 2024) досліджено логістичні витрати при перевезенні вантажів автомобільним та залізничним транспортом. Автори виконали порівняльний аналіз витрат транспортних операцій, визначили фактори, що впливають на ефективність транспортних схем перевезення, а також запропонували підходи до оптимізації логістичних витрат. Але

розглядають переважно економічні показники перевезень і не враховують екологічні критерії, такі як рівень шкідливих викидів під час транспортування.

Матеріали та методи дослідження

Метою дослідження є обґрунтування екологічно доцільної схеми перевезення нафтовантажу між пунктами відправлення та пунктами призначення, що забезпечує мінімізацію шкідливих викидів в атмосферу при повному задоволенні потреб споживачів у вантажі.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що оптимізація автомобільних перевезень вантажів, зокрема раціональний розподіл обсягів нафтопродуктів між пунктами відправлення та кінцевими споживачами, дає змогу зменшити негативний вплив автотранспорту на довкілля за рахунок скорочення пробігу, витрат пального і викидів забруднюючих речовин.

За моделлю дослідження (Cherkudinov et al., 2025), вантаж транспортується від прикордонних залізничних станцій Чоп, Мостиська-2, Вадул-Сірет, Дяково та Ягодин до населених пунктів Самар, Павлоград, Синельниково, Царичанка, Верхньодніпровськ, Магдалинівка та Кринички.

Перед виконанням оптимізаційних розрахунків прийнято такі припущення:

- об'єктом перевезення є бензин моторний (№ ООН 1203, клас безпеки 3); увесь обсяг вантажу вважається однорідним, без урахування температурних впливів і втрат під час навантажувально-розвантажувальних операцій;

- перевезення здійснюються виключно автомобільним транспортом із використанням автоцистерн ADR Kaessbohrer K.STB E 39/5–11/24 (Німеччина) (власність перевізника, вантажопідйомність 20 т, місткість 36 м³);

- викиди шкідливих речовин при перевезенні вимірюються у грамах на 20 т перевезеного вантажу, г/ 20 т вантажу (таблиця 1-3);

- транспортна задача розглядається як замкнута система, у якій сумарний обсяг перевезень відповідає загальному попиту пунктів призначення;

- необхідний обсяг нафтовантажу в містах призначення прийнято пропорційним

кількості автозаправних станцій у кожному населеному пункті, при цьому добові та сезонні коливання попиту не враховуються.

Для формування раціональних напрямків руху, прийнято наступні позначення станцій відправлення:

A1 – Мостиська-2, об'єм відвантаження 240 т;

A2 – Ягодин, об'єм відвантаження 180 т;

A3 – Чоп, об'єм відвантаження 360 т;

A4 – Дяково, об'єм відвантаження 100 т;

A5 – Вадул-Сірет, об'єм відвантаження 120 т.

Умовні позначення міст вивантаження:

B1 – Самар, затребуваний об'єм вантажу 300 т;

B2 – Верхньодніпровськ, затребуваний об'єм вантажу 60 т;

B3 – Царичанка, затребуваний об'єм вантажу 100 т;

B4 – Павлоград, затребуваний об'єм вантажу 300 т;

B5 – Синельникове, затребуваний об'єм вантажу 140 т;

B6 – Магдалинівка, затребуваний об'єм вантажу 60 т;

B7 – Кринички, затребуваний об'єм вантажу 40 т.

Оптимізація моделі перевезення здійснюється за допомогою цільової функції транспортної задачі з урахуванням шкідливих викидів. Було використане програмне забезпечення для інженерних розрахунків MATHCAD, вбудована функція minimize з категорії «Вирішення рівняння», яка повертає значення змінних, що задовольняють обмеження у блоці рішення і пропонують найменше значення функції (в даному випадку, найменші викиди шкідливих речовин від роботи двигуна).

Функція описує залежність сумарного екологічного навантаження від обсягів автомобільних перевезень між постачальниками та споживачами. У загальному вигляді має вигляд

$$f(x_{ij}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де x_{ij} – кількість вантажу, що перевозиться від постачальника i до споживача j (кількість автоцистерн по 20 т);

c_{ij} – рівень викидів шкідливих речовин при перевезенні одиниці вантажу від від постачальника i до споживача j (г/20 т вантажу);

m – кількість постачальників, 5;

n – кількість споживачів, 7.

Обсяги перевезень задаються в умовних одиницях, а саме в кількості автоцистерн вантажопідйомністю 20 т.

Для кожного постачальника визначені обмеження постачання, що не перевищує доступний умовний обсяг:

Мостиська-2

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} = 12;$$

Ягодин

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} = 9;$$

Чоп

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{55} + x_{66} + x_{37} = 18;$$

Дякове

$$x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} + x_{46} + x_{47} = 5;$$

Вадул-Сірет

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} + x_{56} + x_{57} = 6.$$

Для кожного споживача визначені обмеження споживання, що не перевищує необхідний умовний обсяг:

Самар

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{51} = 15;$$

Верхньодніпровськ

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + x_{52} = 3;$$

Царичанка

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} + x_{53} = 5;$$

Павлоград

$$x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} + x_{54} = 15;$$

Синельникове

$$x_{15} + x_{25} + x_{35} + x_{45} + x_{55} = 7;$$

Магдалинівка

$$x_{16} + x_{26} + x_{36} + x_{46} + x_{56} = 3;$$

Кринички

$$x_{17} + x_{27} + x_{37} + x_{47} + x_{57} = 2.$$

Додаткові умови – усі перевезення повинні бути невід'ємні $x_{ij} \geq 0, \forall i, j$.

Таблиця 1

Питомі викиди діоксиду вуглецю (CO₂) від станції відправлення до кінцевого пункту (г/20 т вантажу)

Призначення Відправлення	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A1	2700	2550	2700	2850	2700	2700	2550
A2	2550	2550	2550	2700	2700	2400	2400
A3	3000	2850	2850	3150	3150	3150	2850
A4	3000	2850	3000	3150	3150	3000	2850
A5	2400	2250	2250	2550	2400	2400	2100

Таблиця 2

Питомі викиди оксидів азоту (NO_x) від станції відправлення до кінцевого пункту (г/20 т вантажу)

Призначення Відправлення	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A1	3600	3400	3600	3800	3600	3600	3400
A2	3400	3000	3000	3600	3600	3200	3200
A3	4000	3800	3800	4200	4200	4200	3800
A4	4000	3800	4000	4200	4200	4000	3800
A5	3200	3000	3000	3400	3200	3200	2800

Таблиця 3

Питомі викиди вуглеводнів (CH) від станції відправлення до кінцевого пункту (г/20 т вантажу)

Призначення Відправлення	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A1	828	782	828	874	828	828	782
A2	782	690	690	828	828	736	736
A3	920	874	874	966	966	966	874
A4	920	874	920	966	966	920	874
A5	736	690	690	782	736	736	644

Отже, при перевезенні в автоцистернах цільова функція розрахунку викидів оксидів вуглецю (CO) має вигляд

$$f(x_{ij}) = 2700 \cdot x_{11} + 2550 \cdot x_{12} + 2700 \cdot x_{13} + 2850 \cdot x_{14} + 2700 \cdot x_{15} + 2700 \cdot x_{16} + 2550 \cdot x_{17} + 2550 \cdot x_{21} + 2550 \cdot x_{22} + 2550 \cdot x_{23} + 2700 \cdot x_{24} + 2700 \cdot x_{25} + 2400 \cdot x_{26} + 2400 \cdot x_{27} + 3000 \cdot x_{31} + 2850 \cdot x_{32} + 2850 \cdot x_{33} + 3150 \cdot x_{34} + 3150 \cdot x_{35} + 3150 \cdot x_{36} + 2850 \cdot x_{37} + 3000 \cdot x_{41} + 2850 \cdot x_{42} + 3000 \cdot x_{43} + 3150 \cdot x_{44} + 3150 \cdot x_{45} + 3000 \cdot x_{46} + 2850 \cdot$$

$$x_{47} + 2400 \cdot x_{51} + 2250 \cdot x_{52} + 2250 \cdot x_{53} + 2250 \cdot x_{54} + 2400 \cdot x_{55} + 2400 \cdot x_{56} + 2100 \cdot x_{57};$$

цільова функція розрахунку викидів оксидів азоту (NO_x) має вигляд

$$f(x_{ij}) = 3600 \cdot x_{11} + 3400 \cdot x_{12} + 3600 \cdot x_{13} + 3800 \cdot x_{14} + 3600 \cdot x_{15} + 3600 \cdot x_{16} + 3400 \cdot x_{17} + 3400 \cdot x_{21} + 3000 \cdot x_{22} + 3000 \cdot x_{23} + 3600 \cdot x_{24} + 3600 \cdot x_{25} + 3200 \cdot x_{26} + 3200 \cdot x_{27} + 4000 \cdot x_{31} + 3800 \cdot x_{32} + 3800 \cdot x_{33} +$$

$$4200 \cdot x_{34} + 4200 \cdot x_{35} + 4200 \cdot x_{36} + 3800 \cdot x_{37} + 4000 \cdot x_{41} + 3800 \cdot x_{42} + 4000 \cdot x_{43} + 4200 \cdot x_{44} + 4200 \cdot x_{45} + 4000 \cdot x_{46} + 3800 \cdot x_{47} + 3200 \cdot x_{51} + 3000 \cdot x_{52} + 3000 \cdot x_{53} + 3400 \cdot x_{54} + 3200 \cdot x_{55} + 3200 \cdot x_{56} + 2800 \cdot x_{57};$$

цільова функція розрахунку викидів вуглеводнів (CH) має вигляд

$$f(x_{ij}) = 828 \cdot x_{11} + 782 \cdot x_{12} + 828 \cdot x_{13} + 874 \cdot x_{14} + 828 \cdot x_{15} + 828 \cdot x_{16} + 782 \cdot x_{17} + 782 \cdot x_{21} + 690 \cdot x_{22} + 690 \cdot x_{23} + 828 \cdot x_{24} + 828 \cdot x_{25} + 736 \cdot x_{26} + 736 \cdot x_{27} + 920 \cdot x_{31} + 874 \cdot x_{32} + 874 \cdot x_{33} + 966 \cdot x_{34} + 966 \cdot x_{35} + 966 \cdot x_{36} + 874 \cdot x_{37} + 920 \cdot x_{41} + 874 \cdot x_{42} + 920 \cdot x_{43} + 966 \cdot x_{44} + 966 \cdot x_{45} + 920 \cdot x_{46} +$$

$$874 \cdot x_{47} + 736 \cdot x_{51} + 690 \cdot x_{52} + 690 \cdot x_{53} + 782 \cdot x_{54} + 736 \cdot x_{55} + 736 \cdot x_{56} + 644 \cdot x_{57}.$$

Матриця розподілу між постачальниками та споживачами, з урахуванням мінімальних викидів оксидів вуглецю (CO) та вуглеводнів (CH), використовуючи схему перевезення в автоцистернах, від початкової станції до міст призначення

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} & X_{17} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} & X_{25} & X_{26} & X_{27} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} & X_{35} & X_{36} & X_{37} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} & X_{45} & X_{46} & X_{47} \\ X_{51} & X_{52} & X_{53} & X_{54} & X_{55} & X_{56} & X_{57} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 5 & 7 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 9 & 3 & 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Пояснення щодо результатів розрахунку зведено до таблиці 4.

Таблиця 4

Розподіл об'єму нафтопродуктів між постачальниками та споживачами з урахуванням мінімальних викидів оксидів вуглецю (CO) та вуглеводнів (CH), (т)

Призначення Відправлення	Відправлення						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A1	-	-	-	100	140	-	-
A2	120	-	-	-	-	60	-
A3	180	60	100	20	-	-	-
A4	-	-	-	60	-	-	40
A5	-	-	-	120	-	-	-

Зі станції Мостиська-2 із загальним обсягом відвантаження 240 т перевезення здійснюються до міста Павлоград у кількості 100 т та Синельникове у кількості 140 т.

Зі станції Ягодин із загальним обсягом 180 т пальне постачається м. Самар у обсязі 120 т та м. Магдалинівка у обсязі 60 т.

Станція Чоп є найбільшим постачальником з обсягом 360 т і забезпечує одразу кілька споживачів: м. Самар – 180 т; м. Верхньодніпровськ – 60 т; м. Царичанка – 100 т; м. Павлоград – 20 т.

Зі станції Дяково з обсягом відвантаження 100 т здійснюється

постачання м. Павлоград у кількості 60 т та м. Кринички у кількості 40 т.

Зі станції Вадул-Сірет з наявним обсягом 120 т перевезення виконуються виключно до м. Павлоград у кількості 120 т.

Матриця розподілу між постачальниками та споживачами, з урахуванням мінімальних викидів оксидів азоту (NO_x).

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} & X_{17} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} & X_{25} & X_{26} & X_{27} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} & X_{35} & X_{36} & X_{37} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} & X_{45} & X_{46} & X_{47} \\ X_{51} & X_{52} & X_{53} & X_{54} & X_{55} & X_{56} & X_{57} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 9 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 15 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Розподіл об'єму нафтопродуктів між постачальниками та споживачами з урахуванням мінімальних викидів оксидів азоту (NO_x) показана в таблиці 5.

Таблиця 5

Розподіл об'єму нафтопродуктів між постачальниками та споживачами з урахуванням мінімальних викидів оксидів азоту (NO_x), (т)

Призначення Відправлення	Відправлення						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A1	-	-	-	180	60	-	-
A2	-	20	100	-	-	60	-
A3	300	40	-	20	-	-	-
A4	-	-	-	100	-	-	-
A5	-	-	-	-	80	-	40

Зі станції Мостиська-2 із загальним обсягом відвантаження 240 т перевезення здійснюються до міста Павлоград у кількості 180 т та Синельникове у кількості 60 т.

Зі станції Ягодин із загальним обсягом 180 т пальне постачається м. Верхньодніпровськ у обсязі 20 т, м. Царичанка – 100 т та м. Магдалинівка у обсязі 60 т.

Станція Чоп з обсягом 360 т забезпечує одразу кілька споживачів: м. Самар – 300 т; м. Верхньодніпровськ – 40 т; м. Царичанка – 20 т.

Зі станції Дяково з обсягом відвантаження 100 т здійснюється постачання м. Павлоград у кількості 100 т.

Зі станції Вадул-Сірет з наявним обсягом 120 т перевезення виконуються до м. Синельниково у кількості 80 т та м. Кринички – 40 т.

Результати дослідження та обговорення

Отримані результати є наслідком оптимізації транспортної задачі на основі питомих показників, наведених у табл. 1–3, що характеризують екологічні параметри перевезень. Оптимізація здійснювалася із застосуванням відомої транспортної моделі з лінійною цільовою функцією, яка мінімізує сумарні витрати або екологічні навантаження за умови виконання балансових

обмежень між пунктами відправлення та призначення.

Алгоритм оптимізації, відповідно до цільової функції (1), забезпечували вибір маршрутів із мінімальними обсягами викидів забруднюючих речовин (CO , NO_x , CH), пов'язаних із перевезенням одиниці вантажу.

Отриманий розподіл вантажопотоків також зумовлений відмінностями у технологічних можливостях вантажобробки на станціях відправлення.

Станції Мостиська-2, Ягодин та Чоп характеризуються наявністю розвинутої інфраструктури для оперативного зливу, наливу та перевантаження нафтовантажів, що дає змогу скоротити тривалість простоїв рухомого складу та зменшити кількість допоміжних маневрових операцій. Це, у свою чергу, сприяє зниженню непрямих викидів CO , NO_x та CH , пов'язаних з роботою двигунів автомобілів у режимах холостого ходу та часткових навантажень.

Вирішення цільової функції показало, що використовуючи схему перевезення в автоцистернах, від прикордонних станцій до міст призначення, при транспортуванні нафтовантажу об'ємом 1000 тон, можливо досягти мінімальної кількості викидів оксидів вуглецю (CO) – 136900 г, оксидів азоту (NO_x) – 183800 г, вуглеводнів (CH) – 42270 г.

Серед основних обмежень дослідження слід відзначити використання одного критерію оптимізації, що базується на питомих викидах, які лише опосередковано відображають екологічні наслідки перевезень. Подальший розвиток роботи доцільно пов'язати з переходом до багатокритеріальної оптимізації, що дозволить одночасно враховувати втрати нафтопродуктів під час перевантаження, рівень ризику та прямі обсяги викидів забруднюючих речовин (CO, NO_x, CH₄).

Висновки

У ході дослідження підтверджено доцільність застосування оптимізаційних підходів для формування екологічно ефективної схеми автомобільного перевезення нафтовантажів.

Встановлено, що раціональний розподіл обсягів нафтопродуктів між пунктами відправлення та кінцевими споживачами дозволяє суттєво скоротити сумарний пробіг автомобільного транспорту, що безпосередньо впливає на зменшення витрат пального та рівнів викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Використано модель штучного інтелекту ChatGPT-5.1 в розділах «Вступ», «Результати дослідження та обговорення», проводились перевірка граматики, орфографії, пунктуації, пошук джерел за ключовими словами та критеріями, удосконалення оригінального тексту

Аналіз результатів оптимізації показав, що концентрація вантажопотоків на екологічно більш ефективних маршрутах дає змогу мінімізувати питомі та сумарні викиди CO, NO_x та CH₄, особливо при перевезенні значних обсягів вантажу на середні та великі відстані.

Вибір пунктів відправлення з розвиненішими можливостями вантажообробки та безперервною організацією логістичних процесів сприяє зниженню непрямих викидів, пов'язаних із простим транспортних засобів та роботою двигунів у неефективних режимах.

Отримані результати підтверджують основну гіпотезу дослідження про те, що оптимізація автомобільних перевезень нафтовантажів є ефективним інструментом зменшення негативного впливу автотранспорту на довкілля без зниження рівня забезпечення споживачів паливом.

Запропонований підхід може бути використаний як науково обґрунтована основа для прийняття управлінських рішень у сфері логістики пального, спрямованих на підвищення екологічної безпеки перевезень та зниження антропогенного навантаження на атмосферу.

створеного авторами, порівняння результату з емпіричними даними, співставлення з інформацією на авторитетних пошукових ресурсах наукових робіт. Результати використання штучного інтелекту не вплинули на наукову новизну. Після використання цього інструменту автори ретельно переглянули та відредагували вміст за потреби та несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію. / The ChatGPT-5.1 artificial intelligence model was used in the sections "Introduction", "Results of the study and discussion", grammar, spelling, punctuation were checked, sources were searched for by keywords and criteria, the original text created by the authors was improved, the result was compared with empirical data, and information was compared with information on authoritative search resources of scientific works. The results of using artificial intelligence did not affect scientific novelty. After using this tool, the authors carefully reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the final published version.

References

Cherkudinov, V., Zelenko, Yu., & Bezovska, M. (2025). Methodology for determining environmental indicators of oil products transportation during wartime. *SWorldJournal*, 1(33-01), 254–262. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2025-33-01-094> (in Ukrainian)

Черкудінов В. Е., Зеленко Ю. В., Безовська М. С. Методологія визначення екологічних показників транспортування нафтопродуктів у воєнний час. *SWorldJournal*. 2025. №1(33-01). С. 254–262. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2025-33-01-094>

Demchenko, E., Dorosh, A., & Skovron, I. (2022). Modern information systems in the freight market of Ukraine. *Transport systems and transportation technologies*, (23), 79–88. <https://doi.org/10.15802/tsst2022/261660> (in Ukrainian)

Демченко Є. Б., Дорош А. С., Скворон І. Я. (2022). Сучасні інформаційні системи на ринку вантажних перевезень України. *Транспортні системи та технології перевезень*. Вип. 23. С. 79–88. <https://doi.org/10.15802/tsst2022/261660>

Hermanyuk, Yu., & Palenyk, I. (2024). Research on logistics costs for transporting agricultural goods by road and rail. *Transport systems and transportation technologies*, (27), 71–82. <https://doi.org/10.15802/tsst2024/307370> (in Ukrainian)

Германюк Ю. М., Паленик І. О. Дослідження логістичних витрат при перевезенні вантажів аграрної групи автомобільним і залізничним видами транспорту. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2024. Вип. 27. С. 71–82. <https://doi.org/10.15802/tsst2024/307370>

Sakhno, S., Khrutba, Y. (2025). The state of transportation of dangerous goods in Ukraine in modern conditions. *Management of the development of complex systems*. (61), 113–120. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.61.113-120> (in Ukrainian)

Сахно С., Хрутьба Ю. Стан перевезення небезпечних вантажів в Україні в сучасних умовах. *Управління розвитком складних систем*. 2025. Вип. 61. С. 113–120. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.61.113-120>

Zelenko, Yu. V., Kalimbet, M. V. (2024). Risk assessment of emergencies during transportation of dangerous goods by rail. *Transport Means: Proceedings of the International Conference*, October 2024, 592–597. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P592-597>

Zelenko, Yu., Kalimbet, N. (2022). Improving a method for eliminating the spill of hazardous substances by using universal absorbent cloth. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10–118), 30–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263583>

Received: 10.02.2026. Accepted: 10.03.2026. Published: 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Черкудінов В., Зеленько Ю. Оптимізація автомобільних перевезень нафтопродуктів за екологічними критеріями. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 159-168. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.14>

Cite this article in APA style as:

Cherkudinov, V., & Zelenko, Yu. (2026). Optymizatsiia avtomobilnykh perevezen naftoproduktiv za ekolohichnymy kryteriiamy [Optimization of road transportation of petroleum products according to environmental criteria]. *Biota. Human. Technology*, (1), 159-168. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.14> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Cherkudinov V. [*in Ukrainian: Черкудінов В.*] ¹, PhD Student, email: volodymyrcherkudinov@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3164-0329
Department of Environmental and Civil Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies
2, Lazaryana, Dnipro, 49010, Ukraine

Zelenko Yu. [*in Ukrainian: Зеленько Ю.*] ², Doctor of technical sciences, professor, email: j.v.zelenko@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5551-0305
Department of Environmental and Civil Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies
2, Lazaryana, Dnipro, 49010, Ukraine

¹ Statistical analysis, manuscript preparation.

² Study design, data collection.



**FOOD TECHNOLOGIES AND
HUMAN HEALTH**

**ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ**



UDC 637.5

DOI: 10.58407/bht.1.26.15



Copyright (c) 2026 Oleksandr Batrachenko, Mykola Todorov

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Oleksandr Batrachenko, Mykola Todorov**DEVELOPMENT OF A RISK-BASED APPROACH TO MEAT PRODUCT SAFETY****Олександр Батраченко, Микола Тодоров****РОЗВИТОК РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ДО БЕЗПЕЧНОСТІ М'ЯСНИХ ПРОДУКТІВ****ABSTRACT**

Purpose of the work. The aim of this study is to summarise and systematically analyse contemporary risk-oriented approaches to ensuring the safety of meat products intended for children and sensitive population groups, as well as to substantiate the feasibility of using product shape and internal structure as engineering tools for reducing technological risks in the production of dried meat products.

Methodology. The methodology of the study is based on a review and analytical approach employing structural-logical, comparative and critical analysis of current scientific publications and regulatory documents: Codex Alimentarius, ISO 22000, norms of EFSA etc. related to food safety management. The analysis is conducted from a risk-oriented perspective, taking into account the multi-barrier concept, the role of water activity, dehydration kinetics, and the influence of product geometry and internal structure on the formation of microbiological stability in meat products.

Scientific novelty. Scientific novelty lies in the development of a generalised conceptual model in which the shape and internal structure of dried meat products are considered as active engineering factors for risk management. An interpretation of safe-by-design principles in food technologies is proposed as an applied mechanism of "built-in safety", enabling the reduction of technological risks through product and process design rather than exclusively through formulation- or ingredient-based solutions.

Conclusions. The conclusions indicate that, for meat products intended for children and sensitive population groups, a risk-oriented approach should be combined with engineering control of product shape and internal structure. Such an approach contributes to reducing the duration of product exposure to potentially hazardous conditions, levelling water activity profiles, and decreasing dependence on preservative additives without compromising safety and quality.

Key words: risk-oriented approach, meat product safety, safe-by-design, water activity, structural design of food products

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Мета роботи полягає в узагальненні та системному аналізі сучасних ризик-орієнтованих підходів до забезпечення безпечності м'ясних продуктів, призначених для дітей та чутливих груп населення, а також в обґрунтуванні доцільності використання форми та внутрішньої будови продукту як інженерного інструменту зниження технологічних ризиків у процесах виготовлення сушених м'ясних виробів.

Методологія. Методологія дослідження базується на оглядово-аналітичному підході з використанням структурно-логічного, порівняльного та критичного аналізу сучасних наукових публікацій і нормативних документів: Codex Alimentarius, ISO 22000, документів EFSA та ін., присвячених управлінню безпечністю харчових продуктів. Аналіз виконано з позицій ризик-орієнтованої логіки з урахуванням багатобар'єрної концепції, ролі активності води, кінетики зневоднення та впливу геометрії і внутрішньої структури м'ясних виробів на формування мікробіологічної стабільності.

Наукова новизна. Формування узагальненої концептуальної моделі, в якій форма та внутрішня будова сушених м'ясних продуктів розглядаються як активні інженерні чинники керування ризиками. Запропоновано інтерпретацію принципів safe-by-design у харчових технологіях як прикладного механізму «вбудованої безпечності», що дозволяє зменшувати технологічні ризики шляхом проектування продукту та процесу, а не виключно за рахунок рецептурних або інгредієнтних рішень.

Висновки. Для м'ясних продуктів, орієнтованих на дітей та сенситивні групи населення, ризик-орієнтований підхід доцільно поєднувати з інженерним керуванням формою та внутрішньою будовою виробу. Такий підхід сприяє скороченню тривалості перебування продукту у потенційно небезпечних умовах, вирівнюванню профілю активності води та зниженню залежності від консервувальних добавок без компромісу щодо безпечності й якості.

Ключові слова: ризик-орієнтований підхід, безпечність м'ясних продуктів, safe-by-design, активність води, структурне проектування харчових продуктів

Introduction

Ensuring the safety of food products intended for children and other sensitive population groups is one of the priority tasks of modern food science and practice. These groups include individuals with compromised immune systems, chronic diseases, metabolic disorders, as well as consumers for whom even moderate levels of conventionally acceptable food-related risks may have critical consequences. In this context, approaches to food safety for such population groups should be based not only on compliance with general regulatory requirements, but also on the principles of risk reduction at all stages of production.

Meat products, particularly dry-cured and fermented products, belong to a category of foods characterised by high technological complexity and a multifactorial nature of risk formation. Their safety is determined by a combination of physicochemical, microbiological and structural factors, among which the moisture content of the meat matrix, water activity, the duration and uniformity of drying processes, as well as the internal structure of the product play a key role. For children and sensitive population groups, even minor non-uniformities in these processes may lead to an increased level of risk, which necessitates a more precise and controllable technological approach.

Traditionally, ensuring the safety of meat products has been based on the implementation of food safety management systems, in particular HACCP, as well as on the use of ingredients with preservative effects, including nitrites. At the same time, numerous scientific publications and regulatory documents point to inherent limitations of an exclusively ingredient-based approach, especially in products intended for vulnerable population groups. In this context, the search for alternative or complementary risk-reduction tools becomes increasingly relevant, as such tools allow for a reduction in dependence on

technological additives without compromising food safety.

Currently, food safety management is based on systematic risk analysis aimed at the identification, assessment and control of hazards at all stages of production, processing, storage and distribution. Scientifically grounded food safety management systems, such as HACCP, differ from traditional quality control practices in that they adopt a preventive approach focused on mitigating risks before hazardous factors can lead to adverse consequences for consumers. HACCP enables the systematic identification of hazards, the establishment of critical control points, critical limits and monitoring measures, which are essential for preventing biological, chemical and physical risks in food products, including meat products (Codex Alimentarius Commission [CAC], 2022).

In quantitative microbial risk assessment (QMRA), predictive modelling tools are increasingly applied to describe microbial behaviour under varying water activity and process conditions (Ross & McMeekin, 2003; Nauta, 2000; CAC, 1999). Such models allow not only hazard identification but also comparative evaluation of alternative technological scenarios.

According to international guidance documents, food safety management systems, including HACCP, should be implemented at all stages of the food chain – from raw materials to finished products – and should be aimed at risk reduction through scientifically justified preventive measures rather than relying solely on end-product testing (International Finance Corporation [IFC], 2020).

Within the broader risk assessment paradigm, product safety is defined as a set of measures designed to minimise the likelihood of exposure to significant hazards affecting consumer health within acceptable limits (International Organization for Standardization [ISO], n.d.). In this paradigm, a risk-oriented approach plays a key role, as it takes into

account actual risk factors, their interrelationships, and the potential severity of consequences when developing control strategies.

For meat products, the risk-oriented approach must be adapted to the specific characteristics of these foods, which undergo complex physicochemical and microbiological changes during processing, storage and distribution. This applies both to thermally processed products and to dried or fermented products, where the risks associated with excessive microbial activity, component oxidation, and the formation of potentially harmful compounds may vary depending on technological parameters and the internal structure of the product (Brykova, T., 2024). In practice, risk-oriented control in the meat sector includes the analysis of biological, chemical and physical risk factors, the identification of critical control points within the technological process, and the monitoring of parameters that directly influence product safety and quality.

Modern food safety management standards, such as ISO 22000, integrate HACCP requirements into a comprehensive food safety management system and emphasise the importance of linking risk-oriented requirements with management system elements, including communication, supply chain control, traceability and hazard control (ISO, n.d.). This integration enhances the effectiveness of responses to emerging and changing risks during food production processes and ensures a clear connection between risk management activities and organisational aspects of production.

It is also important to note that a risk-oriented approach is not limited solely to the implementation of HACCP or ISO 22000. It additionally encompasses methodological tools for risk assessment, early identification of potential safety issues, forecasting of hazardous trends, and the integration of data on the impact of risks on consumer health. In particular, risk models employing quantitative assessment methods enable the prediction of risk levels and the comparison of alternative technological scenarios in meat product manufacturing (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2017).

The specificity of risks in meat products and the role of structural and engineering

factors in their formation can be outlined as follows. Meat products, especially dry-cured and fermented products, are characterised by a multifactorial nature of risk formation, in which not only formulation but also the course of mass transfer processes within the product matrix are critical. In such systems, parameters determining the state of water – namely raw material moisture content and water activity – as well as their spatial distribution (gradients between the surface and the core), are directly related to microbiological stability and product safety. In particular, for dry and fermented sausages, water activity is considered one of the key “barriers” limiting the growth of undesirable microflora, while its reduction to a safe level is achieved through a combination of drying and salting processes (Patarata et al., 2022).

From a risk-oriented perspective, an important consideration is that hazardous zones in meat products may be localised. Even when target parameters are achieved at the product surface, internal regions may retain elevated moisture content and water activity for a longer period, thereby forming an “internal risk window” (Beňo et al., 2023). For dry-fermented products, this issue is further intensified due to the dependence of dehydration kinetics on product geometry and internal structure. Consequently, the control of water activity should account not only for its final value, but also for the sampling location and the spatial heterogeneity of this parameter within different product zones. This is supported by recent studies addressing water activity measurement practices in dried and fermented meat products and demonstrating the influence of sampling location on the interpretation of product safety. Experimental studies have demonstrated the strong dependence of *Salmonella* growth dynamics on water activity levels, reinforcing the need for precise spatial control of *aw* during drying (Gibson et al., 1988).

The classical scientific and practical framework for describing such systems is provided by the hurdle technology concept (Leistner, 2000), according to which product safety and stability are ensured not by a single factor, but by a combination of multiple barriers, including water activity, acidity, redox potential, temperature, competitive microflora and/or preservative substances. In the context

of meat products, this concept is particularly valuable as it explains how a reduced dependence on individual additives, notably nitrite, can be achieved provided that other barriers are strengthened – primarily through controlled dehydration and the homogenisation of internal conditions within the product.

It should also be taken into account that technological solutions aimed at “improving” product composition – for example, reducing salt or nitrite content – may shift the balance of protective barriers and potentially increase risks if adequate compensation by other factors is not ensured, particularly water activity and drying dynamics. For dry and dry-fermented sausages, authoritative sources emphasise that water activity represents the key barrier for microbial control (Patarata et al., 2022). Accordingly, any reduction in formulation ingredients requires an engineering-controlled dehydration process and a predictable formation of water activity to maintain product safety. The predictive role of water activity in microbial stability has long been substantiated in food systems and remains one of the most reliable indicators of microbial growth limitation (Labuza & Altunakar, 2007; Fontana, 2000).

Structural and engineering factors – such as product shape, thickness, internal structure, and the characteristics of the protein–fat matrix – are critical because they directly determine diffusion path lengths and moisture transfer conditions within the product. For meat systems, it is well established that the structure of the protein matrix governs water retention, texture, and the course of transformations during technological processing (Tornberg, 2005). Consequently, modifications of external shape and internal structure can affect both mass transfer processes and the final quality attributes of the product. As a fundamental reference for substantiating the role of structure and its relationship with quality and the behaviour of meat proteins, the classical review by Tornberg is considered particularly relevant.

Within a risk-oriented framework for products intended for children and sensitive population groups, particular importance is attributed to reducing the overall dietary exposure to potentially undesirable substances, notably nitrites, while maintaining microbiological stability. EFSA highlights the

technological role of nitrites, particularly their inhibitory effect on *Clostridium botulinum*, while simultaneously emphasising the need for a scientifically substantiated approach to their assessment and use (European Food Safety Authority [EFSA], 2017). In addition, quantitative exposure assessments confirm that cumulative dietary intake of nitrites remains a regulatory concern, especially in products consumed by sensitive population groups (EFSA ANS Panel, 2017). At the same time, technological strategies aimed at nitrite reduction require compensation through alternative safety barriers (Sebranek & Bacus, 2007). Risk assessment studies also analyse the contribution of meat products to long-term cumulative dietary exposure to nitrites and nitrates. This creates a basis for engineering strategies in which part of the “risk-control” function is shifted from additives to controllable process parameters and product structural characteristics.

Thus, the specificity of risks in meat products arises from the combined effects of mass transfer limitations that lead to spatial and temporal heterogeneity of water activity, structurally determined differences in diffusion pathways across various product types (minced and restructured whole-muscle products), and the need to balance safety barriers when pursuing nitrite reduction in products intended for vulnerable population groups.

In this context, the safe-by-design logic can be substantiated as an adaptation of the engineering principle of “inherent safety”. That is, risk reduction is achieved not only through end-product control or intensified use of additives, but through the design of product shape and internal structure in such a way as to accelerate and homogenise dehydration, thereby reducing the duration during which the product remains in a potentially hazardous state.

In technical and regulatory disciplines, safe-by-design or safer-by-design approaches are interpreted as forms of inherent safety, whereby risks are mitigated not solely by control measures or testing of the final product, but already at the design stage through the selection of structural and constructive solutions that reduce the likelihood of hazardous scenarios throughout the product or process life cycle. This logic has been most systematically developed in the fields of

material safety and nanotechnology; however, its principles are of a general engineering nature and can be adapted to food systems as “risk-informed design” or “risk-aware product design” approaches (Leistner, 2000).

As a concept in food technology, the term safe-by-design can be interpreted as an applied extension of the multi-barrier (hurdle) approach. In food engineering, a historically close analogue to safe-by-design is the concept of hygienic design of equipment and processing lines. According to this concept, equipment design should minimise contamination accumulation and ensure effective cleaning and disinfection, thereby reducing the risk of microbiological contamination. Scientific publications emphasise that poorly designed equipment structures can directly lead to microbiological and chemical hazards as well as physical contamination (Mediani et al., 2022).

For example, a classical study on risk-oriented design of aseptic processing for heterogeneous food products demonstrated that process parameters should be established based on risk assessment and product variability rather than solely on “average” technological conditions (Kabil et al., 2025). This represents a direct application of the design-for-safety logic, whereby safety is ensured through decisions made at the process design level. Consequently, engineering solutions should be regarded as an integral component of food safety systems rather than merely an auxiliary or secondary aspect.

The aim of this study is to synthesise and systematically analyse contemporary scientific approaches to ensuring the safety of meat products intended for children and sensitive population groups from a risk-oriented perspective, as well as to substantiate the feasibility of using product shape and internal structure as engineering tools for reducing technological risks in the production of dried meat products.

To achieve this aim, the following objectives were addressed:

1. to analyse current scientific approaches to risk-oriented food safety management in meat products intended for children and sensitive population groups;
2. to systematise the main technological risk factors in dried meat products, taking into account water activity and the heterogeneity of mass transfer processes;
3. to evaluate the role of product shape and internal structure as engineering factors for safety control within the multi-barrier (hurdle) concept;
4. to substantiate the applicability of safe-by-design principles in the design of meat products with reduced technological risks.

Materials and methods

This study has a review and analytical character and is based on a systematic analysis of contemporary scientific publications, regulatory documents, and analytical materials addressing food safety of meat products, risk-oriented food safety management, as well as the influence of structural and engineering factors on mass transfer processes in dried meat products.

The materials analysed in this study included peer-reviewed scientific articles from international journals; review publications on drying technologies and stabilisation of meat products; monographs and reference sources in food microbiology, food engineering, and meat technology; regulatory and scientific advisory documents of the European Union (EFSA); international food safety management standards, e.g. ISO 22000, as well as publications addressing the concepts of risk-based approaches, hygienic design, and safe-by-design in related fields.

The literature search was conducted using scientometric databases including Scopus, Web of Science, PubMed, and ScienceDirect, as well as official resources of EFSA and FAO. The search strategy was based on the following keywords: food safety, risk-based approach, meat products, dry-cured sausages, water activity, hurdle technology, safe-by-design, and food engineering.

The literature analysis was carried out using methods of structural and logical analysis (to identify relationships between technological process parameters, product structure, and safety indicators), comparative analysis (to compare different approaches to ensuring the safety of meat products), systematisation and synthesis (aimed at forming an integrated risk-oriented concept of safety management based on product shape and internal structure), as well as critical analysis (to evaluate the limitations of existing technological solutions and the possibilities of their adaptation for

products intended for children and sensitive population groups).

The assessment of the role of structural and engineering factors in shaping the safety of meat products was conducted within the framework of a risk-oriented approach, which involves the identification of key risk factors – primarily microbiological-associated with water activity and dehydration heterogeneity. This approach also includes an analysis of the influence of product geometry and internal structure on mass transfer processes and on the duration for which the product remains in a potentially hazardous state. In addition, structural solutions were interpreted as elements of a multi-barrier food safety system, acting in combination with acidity, water activity, temperature, and formulation-related factors.

The synthesis of the analysis results was performed with consideration of the hurdle technology concept and safe-by-design principles, which in this study are regarded as an applied engineering interpretation of the inherent safety principle in food product development.

Results and discussion

The analytical review of contemporary scientific sources revealed that, alongside formulation- and process-related factors, product shape and internal structure play a significant role in determining the safety of dried meat products, as they directly influence mass transfer processes, the formation of water activity profiles, and microbiological stability.

Control of product shape and internal structure can therefore serve as an effective tool for risk reduction. During the drying of meat products, physicochemical and microstructural changes play a critical role in shaping moisture removal kinetics, structural properties, and overall product quality. Moisture reduction through drying is a key mechanism for limiting microbial growth; however, the effectiveness of this mechanism depends not only on technological conditions (such as temperature and processing time), but also on the internal structure of the product. Recent reviews indicate that drying methods and associated microstructural changes affect drying kinetics, the ability of water to diffuse toward the surface, mass transfer pathways, and,

consequently, the safety and quality of meat products (Mediani et al., 2022).

For example, research findings reported by Kabil et al. (2025) demonstrated that different drying techniques (hot-air, infrared, and microwave drying) exert distinct effects on microstructure and dehydration characteristics in meat samples, thereby confirming the importance of considering structural effects within technological processes. In particular, drying temperature and method significantly alter microstructure, shrinkage behaviour, moisture diffusion rates, and post-drying product properties, including sensory attributes.

The dehydration dynamics of meat products are also closely related to sample geometry and size, which directly affect diffusion pathways for water. The application of drying kinetics models based on Fick's law has demonstrated that the three-dimensional geometry of the product, heterogeneity of initial moisture content, and the combination of internal and external diffusion resistances determine the rate and uniformity of moisture removal (Álvarez et al., 2021). This indicates that product-forming parameters – such as shape, thickness, and internal tissue organisation – are important factors governing mass transfer during drying.

In addition, studies by Aksoy et al. (2019) have shown that different drying methods induce distinct changes in the microstructure of the meat matrix, which are reflected in water reabsorption capacity, colour, porosity, and other quality characteristics. For example, the use of ultrasonic-assisted vacuum drying resulted in higher matrix porosity and a more open structure compared to conventional methods, which in turn affected drying kinetics and the properties of the final product.

Drying temperature and duration also influence the dehydration of muscle proteins and fats, leading to changes in sensory attributes. Microstructural modifications induced by drying may affect hardness, texture, and rehydration capacity, which are important not only from the perspective of final product quality but also in terms of product safety (Li et al., 2025). This is because heterogeneous structures may give rise to zones with different levels of water activity and, consequently, varying risks of microbiological stability.

Public interest in improving safety and reducing risks in meat products also stimulates the development of technological approaches that consider product structural characteristics as an integral part of risk management systems. This includes the assessment of the impact of structural and engineering solutions on moisture transport kinetics, physicochemical changes in the protein-fat matrix, as well as final sensory properties and product safety (Mediani et al., 2022). Such approaches are consistent with the principles of multi-barrier control, in which structural parameters become additional resources for risk management, either as alternatives to or in combination with traditional ingredients and technological additives.

Thus, controlling product shape and internal structure represents a promising direction for optimising drying processes and reducing safety-related risks in meat products. This provides a scientific foundation for the further consideration of specific engineering solutions that can be applied to homogenise moisture and water activity profiles and to shorten the duration during which products remain under potentially hazardous conditions. This aspect is particularly important in the development of meat products intended for children and sensitive population groups.

For food products, and meat products in particular, the practical adaptation of safe-by-design implies the following. Risk reduction should not be limited solely to changes in formulation or the introduction of additional barrier ingredients; instead, product geometry, shape, and internal structure should be considered as parameters capable of controlling mass transfer processes, the formation of water activity profiles, and the duration for which the product remains within the “risk window”. In HACCP terminology, this effectively represents a shift of part of risk control from “additional measures” to the primary design of the product itself. This approach is consistent with the engineering interpretation of SbD as an iterative process (Sánchez Jiménez et al., 2020), in which solutions that preserve product functionality while reducing health risks are selected and subsequently verified using appropriate indicators (e.g. water activity profiles, microbiological criteria, and sensory properties).

In parallel, the European Union is developing the Safe and Sustainable by Design (SSbD) framework for chemicals and materials, which requires safety considerations to be integrated already at the R&D stage and decision-making to be guided by a “safety + life cycle” perspective (European Commission [EC], 2025). Although SSbD is directly targeted at materials, its emergence signals a broader European trend in which regulatory attention is shifting toward the early “embedding” of safety into design decisions. For food technologies, this provides a meaningful conceptual context and a terminological reference framework as a guiding logic, though not yet as an established sector-specific term.

Thus, within a risk-oriented approach to meat products intended for children and sensitive population groups, safe-by-design can be appropriately interpreted as an applied concept of product and process design. According to this concept (Lelieveld et al., 2014), critical risks – primarily microbiological risks associated with water activity and dehydration non-uniformity – are first identified and subsequently mitigated through engineering decisions related to product shape and structure as well as drying parameters, prior to any “corrective” modification of formulation composition. This provides a scientific basis for moving toward the analysis of specific structural solutions in meat systems that are capable of deliberately shortening diffusion pathways and homogenising internal product conditions during drying.

Several approaches to structural solutions for controlling mass transfer in dried meat products can be distinguished. For dried meat products (including dry-fermented and dry-cured sausages, dried whole-muscle products, jerky, etc.), the key technological challenge is the controlled reduction of moisture content and water activity throughout the entire product volume within an acceptable time frame, without compromising product quality. Syntheses of contemporary research indicate that, alongside drying environment parameters (temperature, relative humidity, air velocity), structural characteristics of the product play a decisive role, as they determine internal mass transfer resistance and the spatial heterogeneity of moisture content and water activity profiles within the raw material (Mediani et al., 2022).

Control of product geometry and characteristic dimensions (thickness/radius/shape) can be described as follows. In most drying models of meat products, internal mass transfer is represented by a diffusion mechanism (even though the real system may be more complex), and in this case the characteristic diffusion length (e.g. sausage radius or layer thickness) directly determines the rate of moisture equalisation. The shorter the diffusion path, the faster a safe water activity profile is established. From a mathematical standpoint, such systems are frequently approximated using Fickian diffusion models, where characteristic diffusion length becomes a critical determinant of dehydration kinetics (Crank, 1975). Shrinkage phenomena further modify effective diffusion pathways and must be considered in realistic modelling scenarios (Mayor & Sereno, 2004). The practical significance of geometry and deformation/shrinkage during drying is demonstrated by models of dry-fermented sausages that account for real or irregular shapes and shrinkage behaviour (Cascone et al., 2015).

Control of internal microstructure and porosity exhibits specific features. Studies on meat drying processes show that drying conditions shape porosity, density, and microstructure, which in turn affect drying rate and product quality attributes such as texture, rehydration capacity, and hardness. Review studies explicitly emphasise the link between drying processes and porosity and structure, and subsequently their influence on drying kinetics and product properties (Mediani et al., 2022).

In addition, it has been demonstrated (Kim et al., 2022) that pore formation can reduce undesirable shrinkage and excessive hardness in certain dried meat products (e.g. jerky), which is particularly important for the acceptability of products intended for sensitive population groups.

Control of matrix heterogeneity (fat phase content and characteristics of the protein network) leads to the following considerations. Drying occurs within a multicomponent protein-fat matrix, and microstructural changes during dehydration affect both mass transfer and sensory properties. Practical studies on the drying of meat raw materials indicate (Kabil et al., 2025) that different drying regimes significantly alter microstructure and quality indicators (including colour, texture, and

oxidation-related parameters). Thus, structural solutions should be evaluated not only in terms of drying rate, but also with respect to quality changes.

However, any structural solution that accelerates moisture removal may potentially alter moisture gradients, shrinkage behaviour, and the formation of a surface layer or crust. This can result in undesirable effects such as the occurrence of locally overdried zones, texture non-uniformity, loss of juiciness, and enhanced oxidative processes. For this reason, contemporary reviews on meat drying dynamics (Álvarez et al., 2021) emphasise the need for a comprehensive analysis that accounts for drying kinetics, internal and external mass transfer resistances, microstructure, and product quality.

A separate methodological aspect concerns the heterogeneity of water activity and the sensitivity to sampling location in dried and fermented meat products. This issue is particularly relevant for any structural innovations (Beño et al., 2023), as they may modify the spatial water activity profile. Accordingly, control and comparative assessments should be performed using consistent and appropriate sampling protocols (e.g. centre versus periphery of the product, standardised sample preparation).

For products intended for children and sensitive population groups, structural solutions should be selected according to the following set of criteria, which integrate product safety and quality:

1. emphasis on drying kinetics (reduction of the time required to reach the target water activity value) (Álvarez et al., 2021);
2. emphasis on the heterogeneity of moisture content and water activity profiles (reduction of centre-to-periphery gradients and improved reproducibility of results) (Beño et al., 2023);
3. emphasis on product quality (structure and texture, colour, and oxidation indicators as markers of stability) (Kabil et al., 2025);
4. technological feasibility of product manufacturing (applicability in real production conditions, controllability of process parameters, and absence of new contamination sources in accordance with hygienic design principles) (Mediani et al., 2022).

When formulated in this way, the approach fully complies with risk-oriented logic. This is because it does not introduce an additional barrier without proper justification; instead, product shape and/or internal structure are designed so as to deliberately reduce risk factors – primarily the duration of potentially hazardous internal conditions and the heterogeneity of water activity – while maintaining product quality.

Based on this, the following generalisations of the risk-oriented approach can be made, and directions for further research on meat products intended for children and sensitive consumer groups can be identified.

The analysis of scientific literature indicates that the safety of dried meat products is formed as a result of the interaction of multiple protective barriers, among which water activity, dehydration dynamics, spatial moisture gradients, and structurally determined features of mass transfer within the protein–fat matrix play a key role. This is consistent with the principles of the hurdle technology concept, according to which an increased level of safety can be achieved not only through ingredient-based solutions, but also through the control of process parameters and product properties.

In the context of products intended for children and sensitive population groups, a risk-oriented approach requires particular attention to factors that determine the duration for which a product remains under potentially hazardous conditions, as well as to the heterogeneity of the internal microenvironment. For this reason, the control of water activity and related parameters should be based not only on final values, but also on appropriately selected sampling methodologies

and the assessment of internal moisture profiles. This is essential for the objective comparison of technological solutions aimed at intensifying drying processes.

Conclusions

The adaptation of the safe-by-design logic to food technologies can be regarded as a practical extension of the risk-oriented approach. In this context, risk reduction is achieved by designing technological processes and product characteristics in such a way as to minimise the occurrence of hazardous scenarios (e.g. prolonged zones of elevated water activity) and to improve the reproducibility of safety indicators. In the food sector, closely related concepts include hygienic design of equipment and risk-oriented process design, in which engineering solutions are considered integral components of food safety management systems rather than merely technical support for production.

Based on the above considerations, the following research directions appear promising for dried meat products intended for children and sensitive population groups:

- development of methodologies for comparative assessment of technological solutions based on water activity profiles and microbiological stability indicators;
- investigation of the effects of product shape and internal structure on drying kinetics and product quality;
- identification of technologically justified approaches to reducing dependence on preservative additives through the controlled enhancement of other food safety barriers.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Це дослідження не генерувало нових експериментальних даних і базується на аналізі та синтезі наукових публікацій, нормативних документів та відкритих джерел. Усі використані дані та джерела інформації представлені безпосередньо в тексті статті та у списку літератури / This study did not generate new experimental data and is based on the analysis and synthesis of scientific publications, regulatory documents, and open sources. All data and information sources used are presented directly in the text of the article and in the reference list.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Жодне фінансування, спонсорство чи інший вплив з боку зовнішніх організацій не вплинули на проведення дослідження, інтерпретацію результатів або підготовку рукопису / The authors declare no conflict of interest. No funding, sponsorship, or other influence from external organisations affected the conduct of the study, the interpretation of results, or the preparation of the manuscript.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Álvarez, S., Álvarez, C., Hamill, R., Mullen, A. M., & O'Neill, E. (2021). Drying dynamics of meat highlighting areas of relevance to dry-aging of beef. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20, e12845. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12845>

Aksoy, A., Karasu, S., Akcicek, A., & Kayacan, S. (2019). Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat. *Foods*, 8(6), 216. <https://doi.org/10.3390/foods8060216>

Beňo, F., Kostlán, J., Pivoňka, J., Pohůnek, V., & Ševčík, R. (2023). Water activity of Czech dry-cured meat products: Influence of sampling point and sample preparation method. *Czech Journal of Food Sciences*, 41(5), 340–347. <https://doi.org/10.17221/99/2023-CJFS>

Brykova, T. (2024). HACCP system in the production of semi-finished products. *Commodity Science, Technologies and Engineering*, 50(2), 93–109. [https://doi.org/10.31617/2.2024\(50\)07](https://doi.org/10.31617/2.2024(50)07) (in Ukrainian)

Брикова Т. Система HACCP при виробництві напівфабрикатів. *Міжнародний науково-практичний журнал "Товари і ринки"*. 2024. No 2 (50). С. 93–109. [https://doi.org/10.31617/2.2024\(50\)07](https://doi.org/10.31617/2.2024(50)07)

CAC. (1999). Principles and guidelines for the conduct of microbiological risk assessment (CAC/GL-30). Codex Alimentarius Commission.

Cascone, G., Setegn, H. G., Miccio, M., & Diaferia, C. (2015). A tool for modelling and simulation of irregular shape and shrinking salami during drying. *Chemical Engineering Transactions*, 43, 103. <https://doi.org/10.3303/CET1543018>

Codex Alimentarius Commission. (2022). General principles of food hygiene (CXC 1-1969): Annex-Hazard analysis and critical control point (HACCP) system and guidelines for its application. FAO/WHO. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/codes-of-practice/en/>

Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). Oxford University Press.

EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS). (2017). Re-evaluation of nitrites (E 249–250) and nitrates (E 251–252) as food additives. *EFSA Journal*, 15(6), e04786. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4786>

European Commission. (2025). Safe and sustainable by design: Chemicals and advanced materials. Research and Innovation. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/chemicals-and-advanced-materials/safe-and-sustainable-design_en

- European Food Safety Authority. (2017, June 15). EFSA explains risk assessment: Nitrites and nitrates added to food. <https://www.efsa.europa.eu/en/corporate/pub/nitritesandnitrates170614>
- Fontana, A. J. (2000). Water activity's role in food safety and quality. *Food Safety Magazine*, 6(2), 54–59.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). Food safety risk management: Evidence-informed policies and decisions, considering multiple factors. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/58107321-1049-4897-85cc-621a4f4ad986/content>
- Gibson, A. M., Bratchell, N., & Roberts, T. A. (1988). Predicting microbial growth: The effect of water activity on growth of Salmonella. *International Journal of Food Microbiology*, 6(2), 155–178. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(88\)90058-9](https://doi.org/10.1016/0168-1605(88)90058-9)
- International Finance Corporation. (2020). Food safety handbook: A practical guide for building a robust food safety management system. World Bank Group. <https://www.worldbank.org>
- International Organization for Standardization. (2018). Food safety management systems—Requirements for any organization in the food chain (ISO 22000:2018). <https://www.iso.org/standard/65464.html>
- Kabil, E., Çakır, M. A., Yalınkılıç, B., & Başlar, M. (2025). Quality and microstructural changes in salted goose meat dried by hot-air, infrared, and microwave techniques. *Processes*, 13(10), 3223. <https://doi.org/10.3390/pr13103223>
- Kim, D.-H., Kim, Y. J., Shin, D.-M., Lee, J. H., & Han, S. G. (2022). Drying characteristics and physicochemical properties of semi-dried restructured sausage depend on initial moisture content. *Food Science of Animal Resources*, 42(3), 411–425. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2022.e12>
- Labuza, T. P., & Altunakar, B. (2007). Water activity prediction and moisture sorption isotherms. In G. V. Barbosa-Cánovas et al. (Eds.), *Water activity in foods* (pp. 109–154). Blackwell Publishing.
- Leistner, L. (2000). Basic aspects of food preservation by hurdle technology. *International Journal of Food Microbiology*, 55(1–3), 181–186. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00161-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00161-6)
- Lelieveld, H. L. M., Mostert, M. A., & Curiel, G. J. (2014). Hygienic design of food processing equipment. In H. L. M. Lelieveld, J. T. Holah, & D. Napper (Eds.), *Hygiene in food processing* (2nd ed., pp. 91–141). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098634.2.91>
- Li, W., Zhou, Y., Du, Q., et al. (2025). Research progress on the effects of drying methods on the eating quality of dried meat products. *Meat Research*, 39(1), 72–81. <https://doi.org/10.7506/rlyj1001-8123-20240902-233>
- Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373–386. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4)
- Mediani, A., Hamezah, H. S., Faidruz, A., Mahadi, N., Chan, S., Rohani, E., Che Lah, N. H., Azlan, U., Khairul Annuar, N. A., Azman, N., Bunawan, H., Sarian, M., Kamal, N., & Abas, F. (2022). A comprehensive review of drying meat products and the associated effects and changes. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1057366. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1057366>

Nauta, M. J. (2000). Separation of uncertainty and variability in quantitative microbial risk assessment models. *International Journal of Food Microbiology*, 57(1–2), 9–18. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00225-7)

Patarata, L., Fernandes, L., Silva, J. A., & Fraqueza, M. J. (2022). The risk of salt reduction in dry-cured sausage assessed by the influence on water activity and the survival of Salmonella. *Foods*, 11(3), 444. <https://doi.org/10.3390/foods11030444>

Ross, T., & McMeekin, T. A. (2003). Modeling microbial growth within food safety risk assessments. *Risk Analysis*, 23(1), 179–197. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00300>

Sánchez Jiménez, A., Puelles, R., Pérez-Fernández, M., Gómez-Fernández, P., Barrietabeña, L., Jacobsen, N. R., Suarez-Merino, B., Micheletti, C., Manier, N., Trouiller, B., & Navas, J. M. (2020). Safe(r) by design implementation in the nanotechnology industry. *NanoImpact*, 20, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100267>

Sebranek, J. G., & Bacus, J. N. (2007). Cured meat products without direct addition of nitrate or nitrite: What are the issues? *Meat Science*, 77(1), 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.03.025>

Tornberg, E. (2005). Effects of heat on meat proteins - Implications on structure and quality of meat products. *Meat Science*, 70(3), 493–508. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.11.021>

Received: 09.01.2026. **Accepted:** 08.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Batrachenko O., Todorov M. Development of a risk-based approach to meat product safety. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. P. 170-181. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.15>

Cite this article in APA style as:

Batrachenko, O., & Todorov, M. (2026). Development of a risk-based approach to meat product safety. *Biota. Human. Technology*, (1), P. 170-181. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.15>

Information about the authors:

Batrachenko O. [*in Ukrainian: Батраченко О.*]¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, email: o.batrachenko@chdtu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8920-0743
Department of Food Technology, Cherkassy State Technological University
333 Shevchenko Boulevard, Cherkassy, 18005, Ukraine

Todorov M. [*in Ukrainian: Тодоров М.*]², PhD student, email: nikolayohotnik4@gmail.com
ORCID: 0009-0002-1488-4065
Department of Food Technology, Cherkassy State Technological University
333 Shevchenko Boulevard, Cherkassy, 18005, Ukraine

¹ Conceptualization of the study; development of the research idea and theoretical framework; formulation of the research objectives; analysis and interpretation of scientific literature; drafting and critical revision of the manuscript; final approval of the version to be published.

² Literature search and data collection; systematization and analysis of scientific sources; participation in the preparation of the manuscript; assistance in drafting and formatting the text.

UDC 663.2(477)

DOI: 10.58407/bht.1.26.16



Copyright (c) 2026 Oleksandr Vasylyk, Eduard Gorodetsky

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Олександр Василик, Едуард Городецький

**ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДУБОВИХ МАТЕРІАЛІВ
І КОНТРОЛЬОВАНОЇ МІКРООКСИГЕНАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИТРИМКИ
УКРАЇНСЬКИХ ЧЕРВОНИХ ВИН**



Oleksandr Vasylyk, Eduard Gorodetsky

**USE OF ALTERNATIVE OAK MATERIALS AND
CONTROLLED MICROOXIGENATION IN THE AGEING TECHNOLOGY
OF UKRAINIAN RED WINES**

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Вивчити вплив дубових препаратів у різній формі (Танін NA-MT, BLEND AO/FO 75, натурна деревина) у поєднанні з мікрооксигенацією, на кінетику показників червоних вин протягом 12 місяців, удосконалити технологію та оцінити зміни фізико-хімічних показників.

Методологія. В якості дослідних зразків вивчалися молоді червоні вина з винограду сортів Каберне Совіньйон, Мерло та Одеський чорний, вироблені в південній частині Одеської області, без додаткової стабілізації. Варіанти дослідження різнилися використанням дубових препаратів у різній формі: сухий Танін NA-MT, рідкий препарат BLEND AO/FO 75 та дубові чіпси. У якості контролю використовувалась витримка вина у дубовій бочці об'ємом 225 л. При експериментах були використані методи аналізу: спектрофотометрія у системі CIELab згідно методики OIV-MA-AS2-11, визначення фенольних речовин методом Folin-Ciocalteu, барвних речовин – колориметричним методом. Обробка проводилась з використанням методів регресійного аналізу, описової статистики, кластерного аналізу.

Наукова новизна. Вивчено комплексний вплив екзогенних фенольних речовин деревини дубу у різній формі (сухий сублімат, рідкий екстракт, та натурна деревина) на динаміку зміни фенольних та барвних речовин, а також оптичних показників в українських червоних винах. Розроблена схема мікрооксигенації, з нелінійним додаванням кисню, адаптована до вмісту фенольних речовин українських вин, що моделює окисні процеси у дубовій бочці.

Висновки. У герметичних резервуарах розчинений кисень зменшувався експоненційно до мінімальних рівнів, обмежуючи окиснення. У бочках кисень підтримувався на вищому рівні рівноваги через дифузію. Фенольні речовини мали тенденцію до зменшення в усіх варіантах, а барвні речовини – з найсильнішим ефектом для варіанту з Таніном NA-MT. У дослідних зразках спостерігалась зміна кольору: збільшення яскравості (L^*), зменшення червоного відтінку (a^*), посилення жовтого (b^*). Евклідові відстані показали подібність варіантів BLEND AO/FO 75 та дубових чіпсів до показників витримки у бочці.

Запропонована схема мікрооксигенації ефективно моделює витримку в бочці, пропонуючи економічні альтернативи для українського виноробства. Рекомендується індивідуальне коригування доз залежно від сорту та виду дубу. Напрямок подальших досліджень – зміна сенсорних профілів та стабільності показників протягом часу.

Ключові слова: витримка червоних вин, альтернативні дубові матеріали, мікрооксигенація, фенольні сполуки, барвні речовини, стабільність кольору, українські вина

ABSTRACT

Purpose of the work. To study the influence of oak preparations in various forms (tannin NA-MT, blend AO/FO 75, natural wood) in combination with micro-oxygenation on the kinetics of red wine indicators over 12 months, improve the technology, and evaluate changes.

Methodology. Young red wines from grape varieties Cabernet Sauvignon, Merlot, and Odeskyi Chorny, produced in the southern part of the Odessa region, without additional stabilization. Oak preparations in various forms: dry tannin NA-MT, liquid preparation BLEND AO/FO 75, and oak chips. An oak barrel with a volume of 225 L was used as a control.

Measurements: spectrophotometry in the CIELab system according to the OIV-MA-AS2-11 method, determination of phenolic substances by the Folin-Ciocalteu method, coloring substances – by colorimetric method. Data processing: regression analysis, descriptive statistics, cluster analysis.

Scientific novelty. The comprehensive influence of exogenous phenolic substances from oak wood in various forms (dry sublimate, liquid extract, and natural wood) on the dynamics of changes in phenolic and coloring substances, as well as optical indicators in Ukrainian red wines, has been studied. A micro-oxygenation scheme with nonlinear oxygen addition, adapted to the phenolic content of Ukrainian wines, has been developed, which models oxidative processes in an oak barrel.

Conclusions. In hermetic tanks, dissolved oxygen decreased exponentially to minimal levels, limiting oxidation. In barrels, oxygen was maintained at a higher equilibrium level through diffusion. Phenolic substances tend to decrease in all variants, while coloring substances show the strongest effect for the variant with tannin NA-MT. Changes in color were observed in the experimental samples: increase in lightness (L^*), decrease in red tone (a^*), enhancement of yellow (b^*). Euclidean distances showed similarity between the BLEND AO/FO 75 and oak chips variants to the indicators of aging in a barrel.

The proposed micro-oxygenation scheme effectively models barrel aging, offering economical alternatives for Ukrainian winemaking. Individual dose adjustments are recommended depending on the variety and type of oak. Further research will focus on changes in sensory profiles and parameter stability over time.

Key words: red wine aging, alternative oak materials, micro-oxygenation, phenolic compounds, coloring substances, color stability, Ukrainian wines

Вступ

Витримка червоних вин у дубовій тарі, наприклад, бочках (бариках) є розповсюдженим технологічним прийомом, що, згідно з сучасними дослідженнями, сприяє стабілізації кольору, полімеризації фенольних сполук та формуванню органолептичного профілю завдяки екстракції та взаємодії компонентів деревини дубу та складових частин вина. В якості цих компонентів можуть виступати похідні лігніну, елаготанінів, лактонів та інші, які екстрагуються з дубу видів *Quercus petraea* або *Quercus alba*. При витримці в дубовій тарі також проходить поступове надходження кисню завдяки дифузії через клебку у кількості 0,5–5 мл O_2 /дм³/місяць залежно від ряду факторів таких, як об'єм тари, температура витримки, вік та вид дубу, вологість повітря та ін. Умови витримки в дубовій тарі вважаються оптимальними для розвитку якісних показників вина, однак, економічні фактори (наприклад, вартість барика \approx 800–1200 €) та обмежена доступність дубової сировини стимулюють використання альтернативних дубових препаратів у вигляді чіпсів, кубиків, екстрактів та їх субліматів у поєднанні з герметичними резервуарами з нержавіючої сталі.

Дубові альтернативні препарати у різних формах набувають широкої популярності в сучасному виноробстві як економічна заміна традиційних бочок, що

дозволяє передавати ароматичні та поліфенольні компоненти дубу без необхідності великих інвестицій у бочки (Aleksovych & Tkachenko, 2024; Sánchez-Gómez et al., 2020; Schmidtke et al., 2011). Для більш повного створення умов, що моделюють витримку у дубових бочках, окрім процесів екстракції, необхідно забезпечити надходження певної кількості кисню, необхідної для проходження процесів формування вина. Це можна зробити за рахунок використання мікрооксигенації, що дозволяє імітувати окисні процеси за набагато нижчої собівартості (5–20 % від вартості технології у бариках) (Vasylyk & Gorodetsky, 2025).

Метод мікрооксигенації у виноробстві був запропонований Патріком Дюкурно (Patrick Ducournau) (Ducournau & Laplace, 1995) і в основному застосовувався для пом'якшення аstringентності у сортах винограду з високим фенольним потенціалом.

Компоненти деревини дубу у поєднанні з мікрооксигенацією, яка забезпечує контрольований потік кисню, сприяють полімеризації танінів, стабілізації антоціанінів та формуванню більш стійких кольорових пігментів, одночасно знижуючи ризик підвищеного окиснення та появи небажаних сенсорних нот (Canas et al., 2019; Del Alamo et al., 2010; Gómez-Plaza & Bautista-Ortín, 2019).

Під час використання мікрооксигенації вирішальне значення має точний контроль

рівня кисню, оскільки надлишок кисню може призвести до небажаних змін якості вина. Для проведення цього процесу потрібно спеціалізоване обладнання та контроль введення точних доз кисню, які забезпечують досягнення бажаних ефектів (Canas et al., 2019).

Ріберео-Гайон (Ribéreau-Gayon, 1931) було встановлено, що кількість надходження кисню у результаті дифузії через дубову клепку бочки становить 15-45 мг/дм³/рік. Цей діапазон показників досі широко згадується в багатьох літературних джерелах.

У подальших дослідженнях (del Alamo-Sanza & Nevares, 2014) показано, що потрапляння кисню до вина в умовах витримки в бочці є нелінійним явищем. Фактична середня швидкість оксигенації за рік (на рівні 11,62 мг/дм³/рік) була значно нижчою, ніж швидкість, що спостерігалася протягом перших тижнів випробувань. Окрім цього, було встановлено (Qiu et al., 2018), що нелінійність потрапляння кисню у вино може бути наслідком не лише зміни швидкості дифузії, а також за рахунок десорбції кисню з дубової деревини на першому етапі витримки у новій дубовій тарі.

Таким чином, зважаючи на зростаючу популярність технології альтернативного дозрівання вин у світі, цьому напрямку присвячена значна кількість наукових досліджень, результати яких постійно оновлюються та доповнюються. В умовах виноробної галузі України дані технологічні прийоми ще не набули широкого

використання та недостатньо вивчені. Отже, метою проведення дослідження було вивчення впливу альтернативних дубових препаратів у комбінації з прийомами мікрооксигенації на фізико-хімічні та якісні показники українських червоних вин з метою удосконалення технології їх виробництва. Для цього було поставлено завдання кількісно оцінити вплив альтернативних дубових препаратів у комбінації з мікрооксигенацією на кінетику фізико-хімічних, колориметричних та, у подальшому, сенсорних показників червоних вин у процесі витримки протягом 12 місяців.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводилося на молодому червоному вині з сортів Каберне Совиньон, Мерло та Одеський чорний. Виноматеріали отримані з винограду, вирощеного у південній частині Одеської області. Технологічна схема виробництва вина передбачала подрібнення винограду з відокремленням гребнів, додавання чистої культури дріжджів, алкогольне бродіння м'язги, пресування м'язги, доброджування виноматеріалів, декантацію з дріжджового осаду, проведення яблучно-молочного бродіння, та самоосвітлення виноматеріалів шляхом відстоювання. Для запобігання впливу інших факторів на результати експерименту додаткову технологічну обробку стабілізуючими речовинами не проводили. Початкові фізико-хімічні показники дослідних виноматеріалів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.

Фізико-хімічні показники дослідних виноматеріалів

Сорт винограду	Об'ємна частка етилового спирту, %	Масова концентрація					рН
		титрованих кислот, г/дм ³	цукру, г/дм ³	діоксида сірки, мг/дм ³	фенольних речовин, мг/дм ³	барвних речовин, мг/дм ³	
Каберне Совиньон	13,2	5,6	2,7	130	3540	425	3,5
Мерло	13,4	5,5	2,8	135	3128	470	3,4
Одеський чорний	13,0	5,7	2,7	125	3186	540	3,3

У якості джерел компонентів деревини дубу були використані наступні препарати.

1. Сухий препарат Танін NA-MT (SARL New Alternative Oak, Франція), являє собою танін, отриманий методом вилучення з французького та європейського дубу *Quercus Robur* та *Quercus Petraea*, витриманого на відкритому повітрі не менше 24 місяців. Виробник рекомендує даний препарат для використання при виробництві білих, червоних і рожевих вин при ферментації та витримці, а також для різних інших видів спиртних напоїв. Форма препарату – сухий сублімований продукт.

2. Рідкий препарат дубу BLEND AO/FO 75 (SARL New Alternative Oak, Франція) - це елаговий танін, отриманий з французького, європейського та американського дубу (*Quercus Robur*, *Quercus Petraea* та *Quercus Alba*) шляхом екстрагування водним методом з деревини, витриманій на відкритому повітрі протягом щонайменше 18 місяців. Призначений для використання як з винами, так і з міцними напоями. Доступний у рідкому вигляді, масова концентрація поліфенольних речовин, у перерахунку на галову кислоту, складає 75 г/дм³.

3. Дубові чіпси (ТОВ «ВУД ІНТЕРНАЦІОНАЛ», Україна) – великі дубові тріски, обпалені за класичною технологією. Виготовляються з сировини вищого та першого сорту, яка пройшла атмосферну сушку протягом не менш ніж 24 місяці під відкритим небом. Вистояна сировина проходить процес додаткової сушки, після чого її подрібнюють та обпалюють. Даний продукт використовують при ферментації та витримці вина та інших алкогольних напоїв.

Дозування сухого препарату таніну NA-MT складало 0,25 г/дм³ що є середньою нормою, рекомендованою виробником. Рідкий препарат BLEND AO/FO 75 містить 75 г/дм³ (7,5 %) фенольних речовин та його еквівалентне дозування складало 3,3 мл/дм³. Дубові чіпси у натурному вигляді додавали у дозі 2 г/дм³.

Паралельно проводили досліди з витримкою тих самих вин у дубовій бочці ємністю 225 л другого заливу.

Визначення хроматичних характеристик та координати кольору у системі CIELab дослідних зразків визначали згідно методики OIV-MA-AS2-11 Determination of chromatic characteristics according to CIELab (OIV, 2006).

При проведенні фотоколориметричних досліджень був використаний спектрофотометр

EMC-11S-V з діапазоном вимірювання довжини хвиль 325-1000 нм зі спеціалізованим програмним забезпеченням EMCLAB-λ Lambda.

Визначення загального вмісту фенольних речовин у дослідних зразках проводили колориметричним методом з використанням реактиву Folin-Ciocalteu. Калібрування проводили відносно розчинів галової кислоти завідомо відомої концентрації.

Загальний вміст барвних речовин у дослідних зразках визначали колориметричним методом. Калібрування проводили відносно розчинів мальвідину-3-глікозиду завідомо відомої концентрації.

Результати дослідження та обговорення

На першому етапі досліджень вивчали динаміку концентрації розчиненого кисню у червоних винах з дослідних сортів Каберне Совіньйон, Мерло та Одеський чорний, що витримувалися в герметичній тарі без доступу зовнішнього кисню (склі). Дані одержано шляхом вимірювання концентрації кисню (мг/дм³) на різних етапах витримки: від 0 до 12 місяців. Вимірювання проводилися в точках: 0; 0,25; 0,5; 1; 3; 6; 9 та 12 місяців.

З даних, наведених на рис. 1, спостерігається загальна тенденція до зменшення концентрації кисню з часом для всіх сортів. Початкова концентрація на рівні 2,4–2,5 мг/дм³ швидко знижується протягом перших 0,25–1 місяця (до 0,3–0,4 мг/дм³), після чого стабілізується на рівні близько 0,1 мг/дм³ з 9 місяця витримки. Характер спаду — експоненційний, що узгоджується з кінетикою першого порядку, де швидкість зменшення пропорційна концентрації O₂, що є типовим для окиснення фенольних сполук у винах. Різниця між сортами мінімальні: Мерло демонструє дещо повільніше початкове зниження порівняно з Каберне Совіньйон, тоді як Одеський чорний займає проміжне положення. Ці зміни можуть бути пов'язані з особливостями хімічного складу та різними концентраціями основних компонентів, зокрема фенольних сполук.

Таким чином, у герметичній тарі кисень, присутній у вині на початковому етапі, повністю споживається протягом короткого періоду витримки, що обмежує подальші окисні процеси.

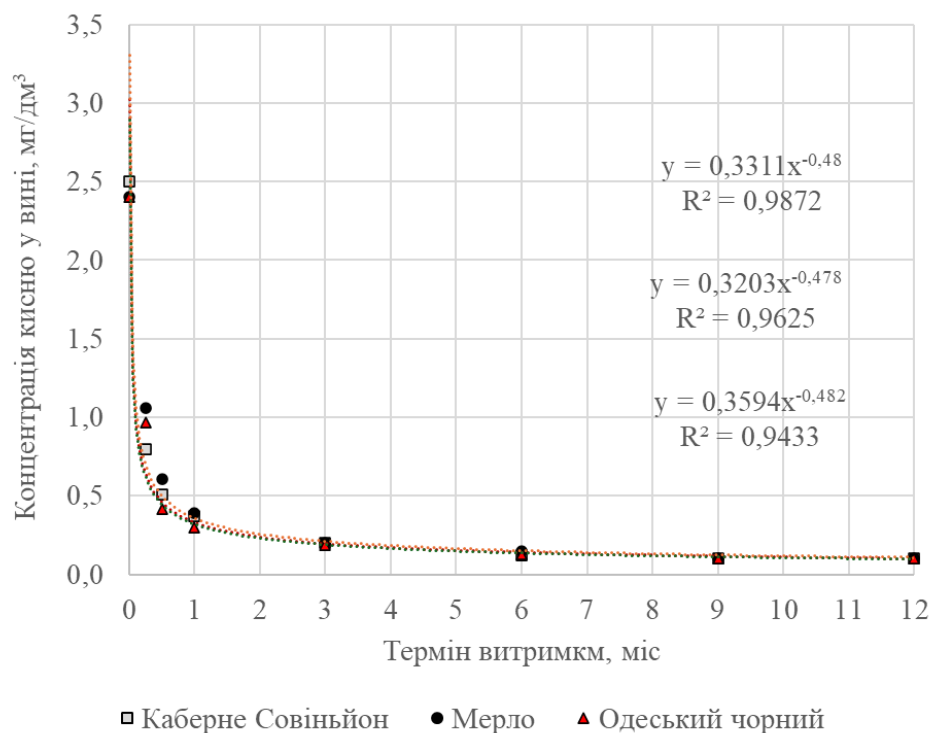


Рис.1. Динаміка зміни концентрації кисню у дослідних виноматеріалах при витримці у герметичній тарі

Одночасно з дослідженнями, які проводились у герметичній тарі, було вивчено зміну концентрації кисню у червоному вині з сорту Одеський чорний, що

знаходився у дубовій тарі – бочці об'ємом 225 л, так само протягом 12 місяців в ідентичних умовах зовнішнього середовища (в одному приміщенні).

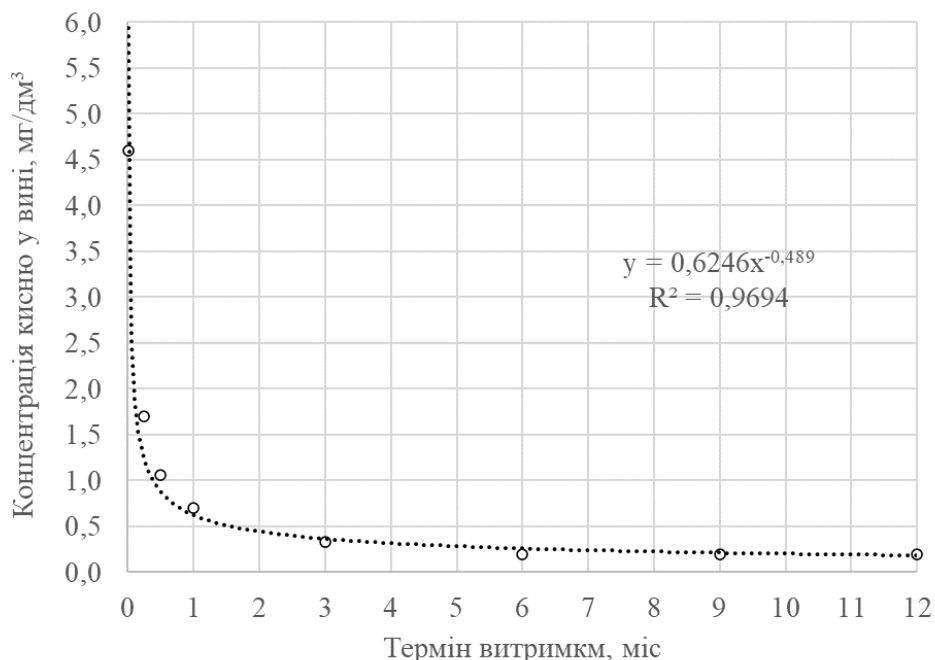


Рис. 2. Динаміка концентрації кисню у виноматеріалі з сорту Одеський чорний при витримці у дубовій бочці

З даних, наведених на рис. 2 видно, що початкова концентрація кисню у вині, що знаходиться у бочці дещо вища (4,62 мг/дм³ на початку витримки), ніж у герметичній тарі, що можна пояснити десорбцією та дифузією кисню через деревину дубу. Протягом перших 3 місяців спостерігається швидке зменшення концентрації кисню, але після цього процес сповільнюється, і кисень продовжує підтримуватися на низькому, але ненульовому рівні (0,1 мг/дм³). Динаміка зміни концентрації, так само як і у герметичній тарі, носить експоненційний характер, проте швидкість спаду концентрації носить більш повільний та пологий характер. Навіть після 12 місяців концентрація кисню залишається на рівні 0,22 мг/дм³, що вище порівняно з герметичною тарою.

Апроксимація виконана за моделлю степеневі функції:

$$C(t) = a * t^b \quad (1)$$

де $C(t)$ - концентрація розчиненого кисню (мг/дм³),

t - час,

a і b - параметри.

Степенева апроксимація відображає нелінійний розпад, де параметр $b < 0$ вказує на зменшення з уповільненням з часом. Лінії тренду показують подібні значення b (-0,478 до -0,489) для всіх варіантів, що вказує на спільну кінетику споживання кисню. Між тим, маємо невеликі відмінності: «а» більше в умовах витримки в бочці через більшу стартову концентрацію кисню, «b» – нижче у сорта Мерло, що вказує на дещо повільніше засвоєння кисню порівняно з іншими сортами.

Вочевидь, дубова тара завдяки дифузії кисню через деревину забезпечує тривалий, обмежений доступ кисню, що дозволяє протягом усього терміну витримки підтримувати повільні окисні процеси. Графік ілюструє не просто «витрачання» кисню, а скоріше динамічну рівновагу між постійним надходженням мікродоз кисню через дуб і його хімічним споживанням вином. Проте, слід зазначити, що незважаючи на постійну дифузію кисню через дубову деревину, у вині постійна масова концентрація кисню суттєво не збільшується, особливо у другій половині витримки. Це свідчить про те, що загальна швидкість надходження кисню за рахунок

дифузії через клепку менше, ніж швидкість поглинання кисню вином за рахунок проходження окисних процесів. Таким чином, для моделювання процесів окисигенації, які проходять у дубових бочках, необхідно забезпечити не лише надходження до вина певної кількості кисню, а й правильний розподіл його протягом часу дозрівання. Саме цей повільний, контрольований окисний процес є ключем до м'якості, складної ароматики та стабільності витриманих в дубових бочках вин. Також, з отриманих даних видно, що більша частина кисню до вина надходить у перші місяці.

Таким чином, однією з цілей дослідження було створення умов, що дозволять наблизити кисневий режим під час витримки у герметичній тарі до режиму витримки у дубових бочках. При цьому, одним з ключових моментів є режим дозування кисню протягом періоду витримки, тобто періодичність та дози кисню. Очевидно, що правильного режиму можна досягти, визначивши управління киснем залежно від хімічного складу вина, а також типу альтернативного дубового продукту (тріски, кубики та клепки тощо), та ботанічного виду дубу.

На сьогодні існують дві основні стратегії проведення мікрооксигенації: плаваюча доза кисню (із підтримкою заданого значення розчиненого кисню, наприклад 50 мкг/дм³) та фіксована доза додавання кисню (наприклад, дозування 3 мл/дм³/місяць) (Del Alamo et al., 2010; Sánchez-Gómez et al., 2018). Проте, конкретні параметри для кожного вина доцільно корегувати. Для вирішення цього завдання необхідно проведення додаткових досліджень з використанням специфічного обладнання, яке не завжди є у більшості виробників.

Результати споживання кисню червоними винами за різних стратегій мікрооксигенації та стружкою *Q. pyrenaica* показали, що споживається весь доступний кисень, і споживання залежало від обраної стратегії мікрооксигенації. Наприклад, вина з фіксованою дозою мікрооксигенації отримували від 3 до 3,5 разів більше кисню, ніж при використанні плаваючої дози (Sánchez-Gómez et al., 2018).

Оскільки, згідно сучасних наукових поглядів, фенольні речовини вина є одним з основних «споживачів» кисню, то була досліджена динаміка зміни масової концентрації фенольних речовин під час витримки за класичною технологією у дубовій діжці та при додаванні екзогенних фенольних речовин і витримкою у герметичній тарі.

З даних, наведених на рис. 3 можна спостерігати початкове зростання концентрації фенольних сполук. У випадку дубової бочки спостерігається поступове зростання, зумовлене екстракцією фенольних речовин з матеріалу бочки, тоді як в інших варіантах експерименту зростання є різким і зумовленим додаванням екзогенних фенольних сполук.

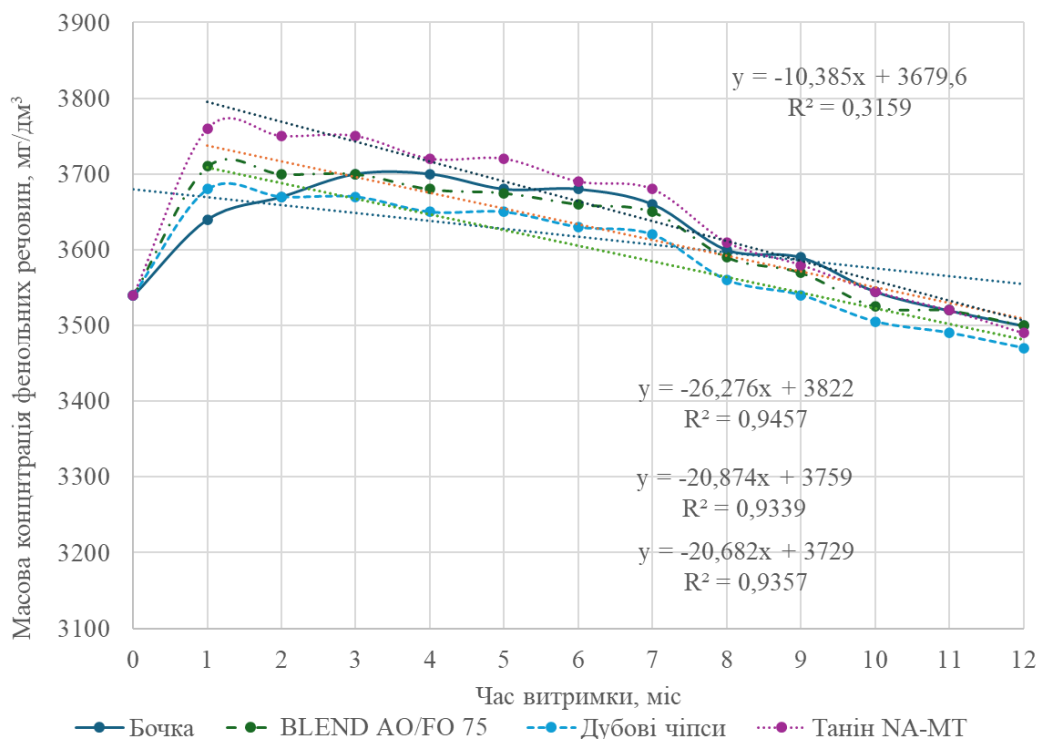


Рис. 3. Зміна загальної концентрації фенольних сполук у вино матеріалі сорту Каберне Совиньон під час витримки

Лінійна регресія з першого місяця показує негативну тенденцію для всіх варіантів з екзогенними фенольними речовинами (від -16 до -26 мг/дм³ на місяць), з високими значеннями R² (0,93-0,94). Проте, у випадку з дубовою бочкою спостерігається початкове накопичення у період 1-4 місяці, а потім динаміка стає подібною до інших варіантів дослідження – поступове зниження, пов'язане з процесами окислення, полімеризації та випадіння до осаду.

З урахуванням отриманих даних по динаміці фенольних речовин, на наш погляд, при мікрооксигенації найбільш раціональною схемою дозування кисню буде така, яка буде мати кореляцію з динамікою фенольних речовин, тобто забезпечить поглинання основної частини на початковому етапі і потім підтримуватиме мінімальну кількість

розчиненого кисню для завершення процесів формування вина. При цьому, під час витримки можливе коригування кількості кисню залежно від фізико-хімічних та органолептичних показників конкретного вина.

Якщо порахувати загальну різницю у концентрації фенольних речовин на початку та наприкінці витримки, а потім порахувати, який відсоток займають показники у кожному місяці, то узагальнена картина за середніми показниками з усіх варіантів дослідження має вигляд, представлений на рис. 4.

Як видно, за перший місяць зменшення кількості фенольних речовин складає близько 14,1 %, за другий 13,4 %, за третій 13,4 %, за п'ятий 12,0 % і так далі, поступово зменшуючись до 0, а сума усіх відсотків за період відповідно складає 100 %.

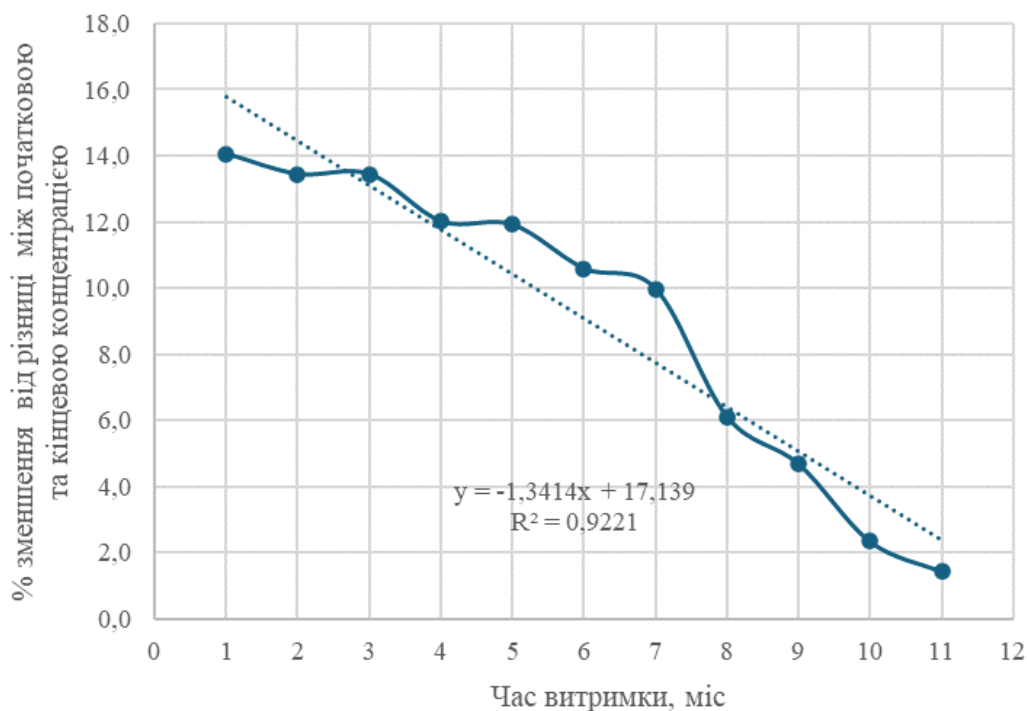


Рис. 4. Динаміка зміни масової концентрації фенольних речовин за кожний місяць витримки (% від загальної різниці на початку та в кінці витримки)

Саме у такому співвідношенні нами була поділена загальна доза кисню, яку використовували у наступному експерименті по витримці виноматеріалів з дубовою альтернативою та проведенням мікрооксигенації.

На підставі аналізу динаміки концентрації розчиненого кисню та фенольних сполук у герметичній тарі та дубових бочках, нами було проведено серію експериментів з метою оцінки впливу мікрооксигенації у комбінації з альтернативними дубовими препаратами на фізико-хімічні та колориметричні показники червоних вин.

Схема експерименту включала дозування препаратів дубу перед початком витримки у герметичній тарі. Загальна доза кисню – 30 мг/дм³ була розділена на 12 етапів у наступному співвідношенні:

- 1 місяць - 4,2 мг/дм³ або 14,1%,
- 2 місяць - 4,0 мг/дм³ або 13,4 %,
- 3 місяць - 4,0 мг/дм³ або 13,4 %,
- 4 місяць - 3,6 мг/дм³ або 12,0 %,
- 5 місяць - 3,6 мг/дм³ або 11,9 %,
- 6 місяць - 3,2 мг/дм³ або 10,6 %,
- 7 місяць - 3,0 мг/дм³ або 10 %,
- 8 місяць - 1,8 мг/дм³ або 6,1 %,
- 9 місяць - 1,4 мг/дм³ або 4,7 %,
- 10 місяць - 0,7 мг/дм³ або 2,3 %,

11 місяць - 0,4 мг/дм³ або 1,4 %.

Контрольна витримка проводилась у дубовій бочці, об'ємом 225 л.

Протягом проведення експерименту концентрація фенольних речовин у всіх варіантах демонструвала поступове зменшення протягом періоду витримки (рис. 5), що є характерним для процесів окислення, полімеризації та взаємодії з білками та полісахаридами вина. У варіанті з BLEND AO/FO 75 концентрація знизилася з 3330 мг/дм³ на 1-му місяці до 3218 мг/дм³ на 12-му (загальне зменшення на 3,36 %; середнє значення 3277,42 мг/дм³, стандартне відхилення 37,38 мг/дм³). Лінійна регресія показала нахил -10,71 мг/дм³ на місяць ($r = -0,989$, $R^2 = 0,978$, $p < 0,0001$), що вказує на високу лінійну залежність і статистичну значущість тенденції.

Для дубових чіпсів зменшення склало з 3300 мг/дм³ до 3227 мг/дм³ (2,21 %; середнє 3260,42 мг/дм³, стандартне відхилення 24,37 мг/дм³), з нахилом -7,01 мг/дм³ ($r = -0,993$, $R^2 = 0,986$, $p < 0,0001$).

Варіант з таніном NA-МТ показав найвище зменшення – з 3370 мг/дм³ до 3193 мг/дм³ (5,25 %; середнє 3295,25 мг/дм³, стандартне відхилення 57,79 мг/дм³), нахил -16,53 мг/дм³ ($r = -0,987$, $R^2 = 0,974$, $p < 0,0001$).

У контрольному варіанті (бочка) – з 3240 мг/дм³ до 3200 мг/дм³ (1,23 %; середнє 3272,08 мг/дм³, стандартне відхилення 37,94 мг/дм³), нахил -6,52 мг/дм³ ($r = -0,593$, $R^2 = 0,352$, $p = 0,0420$), що є статистично значущим, але з нижчим ступенем лінійності

порівняно з іншими варіантами. Це є цілком логічно, оскільки на початковому етапі концентрація фенольних речовин збільшується за рахунок екстракції, тому закономірність зміни концентрації не має вираженої лінійної залежності.

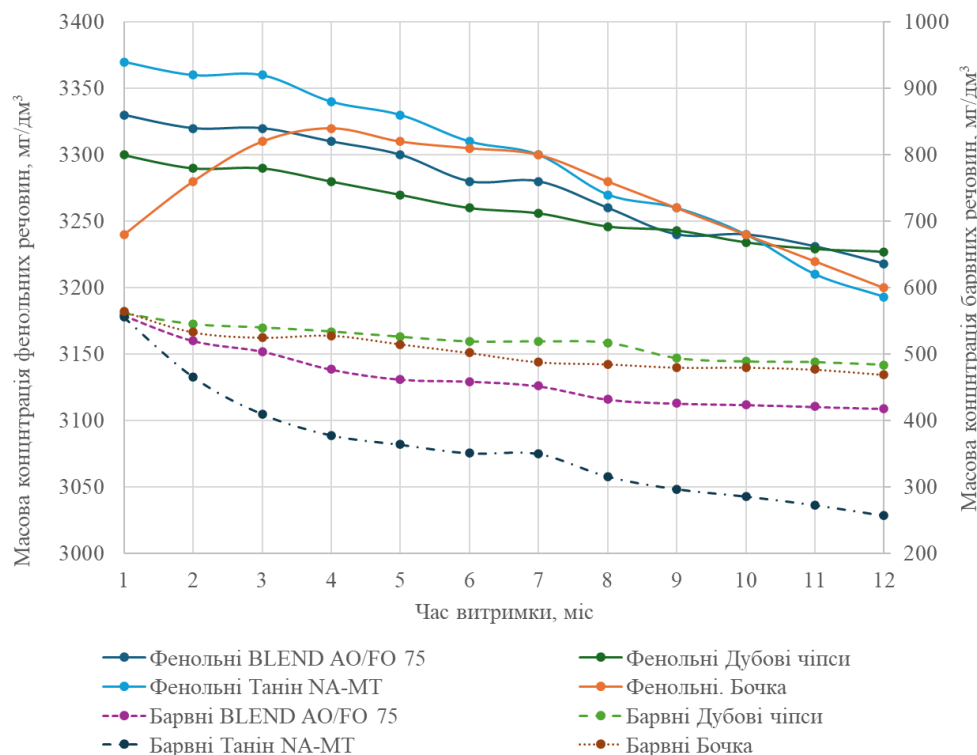


Рис. 5. Зміна масової концентрації фенольних речовин та барвних речовин під час витримки у дослідному виноматеріалі з сорту Одеський чорний

Концентрація барвних речовин (переважно антоціанів та їх похідних) також зменшувалася в усіх варіантах, але з вираженою варіабельністю швидкостей, що відображає різну інтенсивність процесів стабілізації кольору через окислення та ко-полімеризацію з таніном. У варіанті з BLEND AO/FO 75 – з 558 мг/дм³ до 418 мг/дм³ (зменшення на 25,09%; середнє 462,75 мг/дм³, стандартне відхилення 42,75 мг/дм³), нахил -11,69 мг/дм³ ($r = -0,944$, $R^2 = 0,891$, $p < 0,0001$). Для дубових чіпсів — з 561 мг/дм³ до 484 мг/дм³ (13,73 %; середнє 518,00 мг/дм³, стандартне відхилення 23,91 мг/дм³), нахил -6,80 мг/дм³ ($r = -0,982$, $R^2 = 0,964$, $p < 0,0001$). Варіант з таніном NA-MT продемонстрував найрізкіше падіння – з 556 мг/дм³ до 257 мг/дм³ (53,78 %; середнє 358,67 мг/дм³, стандартне відхилення 82,77 мг/дм³), нахил -22,53 мг/дм³ ($r = -0,940$, $R^2 = 0,884$, $p < 0,0001$), що може свідчити про інтенсивну деградацію антоціанів, ймовірно, через прискорену ко-полімеризацію з доданими таніном під контрольованою

оксигенацією, призводячи до осадження нестабільних пігментів.

У контрольному варіанті – з 564 мг/дм³ до 469 мг/дм³ (16,84 %; середнє 503,83 мг/дм³, стандартне відхилення 27,85 мг/дм³), нахил -7,72 мг/дм³ ($r = -0,957$, $R^2 = 0,916$, $p < 0,0001$). Висока варіабельність у варіанті з таніном NA-MT (найвище стандартне відхилення) вказує на потенційну нестабільність процесу, тоді як дубові чіпси забезпечували найменшу варіабельність.

Порівняльний аналіз показує, що варіанти з мікрооксигенацією (BLEND AO/FO 75, дубові чіпси, Танін NA-MT) мали вищі швидкості зменшення порівняно з контролем, з найвищими значеннями для таніну NA-MT, що може вказувати на його роль як каталізатора окислювальних реакцій.

По-різному також проходила зміна колориметричних показників дослідних виноматеріалів. Кольорові координати у системі CIELab, розраховані згідно з методикою OIV-MA-AS2-11, наведені у таблиці 2.

Таблиця 2.

Показники кольорових координат у системі CIELab дослідних виноматеріалів

Координати у системі CIELab	До витримки	Після витримки			
		BLEND AO/FO 75	Дубові чіпси	Танін NA-MT	Бочка
L*	2,17	2,28	2,30	2,26	2,35
a*	15,46	13,94	13,80	14,27	13,20
b*	3,75	4,20	4,30	4,25	4,35

У всіх варіантах спостерігалось збільшення L* (ΔL^* від 0,09 до 0,18), що вказує на освітлення вина, зменшення a* (Δa^* від -1,19 до -2,26), що свідчить про втрату червоного відтінку, та збільшення b* (Δb^* від 0,45 до 0,60), що відображає посилення жовтого компоненту. Ці зміни є типовими для процесів витримки червоних вин, пов'язаними з деградацією антоціанів, окисленням фенольних сполук та утворенням стабільних пігментів.

Для об'єктивного порівняння різниці зміни оптичних характеристик дослідних зразків, нами був використаний показник Евклідової відстані, врахований у багатовимірному просторі на підставі одночасно трьох показників L*, a* та b*.

Отримана відстань між дослідними зразками наведена у таблиці 3, а результати кластеризації на підставі відстаней на рис. 6.

Найменша різниця у відстані (0,17) спостерігалась між варіантами з BLEND AO/FO 75 та дубовими чіпсами, далі BLEND AO/FO 75, що вказує на високу подібність змін кольору серед цих варіантів.

Зразок, витриманий у бочці, показав помірні відстані до дубових чіпсів (0,61) та BLEND AO/FO 75 (0,76), але більшу відстань до Таніну NA-MT (1,08). Порівняно з зразком до витримки, варіант з бочкою виявив найбільшу зміну кольору (2,35), за ним слідує дубові чіпси (1,75), BLEND AO/FO 75 (1,59) та Танін NA-MT (1,29).

Таблиця 3.

Матриця відстаней між зразками по результатам зміни оптичних характеристик

	До витримки	BLEND AO/FO 75	Дубові чіпси	Танін NA-MT	Бочка
До витримки	0,00				
BLEND AO/FO 75	1,59	0,00			
Дубові чіпси	1,75	0,17	0,00		
Танін NA-MT	1,29	0,33	0,47	0,00	
Бочка	2,35	0,76	0,61	1,08	0,00

З даних, наведених на рис. 6, видно що серед зразків існує чітке розділення «До витримки» та «Після витримки», що логічно через зменшення a* та збільшення L* і b* у всіх варіантах після витримки.

При цьому варіант досліду витримки у бочці виділяється окремо, оскільки має найбільше зменшення a* та збільшення L*.

Варіанти з препаратами BLEND AO/FO 75, дубовими чіпсами та Танін NA-MT

групуються разом, вказуючи на подібний вплив на колір (менші зміни порівняно з бочкою).

Отримані дані по відстаням показують, що такі препарати як BLEND AO/FO 75 та дубові чіпси краще наближають ефекти бочки, ніж сублімовані таніни, що вказує на необхідність використання змішаних або комбінованих протоколів у промисловому виноробстві.

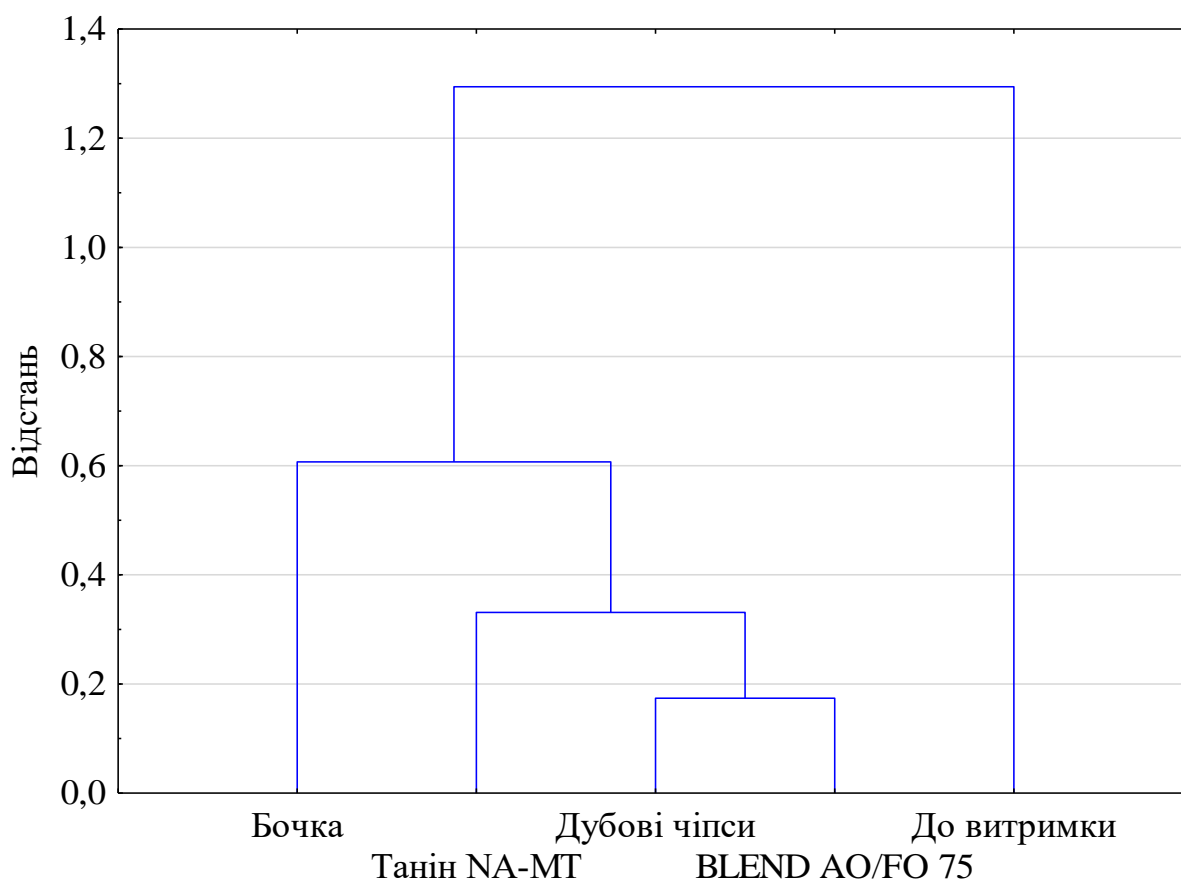


Рис. 6. Результати кластеризації дослідних зразків за оптичними характеристиками L^* , a^* , b^*

Висновки

На підставі проведених досліджень встановлено наступне.

1. Динаміка концентрації розчиненого кисню у герметичній тарі демонструє швидке експоненційне зменшення з початкових значень 2,4–2,5 мг/дм³ до стабільного рівня близько 0,1 мг/дм³ після 9 місяців, що обмежує подальші окисні процеси та стабілізацію вина. У дубовій бочці концентрація кисню підтримується на вищому рівні (до 0,22 мг/дм³ після 12 місяців) завдяки постійній дифузії через деревину, забезпечуючи динамічну рівновагу між надходженням і споживанням кисню, що узгоджується з літературними даними про нелінійність оксигенації.

2. Запропонована схема мікрооксигенації з загальною дозою кисню, розподіленою пропорційно динаміці зменшення фенольних сполук (від 14,1 % у першому місяці до 1,4 % в одинадцятому), ефективно моделює кисневий режим традиційної витримки в бочці. Це призводить до контрольованого зменшення

концентрації фенольних речовин на 1–5% у варіантах з альтернативними препаратами, подібно до контрольованого варіанту у бочці, через процеси окиснення, полімеризації та осадження, з урахуванням початкового накопичення фенольних у бочці за рахунок екстракції.

3. Концентрація барвних речовин, зменшується на 14–54 % у всіх варіантах, з найбільшою інтенсивністю для варіанту з таніном NA-МТ (до 53,78 %), що вказує на потенційні ризики надмірної деградації кольору через прискорену ко-полімеризацію, тоді як препарати BLEND АО/FO 75 та дубові чіпси забезпечують зміни, ближчі до ефектів бочки, з меншою варіабельністю.

4. Колориметричні показники у системі CIE Lab відображають типові зміни під час витримки: збільшення L^* (освітлення) на 0,09–0,18, зменшення a^* (втрата червоного відтінку) на 1,19–2,26 та збільшення b^* (посилення жовтого) на 0,45–0,60. Евклідові відстані у кольоровому просторі та кластерний аналіз підтверджують високу подібність

альтернативних варіантів з BLEND AO/FO 75 та дубових чіпсів до традиційної витримки в бочці, водночас з помітними варіаціями для препарату NA-MT, що свідчить про необхідність підбору препаратів залежно від бажаного ефекту на колір.

5. Альтернативні технології мікро-оксигенації з дубовими препаратами є економічно вигідною заміною традиційним дубовим бочкам для українського виноробства, де такі методи ще недостатньо поширені.

Рекомендується індивідуальне коригування доз кисню та типів препаратів залежно від сорту вина, фенольного потенціалу та ботанічного виду дубу для уникнення надмірного окиснення. Перспективні подальші дослідження, у напрямку оцінки сенсорних профілів дослідних вин, їх довгостроковій стабільності у порівнянні з іншими стратегіями мікрооксигенації, з метою оптимізації промислового застосування.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflicts of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

- Aleksovych, V., & Tkachenko, O. (2024). Use of oak alternative products in vinification. *Food Science and Technology*, 18(1). <https://doi.org/10.15673/fst.v18i1.2856>
- Canas, S., Caldeira, I., Anjos, O., & Belchior, A. P. (2019). Phenolic profile and colour acquired by the wine spirit in the beginning of ageing: Alternative technology using micro-oxygenation vs traditional technology. *LWT*, 111, 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.018>
- Del Alamo, M., Nevares, I., Gallego, L., Fernández de Simón, B., & Cadahía, E. (2010). Micro-oxygenation strategy depends on origin and size of oak chips or staves during accelerated red wine aging. *Analytica Chimica Acta*, 660(1–2), 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.11.044>
- del Alamo-Sanza, M., & Nevares, I. (2014). Recent Advances in the Evaluation of the Oxygen Transfer Rate in Oak Barrels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(35), 8892–8899. <https://doi.org/10.1021/jf502333d>

Ducournau, P., & Laplace, J.-L. (1995). Procédé de dosage et d'injection de gaz pour cuverie de vinification et installation à cet effet (Patent No. FR2709983A1). <https://patents.google.com/patent/FR2709983A1/en?q=+FR2709983>

Gómez-Plaza, E., & Bautista-Ortín, A. B. (2019). Emerging Technologies for Aging Wines: Use of Chips and Micro-Oxygenation (c. 149–162). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814399-5.00010-4>

OIV. (2006). OIV-MA-AS2-11 Determination of chromatic characteristics according to CIELab. <https://www.oiv.int/standards/compendium-of-international-methods-of-wine-and-must-analysis/annex-a-methods-of-analysis-of-wines-and-musts/section-2-physical-analysis/chromatic-characteristics-%28type-i%29>

Qiu, Y., Lacampagne, S., Mirabel, M., Mietton-Peuchot, M., & Ghidossi, R. (2018). Oxygen desorption and oxygen transfer through oak staves and oak stave gaps: An innovative permeameter. *OENO One*, 52(1). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.1.909>

Ribéreau-Gayon, J. (1931). Contribution à l'étude des oxydations et réductions dans les vins. Impr. Gounouilhou.

Sánchez-Gómez, R., del Alamo-Sanza, M., Martínez-Gil, A. M., & Nevares, I. (2020). Red Wine Aging by Different Micro-Oxygenation Systems and Oak Wood—Effects on Anthocyanins, Copigmentation and Color Evolution. *Processes*, 8(10), 1250. <https://doi.org/10.3390/pr8101250>

Sánchez-Gómez, R., Nevares, I., Martínez-Gil, A. M., & Del Alamo-Sanza, M. (2018). Oxygen Consumption by Red Wines under Different Micro-Oxygenation Strategies and *Q. pyrenaica* Chips. Effects on Color and Phenolic Characteristics. *Beverages*, 4(3), 69. <https://doi.org/10.3390/beverages4030069>

Schmidtke, L., Clark, A., & Scollary, G. (2011). Micro-Oxygenation of red wine: Techniques, applications, and outcomes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(2), 115–131. <https://doi.org/10.1080/10408390903434548>

Vasylyk, O., & Gorodetsky, E. (2025). Current state and prospects of the use of alternative oak wood preparations in winemaking. *Human and nation's health*, 3(3), 15–33. <https://doi.org/10.31548/humanhealth.3.2025.15> (in Ukrainian)

Василик, О. В., & Городецький, Е. Р. (2025). Сучасний стан та перспективи використання альтернативних препаратів деревини дубу у виноробстві. *Здоров'я людини і нації*, 3(3), 15–33. <https://doi.org/10.31548/humanhealth.3.2025.15>

Received: 14.01.2026. **Accepted:** 19.02.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Василик О., Городецький Е. Використання альтернативних дубових матеріалів і контрольованої мікрооксигенації в технології витримки українських червоних вин. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 182-195. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.16>

Cite this article in APA style as:

Vasylyk, O., & Horodetsky, E. (2026). Vykorystannia alternatyvnykh dubovykh materialiv i kontrolovanoi mikrooksyhenatsii v tekhnolohii vytrymky ukrainskykh chervonykh vyn [Use of alternative oak materials and controlled microoxygenation in the ageing technology of Ukrainian red wines]. *Biota. Human. Technology*, (1), P. 182-195. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.16> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Vasylyk O. [*in Ukrainian: Василик О.*] ¹, Assoc. Prof., Ph.D. in Tech. Sc., email: a.v.vasylyk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0546-4141

Department of Wine Technology Structure and Sensory Analysis, Odesa National University of Technology
112, Kanatnaya Street, Odesa, 65039, Ukraine

Gorodetsky E. [*in Ukrainian: Городецький Е.*] ², PhD student, email: egorodetsky33@gmail.com

ORCID: 0009-0006-1467-0170

Department of Wine Technology Structure and Sensory Analysis, Odesa National University of Technology
112, Kanatnaya Street, Odesa, 65039, Ukraine

¹ Study design, manuscript preparation, statistical analysis.

² Data collection, study design, manuscript preparation, statistical analysis.



CHEMICAL TECHNOLOGIES AND BIOGEOCHEMICAL PROCESSES

**ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
БІОГЕОХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ**





Copyright (c) 2026 Olena Kiziun, Valery Zazhigalov, Igor Ymnov, Inna Trus

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).**Олена Кізиун, Валерій Зажигалов, Ігор Умнов, Інна Трус****ВПЛИВ УМОВ ПРОВЕДЕННЯ ФОТОКАТАЛІТИЧНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ
ПАРАЦЕТАМОЛУ ТА ДИКЛОФЕНАКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ TiO_2 І ZnO** **Olena Kiziun, Valery Zazhigalov, Igor Ymnov, Inna Trus****THE INFLUENCE OF PHOTOCATALYTIC DEGRADATION CONDITIONS OF
PARACETAMOL AND DICLOFENAC USING TiO_2 AND ZnO** **АНОТАЦІЯ**

Мета роботи. Дослідження фотокаталітичної деградації парацетамолу (ПЦ) та диклофенаку (ДФ) у водних розчинах за дії оксиду цинку (ZnO) та діоксиду титану (TiO_2), визначення впливу рН та дози каталізатора на швидкість деструкції, а також порівняння ефективності різних фотокаталітичних систем.

Методологія. Для визначення оптимальних умов проведення фотокаталітичних процесів були досліджені наступні параметри: вплив рН робочих розчинів та концентрацій каталізаторів. Деградацію досліджували в умовах УФ-опромінення. Процес моделювався кінетикою псевдо-першого порядку. На основі експериментальних даних були розраховані константи швидкості реакції (k) та періоди напіврозпаду ($t_{1/2}$) для кожного варіанта умов.

Наукова новизна. Вперше проведено порівняльний аналіз деградації ПЦ та ДФ в однакових умовах із застосуванням двох найпоширеніших фотокаталізаторів – ZnO та TiO_2 – що дозволило встановити відмінності у їхній реакційній здатності щодо різних класів фармацевтичних забруднювачів. Визначено закономірності впливу рН середовища на фотокаталітичну активність TiO_2 і ZnO для ПЦ та ДФ, що демонструє чітку залежність: зниження рН підсилює деградацію в більшій мірі для TiO_2 , ніж для ZnO . Виявлено, що TiO_2 проявляє значно вищу активність у кислому середовищі, забезпечуючи практично повне знешкодження ПЦ вже при концентрації каталізатора $0,5 \text{ г/дм}^3$, що дозволяє оптимізувати технологічні умови фотокаталітичного очищення стічних вод. Встановлено різницю у кінетичній поведінці двох органічних забруднювачів, де ПЦ деградує швидше, ніж ДФ у всіх експериментальних умовах, що вказує на різну стійкість структур молекул та їхню реакційну здатність у фотокаталітичних процесах.

Висновки. Встановлено, що ПЦ розкладається швидше за ДФ незалежно від типу фотокаталізатора. Найвищу ефективність забезпечує TiO_2 у кислому середовищі (рН 5), тоді як ZnO демонструє помірну активність. Зниження рН та збільшення маси каталізатора інтенсифікують процес деградації фармацевтичних сполук.

Ключові слова: фотокаталіз, фармацевтичні забруднювачі, каталізатор, парацетамол, диклофенак, деградація

ABSTRACT

Purpose of the work. To investigate the photocatalytic degradation of paracetamol (PAR) and diclofenac (DCF) in aqueous solutions under the action of zinc oxide (ZnO) and titanium dioxide (TiO_2); to determine the influence of pH and catalyst dosage on the degradation rate; and to compare the efficiency of different photocatalytic systems.

Methodology. To determine the optimal conditions for the photocatalytic processes, the following parameters were investigated: the effect of the pH of the working solutions and the concentrations of the catalysts. Degradation was carried out under UV irradiation, and the process was modelled using pseudo-first-order kinetics. Based on experimental data, reaction rate constants (k) and half-life periods ($t_{1/2}$) were calculated for each set of conditions.

Scientific novelty. For the first time, a comparative analysis of PAR and DCF degradation under identical conditions using two of the most widespread photocatalysts – ZnO and TiO_2 – was conducted, enabling the identification of differences in their reactivity toward distinct classes of pharmaceutical pollutants. The study established regularities in the influence of pH on the photocatalytic activity of TiO_2 and ZnO for both PAR and DCF, demonstrating a clear trend: lowering pH enhances degradation more significantly for TiO_2 than for ZnO . It was found that TiO_2 exhibits substantially higher activity in acidic media, enabling nearly complete PAR removal even at a catalyst concentration of 0.5 g/dm^3 ,

which provides a basis for optimizing photocatalytic wastewater treatment conditions. Differences in the kinetic behaviour of the two pollutants were identified: PAR consistently degraded faster than DCF under all experimental conditions, indicating variations in molecular stability and reactivity during photocatalytic processes.

Conclusions. PAR degraded faster than DCF regardless of the photocatalyst type. The highest degradation efficiency was achieved with TiO_2 in acidic medium (pH 5), while ZnO showed moderate activity. Lowering pH and increasing catalyst dosage intensified the degradation of pharmaceutical compounds.

Key words: photocatalysis, pharmaceutical pollutants, catalyst, paracetamol, diclofenac, degradation

Вступ

Глобальне погіршення якості водних ресурсів, викликане значним зростанням людської діяльності, індустріалізацією та використанням великої кількості хімічних речовин, стало однією з найважливіших екологічних проблем сьогодення. Водні системи постійно забруднюються новими класами хімічних сполук, відомих як мікрозабруднювачі, або контамінанти, що викликають особливе занепокоєння (emerging contaminants, ECs). Ці забруднювачі характеризуються низькими концентраціями (від нг/дм^3 до мкг/дм^3), значною стійкістю, біоаккумуляцією та потенційно шкідливим впливом на екосистеми та здоров'я людини (Hofman & Teo, 2021).

Серед ECs особливе місце посідають фармацевтичні субстанції, які широко застосовуються у медицині для лікування, діагностики та профілактики захворювань. До найпоширеніших належать такі анальгетики та протизапальні засоби, як парацетамол (ПЦ) та диклофенак (ДФ) (Lee et al., 2020). Ці речовини регулярно потрапляють у навколишнє середовище, переважно через стічні води, скиди фармацевтичних підприємств та екскрецію з організму людини чи тварин, часто виявляючись у поверхневих, ґрунтових і навіть питних водах. Наприклад, парацетамол є одним із найчастіше зафіксованих фармацевтичних забруднювачів у ґрунтових водах, особливо на урбанізованих та промислових об'єктах. Незважаючи на те, що концентрації цих препаратів зазвичай низькі, їхня стійкість до традиційних методів очищення стічних вод (таких як коагуляція, осадження та біологічне очищення) призводить до їх постійної присутності в природних водоймах. Це вимагає розробки інноваційних та ефективних систем для їхнього повного видалення та мінералізації.

Одним із найбільш перспективних напрямків для подолання проблеми стійких органічних забруднювачів є передові процеси окиснення (Advanced Oxidation Processes, AOPs). Ці методи ґрунтуються на генерації високореактивних форм кисню, зокрема гідроксильних радикалів ($\cdot\text{OH}$), які швидко та неселективно руйнують органічні сполуки, перетворюючи їх на нешкідливі продукти, такі як CO_2 та H_2O . Серед AOPs, гетерогенний фотокаталіз є екологічно чистою (зеленою), економічною та високоефективною технологією (Li et al., 2023). В основі фотокаталізу лежить здатність напівпровідникових каталізаторів поглинати світлове випромінювання (зазвичай UV) з енергією, що перевищує їхню ширину забороненої зони, що призводить до утворення електронно-діркових пар (e^-/h^+). Ці носії заряду мігрують на поверхню каталізатора, де ініціюють ланцюг радикальних реакцій, що призводять до деструкції забруднювачів (Samraio et al., 2023).

Основними об'єктами дослідження у гетерогенному фотокаталізі є оксидні напівпровідники, серед яких найширше застосування знайшли діоксид титану (TiO_2) та оксид цинку (ZnO). TiO_2 , зокрема у фазі анатазу, високо цінується завдяки своїй хімічній стабільності, нетоксичності, корозійній стійкості та високій окиснювальній ефективності, що робить його ключовим матеріалом для очищення води. Однак, TiO_2 має значну ширину забороненої зони (3,2 eV) (Tanos et al., 2024), що обмежує його активацію лише ультрафіолетовим (УФ) світлом, а швидка рекомбінація електронно-діркових пар знижує загальну ефективність фотокаталітичного процесу (Samraio et al., 2023).

Оксид цинку (ZnO) є ще одним перспективним напівпровідником, який має пряму широку заборонену зону (3,37 eV) (Baibara et al., 2021) і також є нетоксичним та економічно вигідним (його виробництво

може бути значно дешевшим порівняно з TiO_2) та перспективним матеріалом для видалення полютантів (Vica et al., 2020). ZnO демонструє високу початкову активність, часто завдяки наявності поверхневих дефектів (кисневих вакансій), які сприяють утворенню активних радикалів. Однак його застосування обмежене через часткову розчинність у слабокислому середовищі ($\text{pH} < 6$), що може призводити до дезактивації поверхні та втрати каталізатора.

Ефективність фотокаталітичного процесу критично залежить від операційних параметрів, таких як pH середовища та концентрація каталізатора. Зміна pH впливає на поверхневий заряд напівпровідника (наприклад, TiO_2 та ZnO), ступінь іонізації молекул забруднювача та швидкість утворення радикалів. У свою чергу, концентрація каталізатора визначає кількість доступних активних центрів, але її надмірне збільшення може призводити до екранування UV-випромінювання та розсіювання світла, що знижує загальну швидкість реакції (Tanos et al., 2024). Таким чином, оптимізація цих параметрів є ключовою для розробки оптимальних технологій очищення води.

Мета цієї роботи полягала у дослідженні фотокаталітичної деградації двох важливих забруднювачів фармацевтичного походження – парацетамолу та диклофенаку – у водних розчинах за дії ZnO та TiO_2 .

Матеріали та методи дослідження

В роботі використані методи фотометричного аналізу, потенціометричний та кінетичний методи. Фотометричний аналіз використовували для визначення концентрації диклофенаку та парацетамолу у водних розчинах. Потенціометричний метод застосовували для вимірювання pH досліджуваних розчинів. Кінетичний метод – для оцінювання швидкості фотокаталітичної деструкції та визначення кінетичних параметрів процесу.

У дослідженні розглянуто дві фармацевтичні сполуки – парацетамол ($\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2$, IUPAC: N-(4-гідроксифеніл)ацетамід) та диклофенак ($\text{C}_{14}\text{H}_{11}\text{Cl}_2\text{NO}_2$, IUPAC: 2-[2-(2,6-дихлораніліно)феніл]оцтова кислота).

Усі експериментальні дослідження проводили у кварцових реакційних кюветах

або фотолізних реакторах із забезпеченням стабільного УФ-опромінювання, контрольованих параметрів перемішування та температури. Для підтримання постійної температури використовували циркуляційний термостат, а перемішування забезпечували магнітні мішалки зі швидкістю 400–600 об/хв. Вибір таких умов пояснюється необхідністю рівномірного розподілу фотокаталізатора у водній фазі та запобігання його седиментації, що могло б впливати на кінетику процесу.

Вимірювання оптичної густини проводили на двопроменевому спектрофотометрі (Shimadzu UV-1800) у діапазоні 190–800 нм з використанням кварцових кювет товщиною 1 см, об'ємом 2 мл, та автоматичною корекцією фону. Значення pH робочих розчинів контролювали за допомогою pH метра (Іономір I-160M).

Об'єм робочого розчину, що містив фармацевтичну сполуку, становив 100 мл. Реакційну суміш опромінювали джерелом ультрафіолетового випромінювання (Phillips HPA 150). Розчини відбирали у визначені моменти часу та негайно фільтрували крізь мембрани 0,22 мкм, щоб усунути вплив суспендованого фотокаталізатора на оптичне поглинання.

Для парацетамолу використовували довжину хвилі $\lambda = 275$ нм, для диклофенаку – $\lambda = 276$ нм, оскільки саме на цих довжинах спостерігався максимальний пік поглинання.

Для ZnO аналізували чотири комбінації умов для кожної сполуки: pH 6 і 8 при концентраціях 0,25 та 0,50 г/дм³. Вибір такого діапазону pH пов'язаний з обмеженою стабільністю ZnO у більш кислому середовищі, де можливе часткове розчинення каталізатора.

Для TiO_2 детально проаналізовано по дві комбінації умов для кожного з модельних забрудників. Для парацетамолу розглянуто pH 5 при концентрації TiO_2 0,25 г/дм³ і pH 7 при 0,50 г/дм³. Для диклофенаку – pH 5, TiO_2 0,50 г/дм³ та pH 7, TiO_2 1,00 г/дм³.

Початкова концентрація у всіх серіях парацетамолу та диклофенаку становила 10 мг/дм³.

Ефективність вилучення ПЦ та ДФ розраховували за формулою:

$$A = \frac{C_{\text{поч}}(\text{ПЦ/ДФ}) - C_{\text{зал}}(\text{ПЦ/ДФ})}{C_{\text{поч}}(\text{ПЦ/ДФ})} \cdot 100\%$$

де $C_{\text{поч(ПЦ/ДФ)}}$ – початкова концентрація ПЦ чи ДФ в розчині, мг/дм³; $C_{\text{зал(ПЦ/ДФ)}}$ – залишкова концентрація ПЦ чи ДФ в розчині, мг/дм³.

Період напіврозпаду, тобто час з який початкова концентрація зменшується вдвічі, розраховували за формулою:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0,693}{k},$$

де k – константа швидкості реакції першого порядку.

Усі експериментальні вимірювання проводили у триразовій повторюваності, результати подано у вигляді середнього арифметичного значення. Обробку експериментальних даних та побудову кінетичних залежностей здійснювали з використанням стандартних статистичних пакетів MS Excel.

Результати дослідження та обговорення

Кількісні результати фотокаталітичної деградації ПЦ та ДФ у водних розчинах представлені у вигляді залишкової концентрації з часом. Ці дані є основою для аналізу кінетики процесу, який моделювали за псевдо-першим порядком. Усі серії експериментів розпочиналися з початкової концентрації обох фармацевтичних забруднювачів 10 мг/дм³. Дослідження проводилися за різних умов, щоб визначити вплив двох ключових параметрів: типу каталізатора (ZnO або TiO₂) та його дози, а також рН середовища. Зокрема, для ZnO було проаналізовано умови при рН 6 та 8, а для TiO₂ – при рН 5 та 7, з різними концентраціями каталізаторів (від 0,25 до 1,00 г/дм³). Детальна інформація про зміну залишкової концентрації парацетамолу та диклофенаку, що вимірювалася кожні 10 хвилин протягом 60 хвилин фотокаталітичної деградації в присутності ZnO та TiO₂ за різних значень рН і маси каталізатора, узагальнена у таблиці 1.

Практична ефективність ZnO значною мірою залежить від рН розчину, оскільки оксид цинку є частково розчинним у слабкислому середовищі. Тому для коректного порівняння було обрано два значення рН – 6 та 8, що відображають відповідно умови, близькі до межі стабільності ZnO та умови нейтрального

середовища. Паралельно досліджували вплив концентрації каталізатора 0,25 г/дм³ і 0,50 г/дм³.

Аналіз цих даних демонструє, що ZnO проявляв високу активність на початкових стадіях деградації, як парацетамолу, так і диклофенаку. Це може бути пов'язано з наявністю значної кількості поверхневих дефектів, зокрема вакансій кисню, які теоретично здатні знижувати швидкість рекомбінації електронів і дірок, тим самим підвищуючи утворення активних радикалів (Janotti et al., 2007). Хоча у межах проведеного дослідження такі дефекти безпосередньо не визначалися, їхній можливий вплив розглядається як одне з потенційних пояснень отриманих результатів. Проте через відносно більший розмір кристалітів (~26 нм) (Sahai, & Goswami, 2014) активність ZnO зменшувалася при подовженні реакції, оскільки зменшувалася кількість доступних активних центрів після покриття поверхні проміжними продуктами деградації та частковою втратою каталізатора в умовах рН 6, де ZnO є частково розчинним. За рН 8 стабільність каталізатора була дещо вищою, але ефективність у цілому меншою через зниження адсорбційної взаємодії.

Для парацетамолу у присутності ZnO спостерігалася швидка деградація в перші 20-30 хв опромінення, після чого швидкість процесу знижувалася (рис. 1а, 3а), що відповідає літературним даним щодо обмежень ZnO в умовах нейтрального рН. Найвищу активність ZnO спостерігали при рН 7 і концентрації каталізатора 0,5 г/дм³.

У випадку диклофенаку активність ZnO була істотно нижчою (рис. 2а, 4а). Швидкість деградації зменшувалася при рН < 6 через підвищення розчинності ZnO, що призводило до втрати маси каталізатора. Також зниження активності можна пояснити хімічною структурою диклофенаку – бензолне кільце з двома атомами Cl та аміногрупою, яке з'єднане з арильним залишком через атом нітрогену, що значно обмежує адсорбцію на поверхні каталізатора і робить молекулу стійкішою до окиснення.

Під час попередньої адсорбції, що проводилася до опромінення для встановлення рівноваги системи, фіксували адсорбцію парацетамолу на поверхні ZnO на рівні 5–10 %. У випадку диклофенаку ці

значення були нижчими – 3–6 %, що може бути пов'язано також з більш складною структурою молекули (як було це відмічено вище). Після увімкнення УФ-джерела

активність ZnO зростала, і процес переходив у фотокаталітичну стадію з експоненційним зниженням концентрації у часі.

Таблиця 1

Зміна залишкової концентрації парацетамолу та диклофенаку під час фотокаталітичної деградації у присутності ZnO та TiO₂ за різних значень рН і маси катализатора

Катализатор	ZnO								TiO ₂			
рН	6		8		6		8		5	7	5	7
м, г	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,5	1
Речовина	ПЦ				ДФ				ПЦ		ДФ	
t, хв	Залишкова концентрація, мг/дм ³											
0	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
10	5,488	4,660	6,200	5,074	7,806	7,408	8,434	7,788	4,274	3,329	6,703	7,400
20	3,012	2,172	3,844	2,592	6,092	5,488	7,110	6,066	1,827	1,108	4,493	5,480
30	1,654	1,011	2,382	1,333	4,757	4,066	5,987	4,727	0,781	0,369	3,012	4,060
40	0,910	0,470	1,476	0,690	3,712	3,012	5,043	3,685	0,334	0,123	2,019	3,010
50	0,501	0,218	0,916	0,360	2,899	2,231	4,249	2,877	0,143	0,041	1,353	2,230
60	0,276	0,101	0,568	0,189	2,264	1,653	3,586	2,243	0,061	0,014	0,907	1,650

Примітка: ПЦ – парацетамол, ДФ – диклофенак

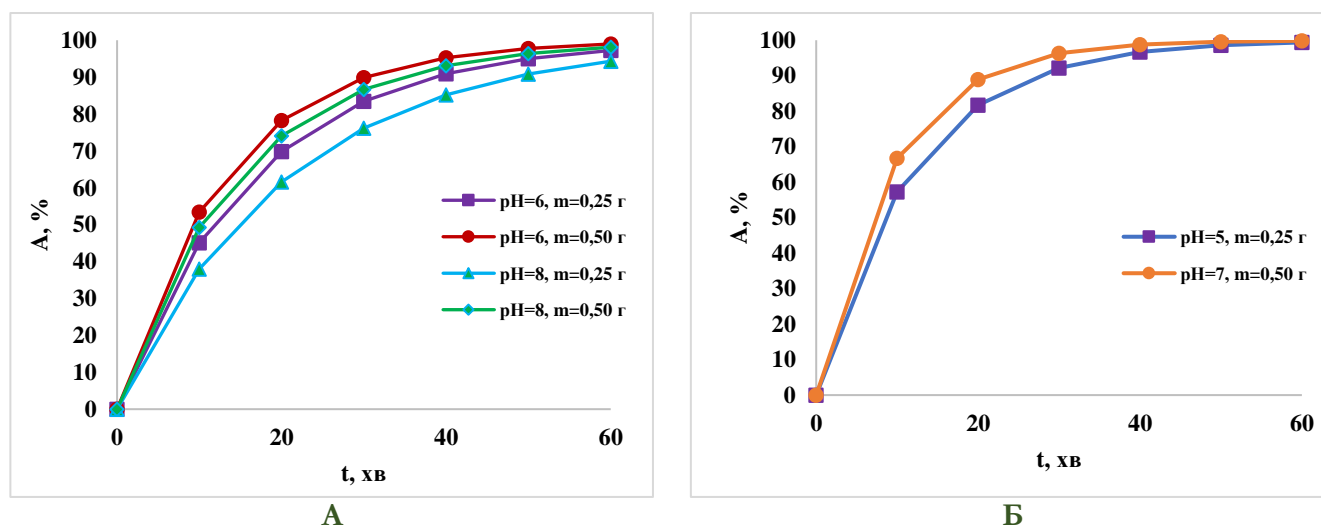


Рис. 1. Ефективність фотокаталітичної деградації парацетамолу при застосуванні катализаторів залежно від часу. А – ZnO; Б – TiO₂

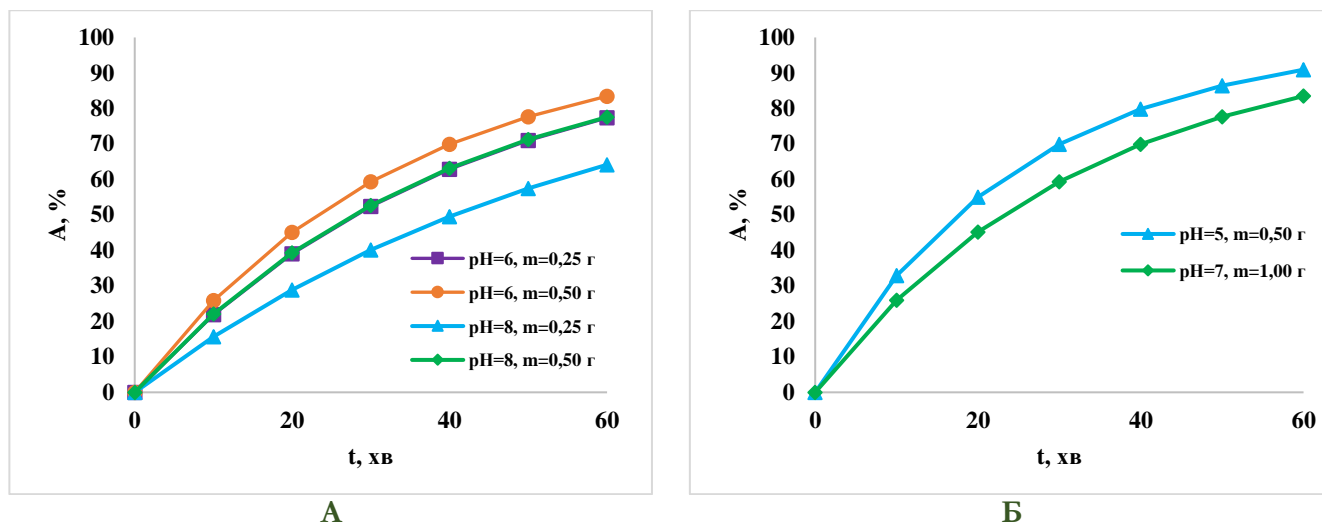


Рис. 2. Ефективність фотокаталітичної деградації диклофенаку при застосуванні катализаторів залежно від часу. А – ZnO; Б – TiO₂

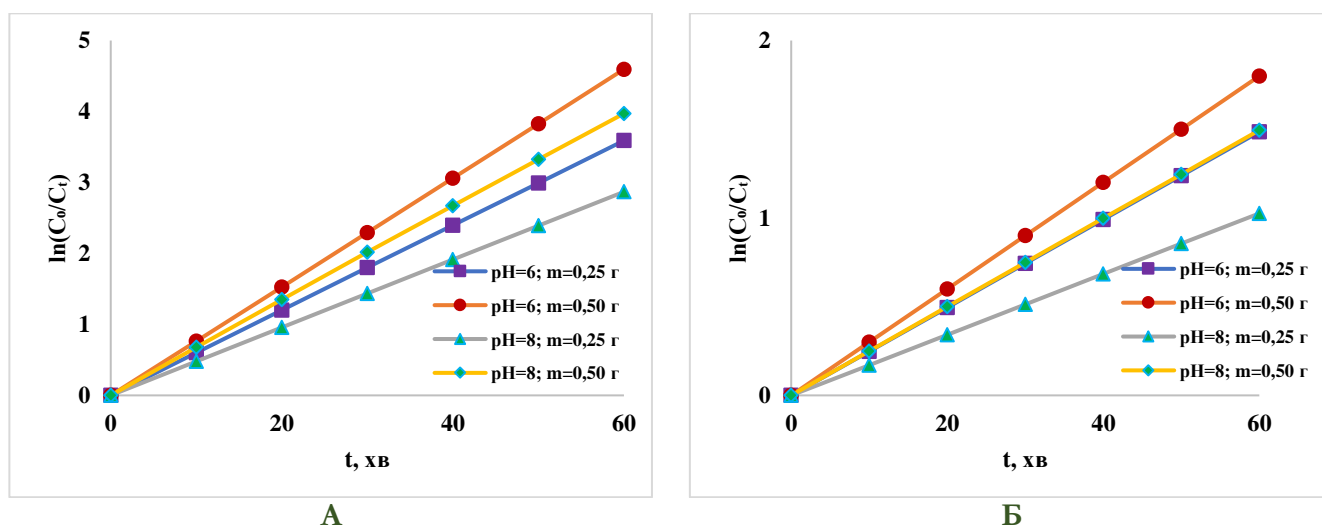


Рис. 3. Кінетична залежність ($\ln(C_0/C_n)$) від часу фотокаталітичної деградації парацетамолу при застосуванні катализаторів залежно від часу. А – ZnO; Б – TiO₂

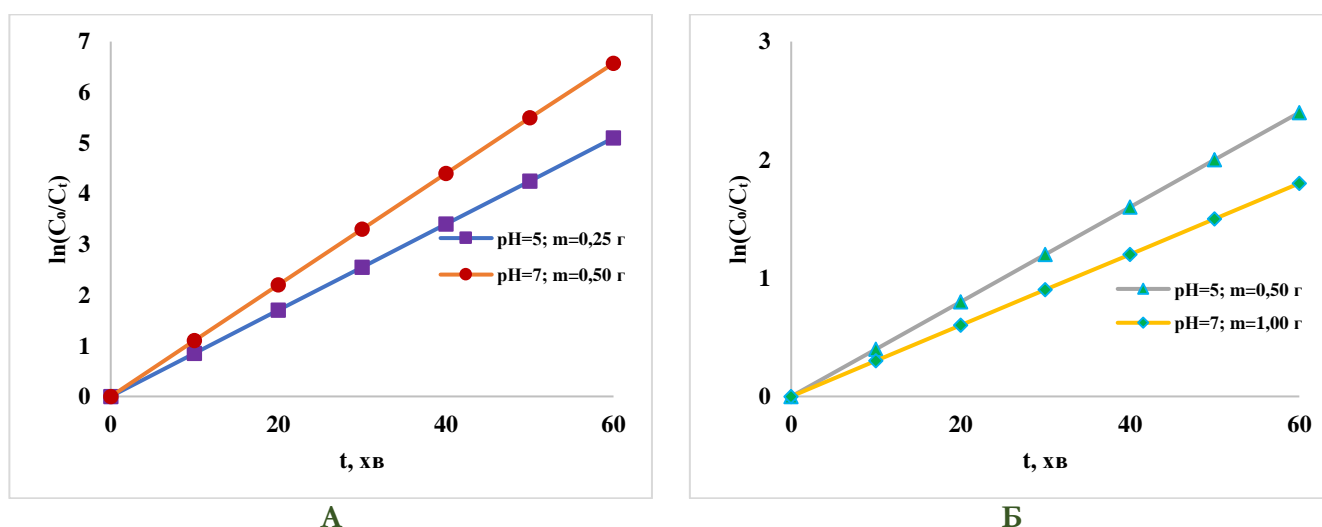


Рис. 4. Кінетична залежність ($\ln(C_0/C_n)$) від часу фотокаталітичної деградації диклофенаку при застосуванні катализаторів залежно від часу. А – ZnO; Б – TiO₂

Деградація парацетамолу на ZnO відбувається значно швидше та має більш крутий спад концентрації у перші 20–30 хв реакції. Диклофенак, навпаки, демонструє плавний та розтягнутий у часі профіль деградації, що є типовим для ароматичних хлорвмісних сполук. При рН 8 процеси деградації обох забрудників помітно сповільнюються порівняно з рН 6, що підтверджує вирішальний вплив кислотності на стабільність та активність ZnO.

Додатковим фактором, який впливає на фотокаталітичну активність ZnO, є часткове розчинення каталізатора при нижчих значеннях рН. Протягом експериментів при рН 6 у системі фіксували невеликі концентрації Zn^{2+} , що зростали зі збільшенням часу опромінення та дозування каталізатора. Такий ефект може сприяти дезактивації частини поверхні ZnO та зменшенню числа активних центрів на пізніх стадіях реакції. При рН 8 подібного явища практично не спостерігалось, що пояснюється більшою стабільністю оксиду цинку у нейтральному середовищі.

Отже, фотокаталітичні властивості оксиду цинку визначаються його енергетичною структурою, розміром кристалітів і поверхневою активністю, яка значною мірою залежить від рН середовища. Проведені дослідження продемонстрували, що ZnO проявляє високу початкову фотокаталітичну активність у деградації парацетамолу та має помірну активність щодо диклофенаку, що пов'язано з обмеженнями поверхневої адсорбції та хімічною стійкістю молекули диклофенаку. Тобто процес фотодеструкції диклофенаку проходить через утворення більш стійких продуктів реакції. Даний факт підтверджують результати зміни спектрів УФ-поглинання фармацевтичних сполук у присутності ZnO зразка. Якщо для ПЦ характерно згладжування спектрів поглинання з часом опромінення, то для ДФ зменшення інтенсивності головного спектру іде з появою нових максимумів спектрів з зсувом в інфрачервону зону.

У всіх експериментах використовували ZnO із середнім розміром кристалітів 26,1 нм, що забезпечувало значну кількість поверхневих дефектів типу кисневих вакансій, які зменшують швидкість

рекомбінації електронів і дірок (Sahai, & Goswami, 2014).

Таким чином, проведений аналіз показав, що оптимальними умовами застосування ZnO для деградації парацетамолу є рН 6 та концентрація каталізатора 0,50 г/дм³, тоді як для диклофенаку найкращі результати були отримані при тих же значеннях рН, але з дещо помірними швидкостями деградації. Це підтверджує, що вибір умов рН та дози ZnO має ключове значення для ефективності фотокаталітичного очищення води від фармацевтичних мікрополітантів.

На наступному етапі досліджень для деградації ПЦ та ДФ було використано TiO₂.

Фотокаталітична активність діоксиду титану значною мірою залежить від фазового складу, морфології та умов проведення реакції, зокрема від значення рН і концентрації каталізатора в суспензії. Використаний у роботі TiO₂ (фаза анатаз, середній розмір кристалітів близько 9,3–9,4 нм) характеризується високою питомою поверхнею та стабільною фотокаталітичною активністю у діапазоні рН від слабких до нейтральних значень (Al Saleh, 2025). Проведені дослідження фотокаталітичної деградації парацетамолу та диклофенаку показали, що саме анатаз TiO₂ забезпечує найвищу швидкість руйнування фармацевтичних забрудників. Ефективність фотокаталітичної деградації парацетамолу при застосуванні TiO₂ залежно від часу опромінення візуально представлена на рисунку 16, тоді як аналогічна ефективність для диклофенаку відображена на рисунку 26.

TiO₂ забезпечував швидку деградацію ПЦ у всіх досліджених умовах. Найвища ефективність – при рН 7 і масі 0,50 г/дм³, де концентрація ПЦ за 60 хв знижувалася майже на два порядки (рис. 16, 36). Після 20–30 хв реакція сповільнювалася через утворення проміжних продуктів окиснення.

ДФ деградував повільніше, ніж ПЦ, однак TiO₂ проявив значно вищу ефективність порівняно із ZnO (рис. 26, 46). Найкращі результати – при рН 5–7 і дозі 1,00 г/дм³, хоча підвищення рН до 7 певною мірою знижувало адсорбцію через утворення аніонної форми ДФ.

Як свідчать результати, TiO₂ є високоефективним фотокаталізатором для

деградації парацетамолу у досліджуваному діапазоні рН та концентрацій. Для парацетамолу встановлені вищі значення констант швидкості порівняно з диклофенаком. Наприклад, за 60 хвилин опромінення концентрація парацетамолу при рН 7 і TiO_2 0,50 г/дм³ зменшувалась майже на два порядки, що підтверджує його високу ефективність. У випадку диклофенаку, структура якого є більш стійкою до окиснення, швидкість degradaції була нижчою, проте TiO_2 також активно руйнує цю хлорвмісну сполуку. Незважаючи на загальну нижчу швидкість degradaції диклофенаку, TiO_2 забезпечує більш глибоку деструкцію, ніж ZnO .

Порівнюючи ефективність ZnO і TiO_2 , можна зробити висновок, що оксид цинку проявляє високу початкову активність, однак швидше втрачає ефективність у слабкокислих умовах. TiO_2 , навпаки, проявляє стабільну активність у широкому діапазоні рН та забезпечує глибшу мінералізацію. Проте ZnO залишається перспективним каталізатором для швидкого руйнування фармацевтичних забрудників у випадках, де потрібна висока інтенсивність окиснення на початкових стадіях процесу.

Поведінка органічної молекули у системі визначається не лише кількістю утворених радикалів, але й поверхневими характеристиками TiO_2 . Для анатазу характерна висока здатність до адсорбції ароматичних та фенольних структур, що є важливим у випадку парацетамолу та особливо диклофенаку. Саме тому в усіх експериментальних серіях перед увімкненням лампи проводили попередню адсорбцію протягом 30 хв для встановлення рівноваги у системі. На цьому етапі спостерігали незначне падіння концентрації забрудника – від 5 до 12 % залежно від рН і концентрації каталізатора.

Після початку опромінення у всіх серіях встановлено чітку експоненційну залежність зниження концентрації у часі, що підтверджує кінетику псевдопершого порядку. Параметри кінетики визначали шляхом побудови залежності $\ln(C_0/C_t)$ від часу опромінення; отримані константи швидкості збігаються з типовими значеннями для суспензійного TiO_2 у подібних умовах.

Кінетичні криві фотокаталітичної degradaції парацетамолу показали швидке падіння концентрації у перші 20–30 хв, після чого реакція сповільнювалась через утворення проміжних продуктів окиснення (рис. 3б). Навпаки, у випадку диклофенаку профіль зниження концентрації був більш плавним і лінійним у напівлогарифмічних координатах (рис. 4б). Розраховані значення C_t підтвердили, що за 60 хв опромінення концентрація парацетамолу при рН 7 і TiO_2 0,50 г/дм³ зменшувалась майже на два порядки, тоді як для диклофенаку при рН 7 і TiO_2 1,00 г/дм³ – лише в шість разів. Такі розбіжності можуть бути пов'язані з відмінностями у структурі молекули їх реакційній здатності в умовах фотокаталізу, хоча детальний механізм потребує подальшого вивчення.

Отримані результати свідчать, що TiO_2 є високоефективним фотокаталізатором для degradaції парацетамолу у широкому діапазоні рН та концентрацій. Диклофенак, хоча й характеризується нижчою швидкістю окиснення, також активно руйнується у присутності TiO_2 завдяки радикальним реакціям, що підтверджує придатність анатазу для очищення стічних вод, забруднених фармацевтичними мікрополутантами різної природи. Крім того, порівняння кінетичних параметрів засвідчує, що оптимізація умов рН та концентрації каталізатора є ключовим чинником підвищення ефективності фотокаталітичних процесів, особливо для стійких хлорвмісних сполук.

Вплив рН середовища та концентрації оксидного фотокаталізатора на кінетику фотокаталітичної degradaції фармацевтичних сполук є одним із ключових чинників оптимізації процесу очищення води. Зміна кислотності розчину визначає заряд поверхні напівпровідникового каталізатора, ступінь іонізації органічних молекул та швидкість формування активних радикальних частинок, тоді як концентрація каталізатора визначає кількість доступних активних центрів і ефективність поглинання УФ-випромінювання. Тому було проаналізовано кінетичні параметри фотокаталітичної degradaції парацетамолу та диклофенаку в присутності TiO_2 та ZnO при різних значеннях рН і концентраціях каталізатора, використовуючи константи

швидкості реакції k , періоди напіврозпаду $t_{1/2}$ та залишкові концентрації $C(t)$. Кінетичний аналіз проводили, виходячи з моделі псевдопершого порядку.

Отримані значення k і $t_{1/2}$ для різних варіантів рН та концентрацій каталізаторів наведено в узагальнюючих таблицях для ZnO (табл.2) та TiO₂ (табл.3), а характер зміни $C(t)$ відтворено на кінетичних кривих.

Парацетамол у системах з TiO₂ деградує значно швидше, ніж диклофенак, тому для парацетамолу встановлено вищі значення констант швидкості порівняно з диклофенаком. У випадку рН 5 та концентрації TiO₂ 0,25 г/дм³ константа швидкості становила 0,0850 хв⁻¹, що відповідає періоду напіврозпаду 8,15 хв. Зростання рН до нейтрального значення 7 та збільшення концентрації каталізатора до 0,50 г/дм³ приводило до інтенсифікації процесу: $k = 0,1095$ хв⁻¹ та $t_{1/2} = 6,33$ хв. Це означає, що за незмінної початкової концентрації зростання кількості доступних активних центрів на поверхні анатазу та оптимізація кислотності сприяють інтенсифікації процесу. Значення рН 7 забезпечувало оптимальний баланс між зарядом поверхні та диспергуванням каталізатора, що сприяло максимально ефективному утворенню гідроксильних радикалів. Крім того, при цих умовах процес демінералізації був інтенсивнішим, про що свідчить більш глибоке зниження концентрації органічного вуглецю.

Для диклофенаку, структура якого містить два атоми хлору й є значно більш стійкою до окиснення, швидкість деградації була нижчою. При рН 5 та концентрації TiO₂ 0,50 г/дм³ константа швидкості становила 0,0400 хв⁻¹, а період напіврозпаду – 17,32 хв. Підвищення рН до 7 та збільшення концентрації TiO₂ до 1,00 г/дм³ призвело до зростання швидкості лише до $k = 0,030$ хв⁻¹, що відповідає $t_{1/2} = 23,08$ хв. Подібна поведінка пояснюється тим, що при рН 7 молекула диклофенаку перебуває переважно у аніонній формі, а поверхня TiO₂ при цьому набуває слабо негативного заряду, що знижує адсорбцію та, відповідно, й загальну швидкість окиснення. Незважаючи на це, повільніша, але стабільна деградація доводить здатність TiO₂ руйнувати навіть хлорвмісні фармацевтичні сполуки.

Для парацетамолу встановлено, що при рН 6 і концентрації ZnO 0,25 г/дм³ константа швидкості становила $k = 0,0598$ хв⁻¹, що відповідає періоду напіврозпаду $t_{1/2} = 11,58$ хв. Підвищення дози каталізатора до 0,50 г/дм³ призводило до збільшення швидкості реакції до $k = 0,0766$ хв⁻¹ та зменшення $t_{1/2}$ до 9,05 хв. При підвищенні рН до 8 швидкість деградації зменшувалась: для 0,25 г/дм³ $k = 0,0478$ хв⁻¹ ($t_{1/2} = 14,50$ хв), а для 0,50 г/дм³ – $k = 0,0662$ хв⁻¹ ($t_{1/2} = 10,47$ хв). Такі результати вказують на те, що парацетамол швидше руйнується у слабкокислих умовах, де поверхня ZnO має більш позитивний заряд і ефективніше адсорбує нейтральну форму молекули парацетамолу. Отже, для ZnO слабкокислі умови є більш сприятливими для деградації парацетамолу, тоді як при рН 8 зменшується електро-статичне притягання між молекулою та поверхнею каталізатора і частково знижується ефективність формування адсорбційного комплексу.

Для диклофенаку значення констант швидкості були значно нижчими. При рН 6 і концентрації 0,25 г/дм³ k становило лише 0,0248 хв⁻¹ ($t_{1/2} = 27,99$ хв), а при 0,50 г/дм³ – 0,0300 хв⁻¹ ($t_{1/2} = 23,10$ хв). Збільшення рН до 8 ще більше знижувало активність ZnO щодо диклофенаку, оскільки молекула в цих умовах перебуває переважно в аніонній формі, тоді як поверхня ZnO також набуває негативного заряду. Для 0,25 г/дм³ k зменшувалось до 0,0171 хв⁻¹ ($t_{1/2} = 40,54$ хв), а для 0,50 г/дм³ – до 0,0249 хв⁻¹ ($t_{1/2} = 27,82$ хв). Це свідчить про суттєве електростатичне відштовхування, яке обмежує адсорбцію і, відповідно, загальну швидкість окиснення. Таким чином, ZnO виявляється істотно менш ефективним для деградації диклофенаку, ніж для парацетамолу, навіть у оптимальних умовах рН 6 і підвищених концентраціях каталізатора.

Порівнюючи результати для TiO₂ та ZnO, можна зробити низку узагальнюючих висновків. По-перше, для парацетамолу обидва каталізатори забезпечують істотне зниження концентрації забрудника, але TiO₂ демонструє більш високі значення k та менші $t_{1/2}$, особливо при рН 7 та концентрації 0,50 г/дм³. ZnO є ефективним у слабкокислих умовах, однак поступається TiO₂ за глибиною деградації при однакових або близьких концентраціях каталізатора.

Таблиця 2

Константа швидкості псевдопершого порядку (k) та період напіврозпаду ($t_{1/2}$) під час фотокаталітичної деградації парацетамолу та диклофенаку у присутності ZnO за різних значень рН і маси каталізатора

рН	6		8		6		8	
m, г	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5
Речовина	ПЦ	ПЦ	ПЦ	ПЦ	ДФ	ДФ	ДФ	ДФ
k	0,0598	0,0766	0,0478	0,0662	0,0248	0,0300	0,0171	0,0249
$t_{1/2}$, хв	11,58	9,05	14,50	10,47	27,99	23,10	40,54	27,82

Примітка: ПЦ – парацетамол, ДФ – диклофенак

Таблиця 3

Константа швидкості псевдопершого порядку (k) та період напіврозпаду ($t_{1/2}$) під час фотокаталітичної деградації парацетамолу та диклофенаку у присутності TiO₂ за різних значень рН і маси каталізатора

рН	5	7	5	7
m, г	0,25	0,5	0,5	1,0
Речовина	ПЦ	ПЦ	ДФ	ДФ
k	0,0850	0,1095	0,0400	0,0300
$t_{1/2}$, хв	8,15	6,33	17,32	23,08

Примітка: ПЦ – парацетамол, ДФ - диклофенак

По-друге, для диклофенаку різниця між каталізаторами ще більш виражена: навіть за підвищеної концентрації TiO₂ (1,00 г/дм³) та оптимізованих умов рН процес деградації залишається повільнішим, ніж для парацетамолу, але все ж значно інтенсивнішим, ніж у системах із ZnO. У випадку ZnO невисокі значення k та великі $t_{1/2}$ у поєднанні зі зростаючою тривалістю реакції свідчать, що цей каталізатор є менш придатним для очищення води від хлорвмісних фармацевтичних сполук у дослідженому діапазоні рН.

По-третє, вплив концентрації каталізатора має виражений екстремальний характер. Збільшення дози TiO₂ та ZnO з 0,25

до 0,50 г/дм³ у більшості випадків супроводжується зростанням k і скороченням $t_{1/2}$, однак подальше зростання (до 1,00 г/дм³ для TiO₂) не завжди дає пропорційне підвищення швидкості реакції. Це пов'язано з ефектом екранування УФ-випромінювання та збільшенням розсіювання світла в перенасичених суспензіях.

Нарешті, рН середовища по-різному впливає на каталізатори. Для TiO₂ оптимальним виявився інтервал від слабкокислого до нейтрального рН (5–7) для парацетамолу і ближчий до слабкокислого рН для диклофенаку, тоді як для ZnO найбільш прийнятним є рН 6. За рН 8 ефективність ZnO знижується як для парацетамолу, так і для

диклофенаку, що пояснюється зміною заряду поверхні та зменшенням адсорбції органічних молекул.

Таким чином, аналіз впливу рН та концентрації каталізатора на кінетичні параметри фотокаталітичної деградації модельних фармацевтичних забрудників показав, що оптимізація цих параметрів є критичною для досягнення високої ефективності процесу. TiO_2 проявляє стабільно високу активність і є більш універсальним каталізатором для очищення води від фармацевтичних мікрополітантів, тоді як ZnO доцільно застосовувати в умовах, де потрібне швидке початкове окиснення у слабокислому середовищі, але немає жорстких вимог до повної мінералізації стійких хлорвмісних сполук.

Отримані результати свідчать про суттєві відмінності у механізмах фотокаталітичної деструкції парацетамолу та диклофенаку за однакових умов. Незважаючи на загальну тенденцію до швидшого розкладу парацетамолу, сповільнення процесу з часом для обох фармацевтичних сполук може бути пов'язане з утворенням проміжних продуктів окиснення, що здатні адсорбуватися на активних центрах фотокаталізатора та частково блокувати їх. Для диклофенаку, з огляду на його більш складну хімічну структуру, ймовірно формування ще більш різноманітних і стійких проміжних продуктів, що додатково впливає на кінетику процесу. Тому подальші дослідження доцільно спрямувати на ідентифікацію цих проміжних сполук методом хроматомас-спектрометрії, що дозволить встановити не лише їх природу, але й уточнити вплив окремих продуктів на механізм фотокаталітичної деградації, що поглибить розуміння шляхів трансформації органічних забруднювачів та забезпечить розробку більш ефективних умов фотокаталітичного очищення води.

Висновки

Встановлено, що ПЦ розкладається значно швидше за ДФ незалежно від типу фотокаталізатора (ZnO чи TiO_2). Це підтверджується тим, що для ПЦ встановлено вищі значення констант

швидкості (k) та менші періоди напіврозпаду ($t_{1/2}$) у всіх експериментальних умовах порівняно з ДФ.

TiO_2 є ефективнішим фотокаталізатором, ніж ZnO , оскільки він демонструє більш високі значення k та менші $t_{1/2}$, особливо при деградації парацетамолу. Максимальна ефективність для ПЦ досягнута з TiO_2 при рН 7 та концентрації $0,50 \text{ г/дм}^3$, де константа швидкості k становила $0,1095 \text{ хв}^{-1}$, а період напіврозпаду $t_{1/2}$ – $6,33 \text{ хв}$. Найбільш ефективні умови для ДФ встановлено для TiO_2 при рН 5 та дозі $0,50 \text{ г/дм}^3$, де k становила $0,0400 \text{ хв}^{-1}$. Найкраща активність для ZnO для ПЦ була при рН 6 та концентрації $0,50 \text{ г/дм}^3$ ($k=0,0766 \text{ хв}^{-1}$).

Кисле середовище (рН 5–6) сприяє підвищенню фотокаталітичної активності. Зниження рН підсилює деградацію більшою мірою для TiO_2 , ніж для ZnO . Для ZnO оптимальним є слабокислое середовище (рН 6), оскільки при рН 8 швидкість деградації ПЦ та ДФ помітно знижується. Для TiO_2 оптимальним виявився інтервал від слабокислого до нейтрального рН (5–7). Підвищення рН до 7 призвело до зниження швидкості деградації ДФ, оскільки молекула ДФ в цих умовах набуває аніонної форми, що викликає електростатичне відштовхування від негативно зарядженої поверхні TiO_2 .

Збільшення дози каталізатора підвищує ефективність процесу, зокрема помітно прискорює початкову стадію деструкції органічних сполук.

Збільшення дози каталізатора (зокрема, від $0,25$ до $0,50 \text{ г/дм}^3$) у більшості випадків супроводжується зростанням константи швидкості (k) і скороченням періоду напіврозпаду ($t_{1/2}$). Однак подальше збільшення (наприклад, до $1,00 \text{ г/дм}^3$ для TiO_2 у випадку ДФ) не завжди забезпечує пропорційне підвищення швидкості реакції через ефект екранування UV-випромінювання та розсіювання світла.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологій очищення стічних вод, що містять забруднювачі фармацевтичного походження, шляхом вибору відповідного каталізатора та регулювання рН середовища.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

- Hofman, R., & Teo, C. J. (2021). Emerging micropollutants in municipal wastewater: occurrence and treatment options. In *Integrated and Hybrid Process Technology for Water and Wastewater Treatment* (pp. 487-516). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823031-2.00026-4>
- Lee, W. J., Goh, P. S., Lau, W. J., & Ismail, A. F. (2020). Removal of pharmaceutical contaminants from aqueous medium: a state-of-the-art review based on paracetamol. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(9), 7109-7135. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04446-1>
- Li, Z., Wang, J., Chang, J., Fu, B. and Wang, H. (2023). Insight into advanced oxidation processes for the degradation of fluoroquinolone antibiotics: removal, mechanism, and influencing factors. *Science of The Total Environment*, 857, 159172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159172>
- Sampaio, M. J., Ribeiro, A. R., Ribeiro, C. M., Borges, R. A., Pedrosa, M. F., Silva, A. M., Silva, C. G., & Faria, J. L. (2023). A technological approach using a metal-free immobilized photocatalyst for the removal of pharmaceutical substances from urban wastewaters. *Chemical Engineering Journal*, 459, 141617. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141617>
- Baibara, O. E., Radchenko, M. V., Karpyna, V. A., & Ievtushenko, A. I. (2021). A review of the some aspects for the development of ZnO based photocatalysts for a variety of applications. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(3), 585-594. <https://doi.org/10.15330/pcss.22.3.585-594>
- Bica, B. O., & de Melo, J. V. S. (2020). Concrete blocks nano-modified with zinc oxide (ZnO) for photocatalytic paving: Performance comparison with titanium dioxide (TiO₂). *Construction and Building Materials*, 252, 119120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119120>

Tanos, F., Razzouk, A., Lesage, G., Cretin, M., & Bechelany, M. (2024). A comprehensive review on modification of titanium dioxide-based catalysts in advanced oxidation processes for water treatment. *ChemSusChem*, 17(6), e202301139. <https://doi.org/10.1002/cssc.202301139>

Sahai, A., & Goswami, N. (2014). Probing the dominance of interstitial oxygen defects in ZnO nanoparticles through structural and optical characterizations. *Ceramics International*, 40(9), 14569-14578. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.041>

Al Saleh, A. M. (2025). A Review of the Synthesis, Structural, and Optical Properties of TiO₂ Nanoparticles: Current State of the Art and Potential Applications. *Crystals*, 15(11), 944. <https://doi.org/10.3390/cryst15110944>.

Janotti, A., & Van de Walle, C. G. (2007). Native point defects in ZnO. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 76(16), 165202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.165202>

Received: 11.12.2025. **Accepted:** 28.01.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Кізиун О., Зажигалов В., Умнов І., Трус І. Вплив умов проведення фотокаталітичної деградації парацетамолу та диклофенаку із застосуванням TiO₂ і ZnO. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 197-209. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.17>

Cite this article in APA style as:

Kiziun, O., Zazhigalov, V., Ymnov, I., & Trus, I. (2026). Vplyv umov provedennia fotokatalitychnoi dehradatsii parasetamolu ta dyklofenaku iz zastosuvanniam TiO₂ i ZnO. [The influence of photocatalytic degradation conditions of paracetamol and diclofenac using TiO₂ and ZnO]. *Biota. Human. Technology*, (1), 197-209. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.17> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Kiziun O. [in Ukrainian: **Кізиун О.**] ¹, PhD of Chemistry, senior researcher, email: lenakiz25@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2339-217X
Institute for Sorption and Problems of Endoecology, National Academy of Sciences of Ukraine
13 Oleg Mudrak Str., Kyiv, 03164, Ukraine

Zazhigalov V. [in Ukrainian: **Зажигалов В.**] ², DSc of Chemistry, Professor, Corresponding member NAS of Ukraine, email: vazazh@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2169-3443
Institute for Sorption and Problems of Endoecology, National Academy of Sciences of Ukraine
13 Oleg Mudrak Str., Kyiv, 03164, Ukraine

Ymnov I. [in Ukrainian: **Умнов І.**] ³, student, email: umnovigor4@gmail.com
ORCID: 0009-0008-6525-4163
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37 Prospect Beresteyskiy, Kyiv, 03056, Ukraine

Trus I. [in Ukrainian: **Трус І.**] ⁴, DSc, Associate Professor, email: inna.trus.m@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6368-6933
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37 Prospect Beresteyskiy, Kyiv, 03056, Ukraine

¹ Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

² Study design, statistical analysis, manuscript preparation.

³ Study design, data collection.

⁴ Statistical analysis, manuscript preparation.

UDC 547.544

DOI: 10.58407/bht.1.26.18



Copyright (c) 2026 Yaroslav Poplavskyi, Viktor Yanchenko

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Ярослав Поплавський, Віктор Янченко**СУЧАСНІ СТРАТЕГІЇ СИНТЕЗУ ЗАМІЩЕНИХ ВІНІЛСУЛЬФОНІВ**

Yaroslav Poplavskyi, Viktor Yanchenko

MODERN SYNTHETIC STRATEGIES FOR SUBSTITUTED VINYL SULFONES**АНОТАЦІЯ**

Мета роботи. Метою роботи є систематизація та узагальнення сучасних наукових відомостей щодо методів синтезу заміщених вінілсульфонів, що дозволить не лише визначити найбільш ефективні стратегії їх отримання, а й спрогнозувати напрямки подальшого використання цих сполук у сучасному органічному та медичному синтезі.

Методологія. Проведено комплексний аналіз публікацій у рецензованих наукових виданнях за останні два десятиліття. Використано методи порівняльного аналізу, узагальнення та критичної оцінки результатів досліджень у галузі сучасного органічного синтезу. Особлива увага приділялася роботам, де експериментально обґрунтовано переваги новітніх методів синтезу заміщених вінілсульфонів порівняно з класичними.

Наукова новизна. У роботі вперше систематизовано та критично проаналізовано масив даних останніх років щодо еволюції синтетичних стратегій створення функціоналізованих вінілсульфонів та встановлено визначальну роль природи реакційного середовища у регулюванні хемоселективності процесів, що дозволило сформулювати концептуальну карту сучасних підходів щодо синтезу вінілсульфонового фрагмента з високим рівнем регіо- та стереоконтролю.

Висновки. Сучасний стан розвитку методів синтезу вінілсульфонів вказує на тенденцію до впровадження металокаталітичних, електрохімічних та фотохімічних методів синтезу, а також використання м'яких окиснювальних систем, що забезпечують високу регіо- та стереоселективність процесу. Аналіз літературних джерел підтверджує, що універсальними вихідними речовинами для введення вінільного фрагмента в систему є алкени, алкіни та коричні кислоти, тоді як джерелами сульфонільної групи найчастіше виступають сульфінати, сульфонілхлориди та сульфонілгідрозиди.

Підходи до синтезу β -аміновінілсульфонів фокусуються на високій хемоселективності та використанні м'яких умов, де ключову роль відіграє контроль над активацією зв'язків C-H і C-N. Напрямок реакції критично залежить від природи середовища: використання диметилсульфоксиду та фотокаталізу сприяє утворенню енамінісульфонів, тоді як водне середовище сприяє формуванню сульфамідів.

Ключові слова: сульфони, вінілсульфони, органічний синтез, заміщені вінілсульфони, енаміносульфони, аміновінілсульфони

ABSTRACT

Purpose of the work. The study aims to systematize and generalize current scientific data regarding synthetic approaches to the formation of substituted vinyl sulfones. This allows to specify the most effective strategies and predicting future directions for utilizing these compounds in modern organic and medicinal synthesis.

Methodology. A comprehensive analysis of publications in peer-reviewed scientific journals over the past two decades was conducted. Methods of comparative analysis, generalization, and critical evaluation of research results in the field of modern organic synthesis were employed. Particular attention was paid to studies that experimentally proves the advantages of novel synthetic methods compared to classics.

Scientific novelty. The work systematizes and critically analyzes the mass of data of recent years on the evolution of synthetic strategies for the creation of functionalized vinyl sulfones for the first time, which allowed us to present a conceptual map of modern approaches to the design of a vinyl sulfone fragment with a high level of regio- and stereocontrol in a single overview format.

Conclusions. The current state of development of methods for the synthesis of vinyl sulfones indicates a steady trend towards the introduction of metalocatalytic, electro- and photochemical methods, as well as the use of mild oxidation systems that provide high regio- and stereoselectivity of the process. Analysis of literary sources shows that

the starting materials for introducing a vinyl fragment into the system are usually alkenes, alkynes and cinnamic acids, while the sources of the sulfonyl group most often are sulfinates, sulfonyl chlorides and sulfonyl hydrazides.

Modern approaches to the synthesis of β -aminovinyl sulfones focus on high chemoselectivity and the use of mild conditions, where control over the activation of C-H and C-N bonds plays a key role. It has been established that the direction of the reaction critically depends on the nature of the environment: the use of dimethyl sulfoxide and photocatalysis leads to formation of enamine sulfones, while aqueous conditions usually initiates the formation of sulfamides.

Key words: sulfones, vinyl sulfones, synthesis, substituted vinyl sulfones, enamino-sulfones, aminovinyl sulfones

Вступ

Низку органічних сполук, що містять сульфур у ступені окиснення +6, розглядають як похідні сульфатної кислоти. Заміщення атомів водню в її структурі на алкільні або арилні радикали призводить до утворення естерів – органічних сульфатів. Залежно від кількості заміщених груп розрізняють кислі моноалкіл(арил)-сульфати та нейтральні діалкіл(арил)сульфати. А от заміна гідроксильної групи дозволяє отримувати сульфоокислоти і далі їх похідні – сульфаміди. Серед них знайдено великий масив дієвих препаратів з антимікробною, діуретичною, антидіабетичною, протизапальною (наприклад, теноксикам), противірусною (тиранавір та симепревір) та іншими видами активності (наприклад варденафіл використовується для лікування ерекційної дисфункції) (Scott & Njardarson, 2018).

Натомість заміна двох гідроксильних груп на алкільні або арилні залишки призводить до утворення сульфонів, які широко використовуються як розчинники (DMSO), компоненти полімерів та лікарські засоби, які застосовуються для лікування прокази, герпетичного дерматиту, туберкульозу (дапсон), псоріазу (апреміласт), синдрому сухого ока (ліфітеграт) та інших захворювань (Scott & Njardarson, 2018; Acton, 2013) (рис. 1). Також вони демонструють свою універсальність та ефективність в асиметричному органічному каталізі (Alba et al., 2010).

Останнім часом все більше уваги дослідників приділяється вінілсульфонам, які зарекомендували себе як потужні

необоротні інгібітори цистеїнових протеаз (Rawat et al., 2021). Цей механізм «молекулярного вимикача» лежить в основі розробки новітніх терапевтичних агентів для лікування онкологічних захворювань, вірусних інфекцій та паразитарних інвазій, зокрема хвороби Шагаса (Morales-Sanfrutos et al., 2010).

Завдяки вираженому електроноакцепторному ефекту сульфонільної групи, вінілсульфони проявляють властивості сильних електрофілів. Значне зниження електронної густини на подвійному зв'язку обумовлює їх високу реакційну здатність у процесах нуклеофільного приєднання за Міхаелем (Strasser et al., 2017) та реакціях гетероциклізації (Zhai, 2006). Активні вінілсульфонові барвники цінуються за їхню високу фіксуєчу здатність, яка обумовлена високою електрофільністю вінільної групи. Це дозволяє барвнику ковалентно закріплюватись на субстраті (бавовні, тощо), взаємодіючи з гідроксильними групами залишків глюкози з утворенням єдиної хімічної структури з волокном (Venkataraman, 2012).

Незважаючи на значну кількість досліджень, на сьогодні відсутні узагальнюючі огляди, що комплексно висвітлюють методи синтезу заміщених вінілсульфонів у теперішній час. Систематизація таких даних відкриває нові можливості як для оптимізації відомих, так і розробки нових методів синтезу, а також здійснення спрямованого синтезу сполук із заданими фізико-хімічними властивостями, що є критично важливим для розвитку сучасної органічної та медичної хімії.

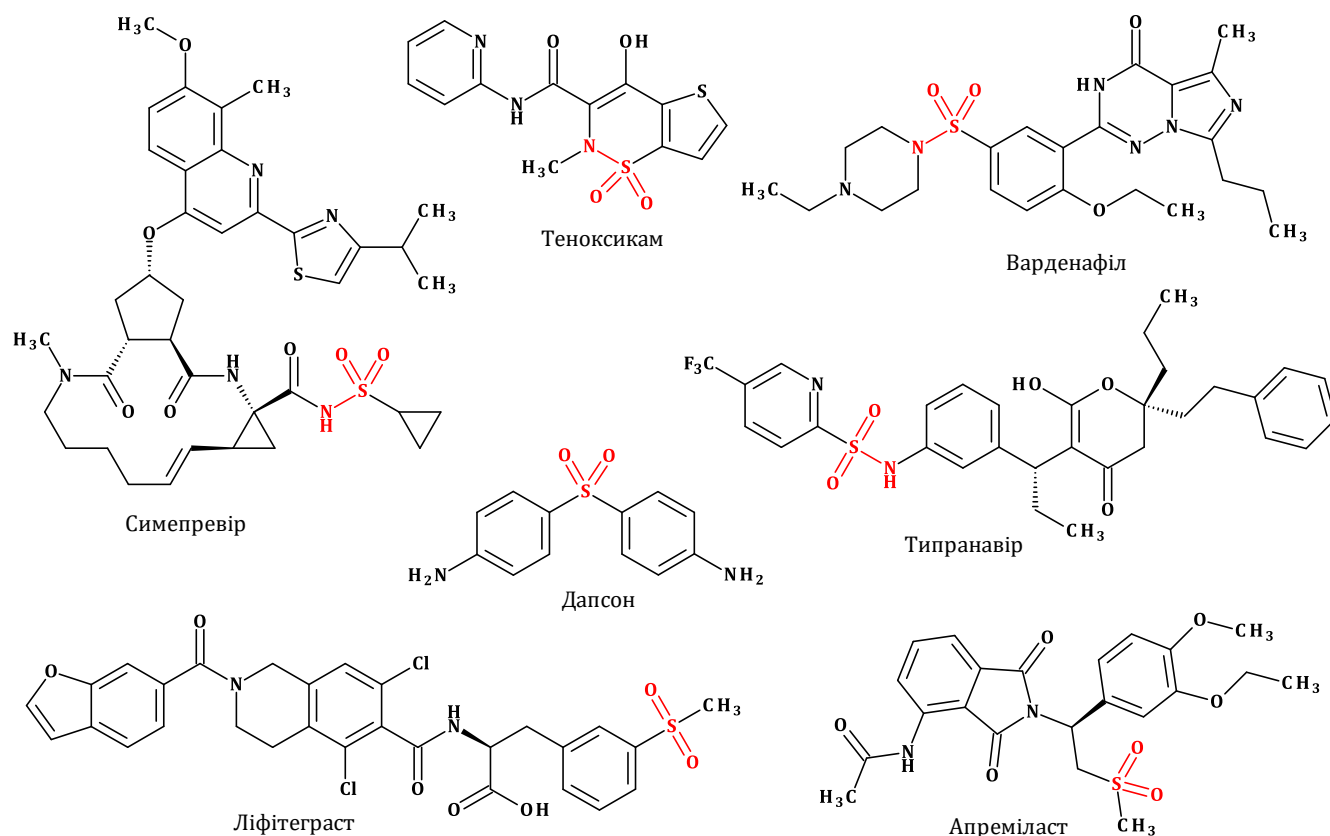


Рис. 1. Структури деяких лікарських препаратів, які містять сульфамідну та сульфонову групу

Матеріали та методи дослідження

Для підготовки огляду було проведено систематичний пошук літературних джерел у релевантних міжнародних наукометричних базах даних, зокрема PubMed, Scopus та Web of Science. Глибина пошуку охоплювала період з 2000 по 2025 роки. Стратегія пошуку базувалася на використанні логічних операторів (AND, OR) для комбінування ключових слів, що дозволило забезпечити максимальну повноту та релевантність відібраного матеріалу.

Пошукові запити формувалися за допомогою булевих операторів з використанням таких термінів, як "vinyl sulfone", "synthesis", "substituted vinyl sulfones", "enamino sulfones", "aminovinyl sulfones" та їхніх похідних. Відбір джерел здійснювався за критеріями наукової значущості та відповідності тематиці синтезу заміщених вінілсульфонів.

До огляду включалися оригінальні експериментальні дослідження та аналітичні огляди, що містили кількісні та якісні

дані щодо методологій синтезу заміщених вінілсульфонів. Критерієм відбору була наявність повного тексту публікації, викладеного англійською або українською мовами. З процесу аналізу виключалися праці, що мали суто описовий характер, не містили детальних описів синтетичних процедур сульфонів або стосувалися іншої структури, не релевантних темі дослідження.

В огляді було проаналізовано дослідження, присвячені розробці високоєфективних стратегій синтезу функціоналізованих вінілсульфонів переважно на основі алкенів, алкінів, коричних кислот та аленів із використанням металокомплексних, електрохімічних та фотокаталітичних методів активації.

Результати дослідження та обговорення

Традиційні методи, зокрема окиснення сульфідів (Voutyritsa et al., 2017; Cheng et al., 2019), мають суттєві обмеження для синтезу вінілсульфонів через низьку хемоселективність. Використання жорстких окисників

часто призводить до небажаних побічних процесів: епоксидування або окисного розщеплення подвійного зв'язку.

Сучасні підходи до синтезу вінілсульфонів еволюціонують у напрямку розробки екологічно безпечних та високоефективних методик. Використання електрохімічних (Wang et al., 2020) та фотохімічних (Jiang et al., 2024) методів, а також м'яких окисників (Das et al., 2011; Wang et al., 2017) дозволяє уникнути жорстких умов та мінімізувати використання токсичних реагентів. Новітні підходи забезпечують високу регіо- та (*E*)-стереоселективність (Taniguchi, 2011).

Аналіз літературних джерел вказує на широке застосування алкенів для введення вінільного фрагмента в структуру вінілсульфонів. Натомість сульфонову групу вводять у структуру за допомогою сульфінатів, сульфонілхлоридів, *p*-толуенсульфонілметилізоціаніду (TosMIC) тощо (рис. 2).

Описано ефективний метод синтезу вінілсульфонів (Nair et al., 2002) шляхом реакції арилсульфінатів з алкенами за присутності церій(IV) амонійнітрату (CAN). Запропонований підхід забезпечує пряме утворення вінілсульфонів, оминаючи стадію проміжного β -йодосульфону, що робить його зручною альтернативою методам Хорнера–Еммонса та Петерсона. Запропонована методика вирізняється м'якими умовами, високими виходами та універсальністю щодо широкого спектру субстратів, включаючи стироли, *n*-алкени та циклічні алкени.

Стереоселективний синтез (*E*)-алкенілсульфонів з алкенів було здійснено шляхом купрум-каталітичного окиснення натрій сульфінатів за присутності кисню повітря (Taniguchi, 2011). Процес базується на генеруванні сульфонільних радикалів або катіонів за дією купрум(II) з наступним *анти*-приєднанням та елімінуванням. Встановлено, що реакція алкенів веде до утворення (*E*)-алкенілсульфонів, тоді як алкіни в присутності калій галогенідів трансформуються у (*E*)- β -галоалкенілсульфони. Оптимальні умови синтезу включають використання каталітичної системи CuI-*bpy* (2,2'-біпіридину) за присутності KI в суміші розчинників оцтової кислоти (AcOH) *in* DMSO за температури

100 °C. Даний метод є високоефективним, забезпечуючи вихід для термінальних алкенів на рівні 94 %.

Вінілсульфони також було синтезовано (Das et al., 2011) шляхом взаємодії алкенів з натрію аренасульфінатами за дії KI і NaIO₄ та каталітичної кількості оцтової кислоти в середовищі ацетонітрилу (MeCN). Процес протікає при кімнатній температурі, забезпечуючи високі виходи цільових продуктів (87–95 %).

Пряме C–H метилсульфонілювання алкенів здійснено за дії натрій метабісульфіту та *ди-трет*-бутилпероксиду (DTBP) (He et al., 2019). Встановлено, що за оптимізованих умов (FeCl₃, хінолін, відповідний температурний режим та розчинник) вихід цільових продуктів сягає 80 %. Процес базується на взаємодії метильних радикалів із SO₂ з утворенням метилсульфонільних радикалів, які згодом атакують подвійний зв'язок алкену. Запропонований механізм включає стадії одноелектронного переносу SET (Single Electron Transfer) та депротонування.

Також розроблено електрохімічний метод сульфонілювання алкенів з використанням натрій арилсульфінатів як сульфонілюючих агентів. Реакція протікає за присутності каталітичної кількості KI як редокс-медіатора та Bu₄NBF₄ як електроліту (Wang et al., 2020), забезпечуючи високі виходи вінілсульфонів. В іншому дослідженні (Fang et al., 2024) описано синтез вінілсульфонів у нерозділеній комірці з графітовими електродами за дії постійного струму при кімнатній температурі. Ключовою перевагою даного методу є відсутність потреби у токсичних окисниках та каталізаторах на основі перехідних металів. Експериментально було встановлено, що використання суміші розчинників MeCN /H₂O, Na₂CO₃ як основи та NaI як електроліту дозволяє суттєво підвищити виходи продуктів (до 74 %). Електрохімічне сульфонілювання органоборонних кислот із використанням натрій арилсульфінатів забезпечує одержання широкого ряду алкенілсульфонів із високими виходами вже при кімнатній температурі (Yao et al., 2023). Ключовою перевагою даного протоколу є відсутність потреби у каталізаторах, що спрощує процедуру виділення продуктів.

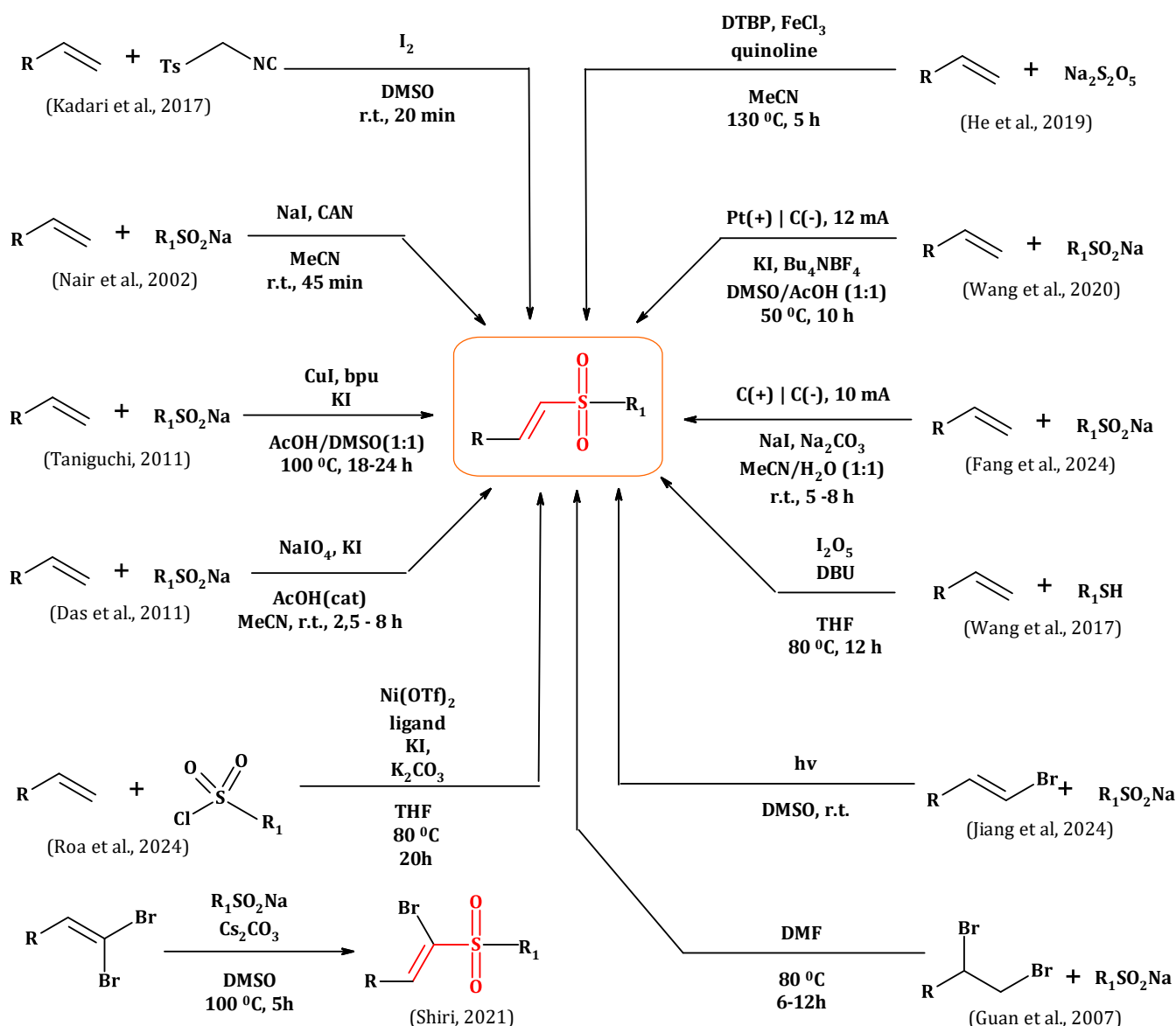


Рис. 2. Схема синтезу вінілсульфонів на основі заміщених алкенів та віцінальних алкілдігалогенідів

Нещодавно (Rao et al., 2024) розроблено метод прямого нікель-каталітичного сульфоніювання алкенів сульфонілхлоридами з використанням 1,10-фенантролін-5,6-діону як ліганда. Запропонований підхід забезпечує ефективну трансформацію неактивованих алкенів та стиренів, зокрема 1,1- та 1,2-дизаміщених. Він дозволяє отримувати широкий спектр вінілсульфонів із високими виходами та демонструє відмінну сумісність із різноманітними функціональними групами.

Як показали Kadari et al. (2017), використання TosMIC як сульфонілюючого реагенту за каталізу молекулярним йодом дозволяє також синтезувати вінілсульфони. Метод дає змогу здійснювати функціона-

лізацію олефінів, алкінів, коричних та пропінових кислот з утворенням вініл-, аліл- та β-йодовінілсульфонів із високими виходами.

Наразі описано (Jiang et al., 2024) також ефективний фотохімічний метод синтезу вінілсульфонів шляхом радикально-радикального крос-сполучення вінілбромідів з натрій арилсульфінатами. Процес базується на опроміненні реакційної суміші фіолетовими світлодіодами (purple LEDs) у середовищі DMSO, що забезпечує високу *E*-селективність без використання металів, фотокаталізаторів, основ або окисників. Використання I₂O₅ у реакціях окиснювального сполучення ароматичних алкенів із тіолами дозволяє отримувати (*E*)-вінілсульфони з високою

регіоселективністю (Wang et al., 2017). Оптимізація умов (80 °C, розчинник THF, основа 1,8-дізабіцикло[5.4.0]ундец-7-ен (DBU) та 1,2 екв. I₂O₅) забезпечує високу регіо- та стереоселективність із помірними та високими виходами продуктів реакції. Завдяки високій сумісності з різними типами субстратів – від ароматичних алкенів із будь-якими замісниками до гетероциклів та аліфатичних тіолів – цей метод є універсальним підходом до синтезу функціоналізованих сульфонів.

Синтез (*Z*)-1-бромо-1-сульфонілалкенів можливий через сульфонілювання 1,1-дибромо-1-алкенів натрій сульфінатами у присутності Cs₂CO₃ (Shiri et al., 2021). Встановлено, що проведення реакції в DMSO при 100 °C з використанням 1 екв. Cs₂CO₃ та 1.2 екв. натрій сульфінату забезпечує отримання цільових продуктів із виходами 65–91 %.

Крім алкенів для синтезу вінілсульфонів можна використати віцинальні дигалогеніди. Виявлено, що пряма конденсація алкіл-дигалогенідів із сульфінатами натрію є ефективним методом генерації вінілсульфонів. Відсутність сторонніх каталізаторів у даній системі не перешкоджає досягненню високих виходів як для метильних, так і для фенільних похідних (Guan et al., 2007).

Описано (Cacchi et al., 2004) каталізоване паладієм крос-сполучення сульфінатів з арил- та вінілгалогенідами (або трифлатами) для отримання несиметричних сульфонів. Встановлено, що застосування системи трис(добензиліденацетон)дипаладій(0) (Pd₂(dba)₃)/4,5-біс(дифенілфосфіно)-9,9-диметилксантен (Xantphos) у поєднанні з nBu₄NCl забезпечує високу ефективність процесу, а варіювання умов реакції (температури та наявності фазового переносника) дозволяє адаптувати метод до субстратів із різною електронною густиною, гарантуючи стабільно високі виходи.

В якості алкену в синтезі вінілсульфонів іноді застосовують заміщені коричні кислоти (рис. 3). Досліджено реакційну здатність коричних кислот у процесах декарбоксілюючого крос-сполучення під дією системи CuO/KI (Jiang et al., 2014). Оптимізовані умови (DMSO, 100 °C, повітря) дозволяють отримувати (*E*)-алкенілсульфони з виходами до 74 %. Встановлено, що

електроноакцепторні замісники в ароматичному ядрі кислот інтенсифікують процес, тоді як стеричні перешкоди суттєво обмежують конверсію.

Реакція коричних кислот із сульфінатами натрію в присутності каталітичних кількостей Mn(OAc)₂ призводить до формування вінілсульфонів із високими хімічними виходами (Xue et al., 2016). Експериментально доведено, що вибір DMSO як реакційного середовища та аеробні умови є критичними параметрами, без яких неможливе досягнення оптимальних показників виходу продукту.

Електрохімічний синтез (*E*)-вінілсульфонів здійснено шляхом прямого окиснювального сполучення коричних кислот із натрій сульфінатами за кімнатної температури (Qian et al., 2016). Процес базується на радикальному механізмі і забезпечує високу регіоселективність. Описаний метод є толерантним до багатьох функціональних груп, проте чутливий до стеричних перешкод та електронних ефектів замісників: електронозбагачені субстрати забезпечують вищу ефективність порівняно з *орто*-заміщеними та аліфатичними похідними.

Розроблено також м'який метод фотохімічного декарбоксілюючого сульфонілювання коричних кислот (Ge et al., 2019). Реакція перебігає під дією синього світла у середовищі *N,N*-диметилацетамиду (DMA) за присутності Cs₂CO₃ без застосування зовнішніх фотокаталізаторів та окисників.

Некаталітичне декарбоксілююче сульфонілювання коричних кислот арилсульфонілгідрозидами (Singh et al., 2015) з використанням системи I₂/*mpet*-бутилгідропероксиду (TBHP)/DBU забезпечує вихід (*E*)-вінілсульфонів до 87 % вже за кімнатної температури. Процес характеризується високою регіо- та стереоселективністю, а також широкою субстратною сумісністю.

Запропоновано також синергетичний підхід до декарбоксілюючого сполучення коричних кислот із сульфонілгідрозидами за участю фотокаталізатора динатрій 2,4,5,7-тетрабромфлуоресцеїну (Eosin Y), KI та Cs₂CO₃ (Cai et al., 2016). Реакція перебігає під дією видимого світла за кімнатної температури, де кисень повітря виступає єдиним окисником.

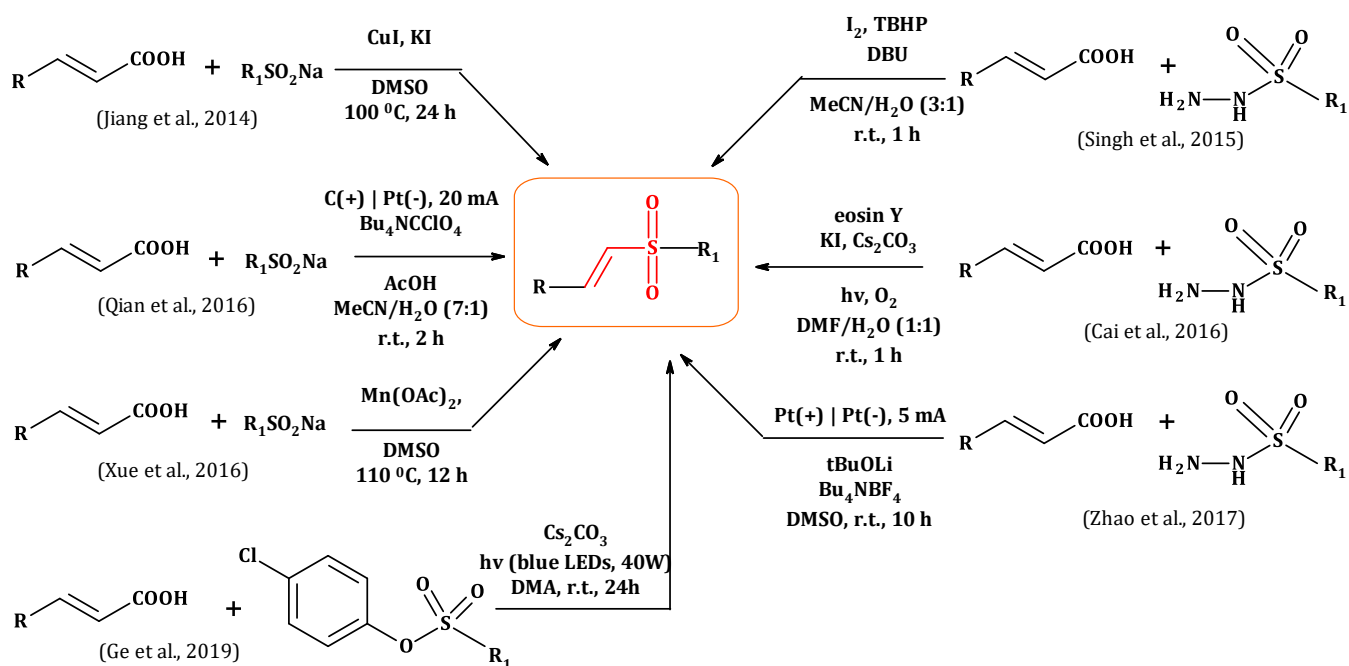


Рис. 3. Схема синтезу вінілсульфонів на основі коричневих кислот

Окрему нішу займає електрохімічний синтез, який дозволяє отримувати (*E*)-вінілсульфони безпосередньо з коричневих кислот та сульфінатів або сульфонілгідрозидів. Зокрема, розроблено метод електрохімічного декарбоксілювального сульфонування з використанням платинових електродів у системі DMSO/*t*-BuOLi/*n*-Bu₄NBF₄ (Zhao et al., 2017). Процес протікає через окиснювальне розщеплення зв'язку N–S у сульфонілгідрозиді з подальшим крос-сполученням. Цей підхід забезпечує відмінну стереоселективність (*E/Z* > 99:1) навіть для галогенованих та гетероарильних субстратів.

Здійснено також синтез аліл- та вінілсульфонів і на основі β-алкілнітроалкенів (рис. 4). Встановлено, що ключову роль у визначенні напрямку реакції відіграє вибір розчинника та каталітичної системи (Wang et al., 2021). Зокрема, у *N,N*-диметилформаміді (DMF) β-алкілнітроалкени ізомеризуються в електроннозбагачені алілнітросполуки, які при взаємодії з сульфонілгідрозидом утворюють алілсульфони з високою регіоселективністю за присутності FeCl₃ та DTBP.

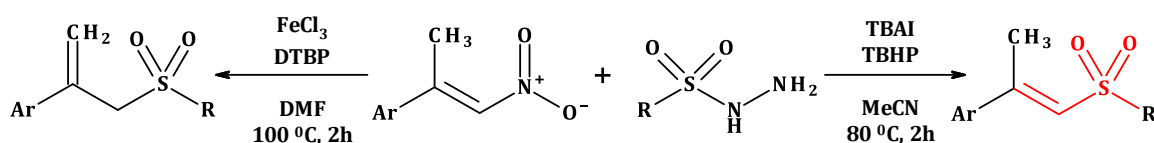


Рис. 4. Схема синтезу вінілсульфонів на основі β-алкілнітроалкенів

Натомість у ацетонітрилі за наявності тетра-*n*-бутиламоній йодиду (TBAI) та TBHP відбувається пряме сульфонування електроннодефіцитних β-алкілнітроалкенів із утворенням вінілсульфонів.

Ряд досліджень присвячено синтезу вінілсульфонів на основі алкінів (рис. 5).

Розроблено швидкий метод гідросульфування алкінів натрій сульфінатами під дією мікрохвильового випромінювання (110 °C,

5–7 хв) (Shelke et al., 2014). При використанні низьких концентрацій каталізатора Cu(OTf)₂ у середовищі AcOH досягнуто високої регіо- та стереоселективності в синтезі (*E*)-вінілсульфонів (виходи 71–89 %).

Декарбоксілювальне крос-сполучення фенілпропіолових кислот із натрій сульфінатами (Rong et al., 2015) із застосуванням H₃PO₄ як медіатора в середовищі DMSO забезпечує високу ефективність утворення вінілсульфонів (виходи до 92 %).

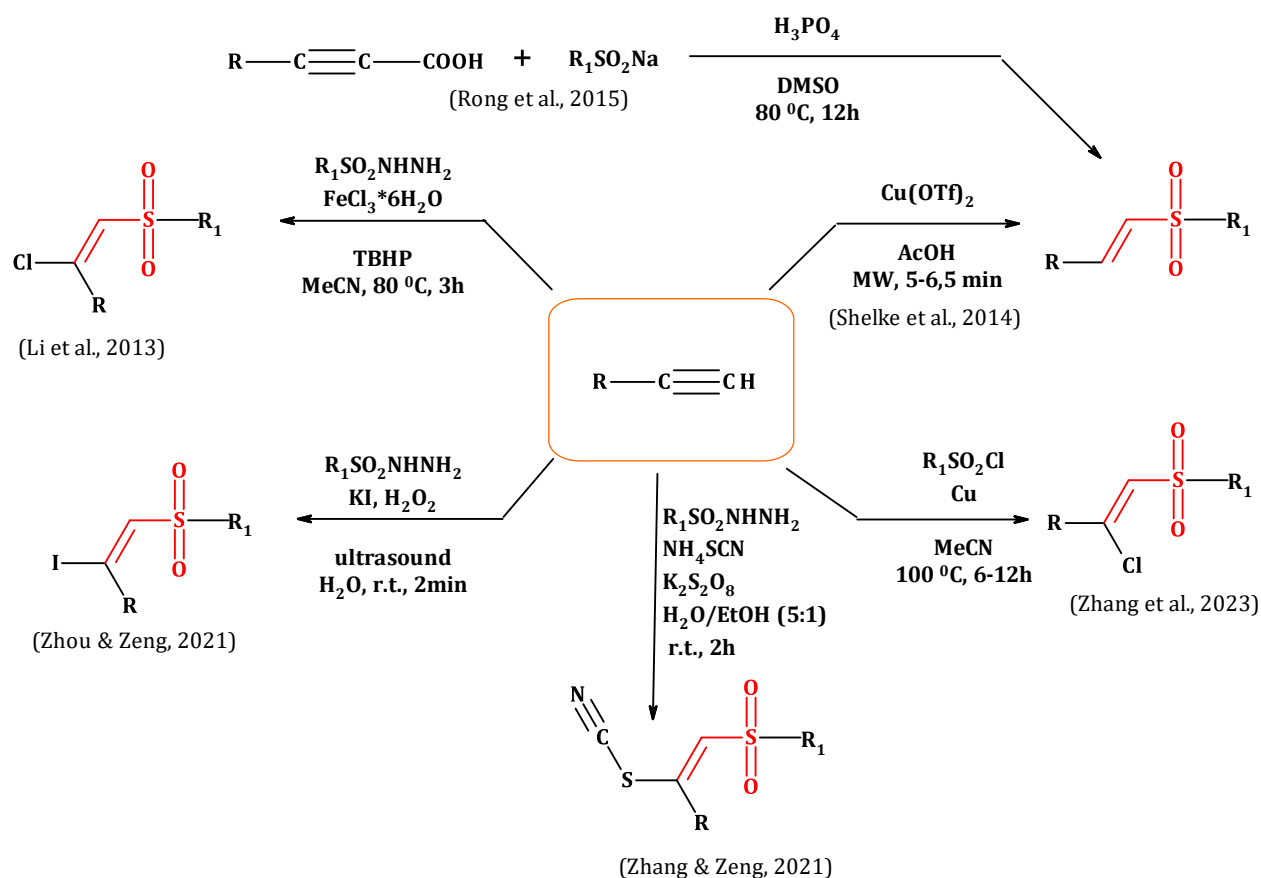


Рис. 5. Схема синтезу вінілсульфонів на основі алкінів

Використання алкінів також дозволяє синтезувати галогенозаміщені вінілсульфони. Розроблено метод синтезу (*E*)- β -хлоро- та бромовінілсульфонів із термінальних алкінів та сульфонілгідрозидів, який базується на використанні доступних галогенідів феруму як джерела галогену та ТВНР як окисника (Li et al., 2013). Реакція характеризується високою регіоселективністю та стереоспецифічністю, забезпечуючи ефективне формування зв'язків C-S та C-Hal в одному реакційному циклі. (*E*)- β -йодовінілсульфони було отримано із алкінів та сульфонілгідрозидів під дією ультразвукового опромінення (Zhou et al., 2007). Система на основі KI та H₂O₂ забезпечує високі виходи цільових продуктів у м'яких умовах.

Нещодавно розроблено ефективний метод синтезу (*Z*)- β -хлоровінілсульфонів (Zhang et al., 2023) через радикальне приєднання з переносом атома АТРА (Atom Transfer Radical Addition), який базується на використанні порошку купруму як ініціатора утворення сульфонільних радикалів та

CuCl. Реакція протікає у м'яких безлігандних умовах. Слід відмітити також можливість 1,2-тіоціанатосульфонілювання термінальних алкінів (Zhang & Zeng, 2021) із використанням тіоціанату амонію (NH₄SCN) та сульфонілгідрозидів, яке протікає у водному середовищі за присутності калій персульфату (K₂S₂O₈) як окисника.

Тандемна реакція алілсульфінатів (Xu et al., 2010), що включає Іг-каталізоване алільне заміщення з подальшою ізомеризацією, дозволяє отримувати вінілсульфони виключно у формі (*E*)-ізомерів із високими виходами (до 92 %) (рис. 6). У ході оптимізації процесу було виявлено, що DBU є найбільш ефективною основою, а діоксан при 100°C – оптимальним розчинником.

Поряд із використанням сульфонілгідрозидів, ефективним джерелом сульфонільного фрагмента виступають *N*-тозилгідрозони (Mao et al., 2015). Застосування каталізу купрумом дозволяє перегрупувати ці субстрати у вінілсульфони з високим ступенем (*E*)-селективності за радикальним механізмом.

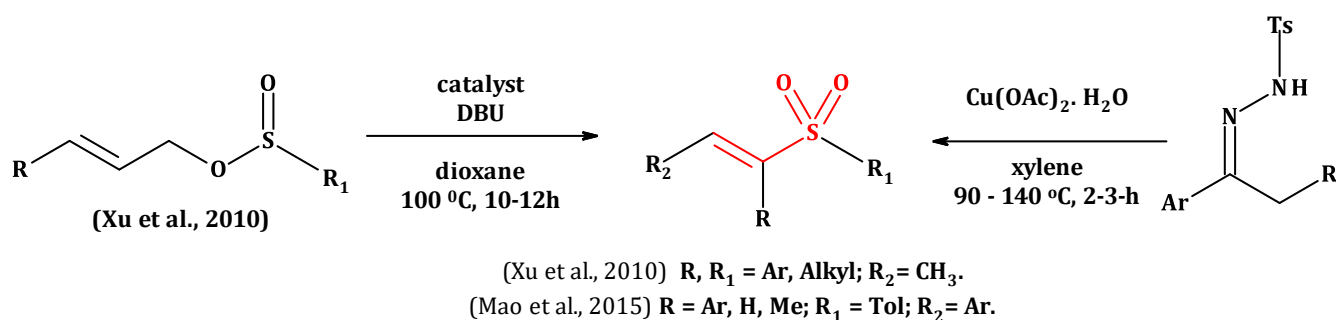


Рис. 6. Схема синтезу вінілсульфонів перегрупуванням *N*-тозилгідразонів та алісульфінатів

Йодосульфонілювання алєнів (рис. 7) із використанням сульфонілідидів забезпечує прями́й доступ до (*E*)- α -йодометил-вінілсульфонів (Lu et al., 2018). Реакція протікає при кімнатній температурі в середовищі дихлорметану за участю каталітичної системи CuI/1,10-фенантролін, що дозволяє отримувати цільові продукти з виходами від 62 % до 96 %.

В іншому дослідженні (Goh et al., 2021) описано метод синтезу вінілсульфонів шляхом сульфонування алєнових карбоніль-

них сполук у водному середовищі за м'яких умов. Оптимізація параметрів процесу та апробація широкого ряду сульфінних кислот і алєнових карбонільних субстратів підтвердили їхню високу реакційну здатність із досягненням гарного ступеня перетворення. Практична значущість методу полягає у спрощеному виділенні цільових продуктів шляхом фільтрації, що виключає необхідність хроматографічного очищення.

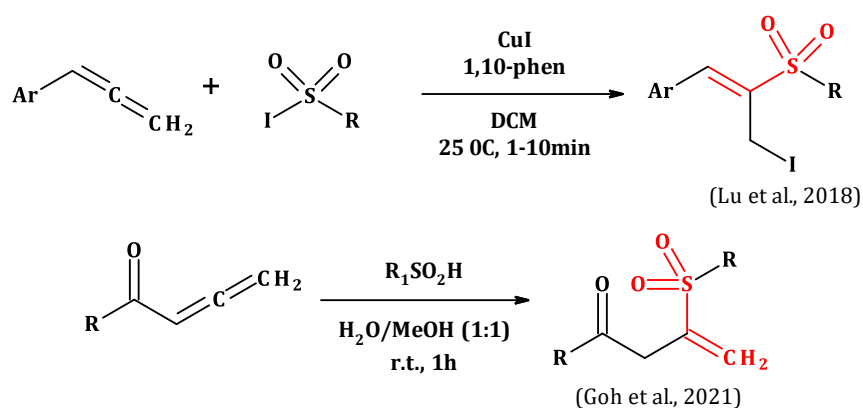


Рис. 7. Схема синтезу вінілсульфонів на основі алєнів

Функціоналізовані енаміни використовуються як універсальні ключові проміжні продукти в органічному синтезі та широко застосовуються для багатьох перетворень. Зокрема, β -енаміони є важливими попередниками для синтезу похідних бензену (Prek et al., 2014) та гетероароматичних сполук (Stanovnik & Svete, 2004), таких як піридини (Reddy et al., 2005), піроли (Eberlin & Kascheres, 1988),

піримідини (Spivey et al., 2003) та триазоли (Al-Sader & Kadri, 1985).

Крім того, такого плану сполуки демонструють поліфункціональність: тобто мають нуклеофільність енамінів та електрофільність енонів. Незважаючи на їхній синтетичний потенціал для широкого застосування та важливість, методи отримання β -аміновінілсульфонів досить обмежені (рис. 8).

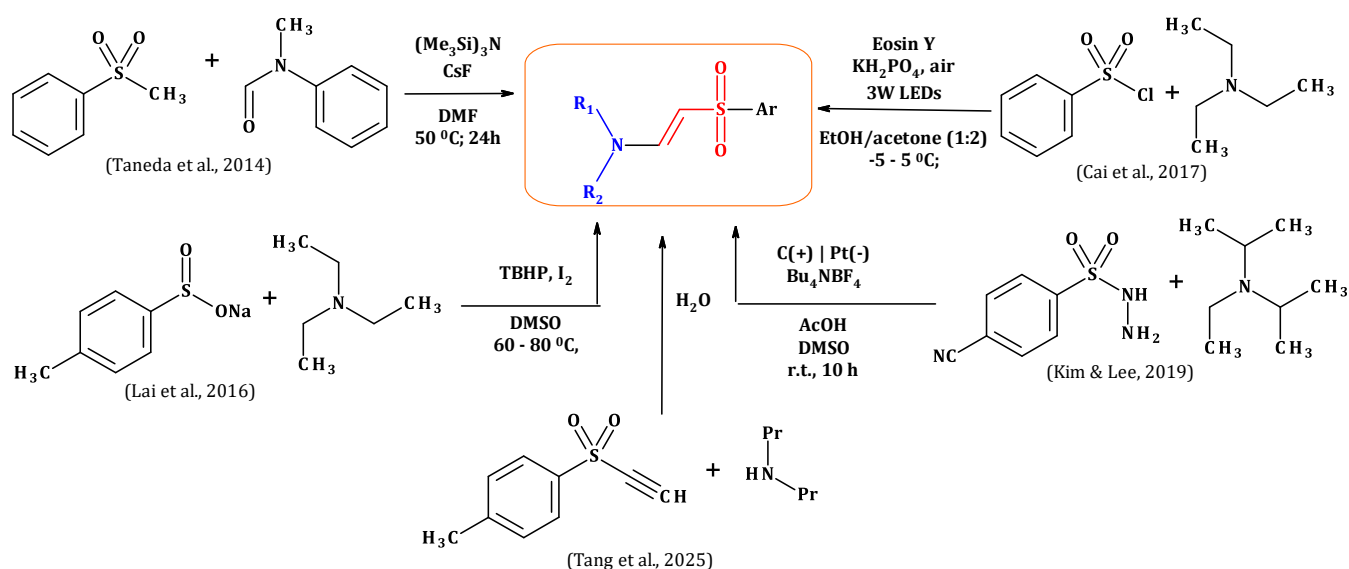


Рис. 8. Схема синтезу заміщених β -аміновінілсульфонів

Синтез функціоналізованих енамінів, зокрема β -аміновінілсульфонів, було здійснено шляхом прямої конденсації фенілметилсульфону з N-метил-N-фенілформамідом (Taneda et al., 2014) з виходом 88 %. Зазначена реакція перебігає за каталітичної кількості CsF та стехіометричного надлишку трис(триметилсиліл)аміну при температурі 50 °C протягом доби. Інший метод базується на взаємодії третинних амінів із натрій сульфінатами за присутності I₂ та TBHP (Lai et al., 2016). Ключовою особливістю запропонованого підходу є висока хемоселективність, яка регулюється природою розчинника. Експериментально доведено, що використання води як реакційного середовища сприяє ефективному розщепленню зв'язку C–N у третинних амінах з подальшим утворенням сульфонамідів, натомість застосування органічних розчинників, зокрема DMSO, спрямовує реакцію шляхом селективного розриву зв'язку C–H, що дозволяє з високими виходами одержувати цільові β -аміновінілсульфони. Такий підхід дає можливість контрольованої деструкції зв'язків C–N та C–H, відкриваючи нові шляхи до отримання різних функціоналізованих сульфонів.

Також розроблено метод синтезу вінілсульфонів та сульфамідів, що базується на фотокаталітичній взаємодії аліфатичних амінів з аренсульфонілхлоридами (Cai et al., 2017). Реакція перебігає за дії видимого

світла при наявності Eosin Y як фотосенсибілізатора. Ключовою перевагою даного методу є можливість селективного формування вінілсульфонів або сульфонамідів залежно від обраного розчинника та окиснювального середовища. За оптимізованих умов авторами отримано серію цільових продуктів із помірними та високими виходами.

Арилсульфонілгідрозиди при взаємодії з третинними амінами у кислому середовищі за присутності nBu₄NBF₄ також забезпечують синтез β -аміновінілсульфонів із високими виходами (Kim & Lee, 2019).

Висновки

Сучасний стан розвитку методів синтезу вінілсульфонів свідчить про відмову від традиційного окиснення сульфідів на користь екологічно безпечних і високо-ефективних підходів. Основним вектором еволюції в цій галузі є впровадження металокаталітичних, електрохімічних та фотохімічних методів, а також використання м'яких окиснювальних систем, що забезпечують високу регіо- та стереоселективність. Аналіз літературних джерел підтверджує, що найбільш універсальними вихідними речовинами для введення вінільного фрагмента є алкени, алкіни та коричні кислоти, тоді як джерелами сульфонільної групи найчастіше виступають сульфінати, сульфонілхлориди та сульфонілгідрозиди.

Сучасні підходи до синтезу β -аміновінілсульфонів фокусуються на високій хемоселективності та використанні м'яких умов, де ключову роль відіграє контроль над активацією зв'язків C–H та C–N. Встановлено, що напрямок реакції критично залежить від природи

середовища: використання органічних розчинників (зокрема DMSO) та фотокаталітичних систем дозволяє селективно отримувати енамінсульфони, тоді як водне середовище частіше спрямовує процес у бік формування сульфамідів.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Не застосовується / Not applicable.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

- Acton, Q. A. (Ed.). (2013). *Sulfones – Advances in research and application*. ScholarlyEditions.
- Alba, A. N., Companyó, X., & Rios, R. (2010). Sulfones: new reagents in organocatalysis. *Chemical Society reviews*, 39(6), 2018–2033. <https://doi.org/10.1039/b911852g>
- Al-Sader, B. H., & Kadri, M. (1985). Kinetics and mechanism of the 1,3-dipolar cycloaddition of phenyl azides to methyl 3-pyrrolidinoacrylate. *Tetrahedron letters*, 26(38), 4661-4664. [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(00\)98779-3](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(00)98779-3)
- Breitschaft, F. A., Saak, A. L., Krumbiegel, C., Bartolomeu, A. de A., Weyhermüller, T., & Waldvogel, S. R. (2025). Multicomponent electrosynthesis of enaminyll sulfonates starting from alkylamines, SO₂, and alcohols. *Organic Letters*, 27(5), 1210–1215. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.4c04746>
- Cacchi, S., Fabrizi, G., Goggiamani, A., Parisi, L. M., & Bernini, R. (2004). Unsymmetrical diaryl sulfones and aryl vinyl sulfones through palladium-catalyzed coupling of aryl and vinyl halides or triflates with sulfinic acid salts. *The Journal of Organic Chemistry*, 69(17), 5608–5614. <https://doi.org/10.1021/jo0493469>

- Cai, S., Xu, Y., Chen, D., Li, L., Chen, Q., Huang, M., & Weng, W. (2016). Visible-light-enabled decarboxylative sulfonylation of cinnamic acids with sulfonylhydrazides under transition-metal-free conditions. *Organic Letters*, 18(12), 2990–2993. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.6b01353>
- Cai, Y., Zhang, R., Sun, D., Xu, S., & Zhou, Q. (2017). Eosin Y-sensitized photocatalytic reaction of tertiary aliphatic amines with arenesulfonyl chlorides under visible-light irradiation. *Synlett*, 28(13), 1630–1635. <https://doi.org/10.1055/s-0036-1588828>
- Cheng, Z., Sun, P., Tang, A., Jin, W., & Liu, C. (2019). Switchable synthesis of aryl sulfones and sulfoxides through solvent-promoted oxidation of sulfides with O₂/air. *Organic Letters*, 21(22), 8925–8929. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.9b03192>
- Das, B., Lingaiah, M., Damodar, K., & Bhunia, N. (2011). An efficient synthesis of vinyl sulfones from alkenes and aryl sulfonates. *Synthesis*, 2011(18), 2941–2944. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1260142>
- Eberlin, M. N., & Kascheres, C. (1988). Catalyzed reaction of diazodiphenylethanone and related diazo ketones with enaminones as a source of pyrroles. *The Journal of Organic Chemistry*, 53(9), 2084–2086. <https://doi.org/10.1021/jo00244a042>
- Fang, P., Wang, Q., Shen, X., Zhao, J., Wang, F., & Liu, Z.-Q. (2024). Electrochemical synthesis of vinyl, alkyl, and allyl sulfones from sodium sulfonates and olefins. *The Journal of Organic Chemistry*, 89(17), 12619–12627. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.4c01548>
- Ge, Q.-Q., Qian, J.-S., & Xuan, J. (2019). Electron donor-acceptor complex enabled decarboxylative sulfonylation of cinnamic acids under visible-light irradiation. *The Journal of Organic Chemistry*, 84(13), 8691–8701. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.9b00552>
- Goh, J., Maraswami, M., & Loh, T.-P. (2021). Synthesis of vinylic sulfones in aqueous media. *Organic Letters*, 23(3), 1060–1065. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.0c04257>
- Guan, Z.-H., Zuo, W., Zhao, L.-B., Ren, Z.-H., & Liang, Y.-M. (2007). An economical and convenient synthesis of vinyl sulfones. *Synthesis*, 2007(10), 1465–1470. <https://doi.org/10.1055/s-2007-966039>
- He, F.-S., Gong, X., Rojsitthisak, P., & Wu, J. (2019). Direct C-H methylsulfonylation of alkenes with the insertion of sulfur dioxide. *The Journal of Organic Chemistry*, 84(20), 13159–13163. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.9b01729>
- Jiang, Q., Xu, B., Jia, J., Zhao, A., Zhao, Y.-R., Li, Y.-Y., He, N.-N., & Guo, C.-C. (2014). Copper-catalyzed aerobic decarboxylative sulfonylation of cinnamic acids with sodium sulfonates: Stereospecific synthesis of (*E*)-alkenyl sulfones. *The Journal of Organic Chemistry*, 79(16), 7372–7379. <https://doi.org/10.1021/jo5010845>
- Jiang, Z., You, K., Wu, H., Xu, M., Wang, T., & Luo, J. (2024). Photochemical halogen-bonding promoted synthesis of vinyl sulfones via vinyl and sulfonyl radicals. *Organic Letters*, 26(4), 631–635. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.3c03958>
- Kadari, L., Palakodety, R. K., & Yallapragada, L. P. (2017). Iodine-catalyzed facile approach to sulfones employing TosMIC as a sulfonylating agent. *Organic Letters*, 19(10), 2580–2583. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.7b00896>
- Kim, H.-S., & Lee, S. (2019). Electrochemical coupling of arylsulfonyl hydrazides and tertiary amines for the synthesis of β-amidovinyl sulfones. *European Journal of Organic Chemistry*, 2019(44), 7338–7341. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201901277>

- Lai, J., Chang, L., & Yuan, G. (2016). I₂/TBHP mediated C–N and C–H bond cleavage of tertiary amines toward selective synthesis of sulfonamides and β -arylsulfonyl enamines: The solvent effect on reaction. *Organic Letters*, 18(13), 3190–3193. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.6b01428>
- Li, X., Shi, X., Fang, M., & Xu, X. (2013). Iron halide-mediated regio- and stereoselective halosulfonylation of terminal alkynes with sulfonylhydrazides: Synthesis of (*E*)- β -chloro and bromo vinylsulfones. *The Journal of Organic Chemistry*, 78(18), 9499–9504. <https://doi.org/10.1021/jo401581n>
- Lu, N., Zhang, Z., Ma, N., Wu, C., Zhang, G., Liu, Q., & Liu, T. (2018). Copper-catalyzed difunctionalization of allenes with sulfonyl iodides leading to (*E*)- α -iodomethyl vinylsulfones. *Organic Letters*, 20(14), 4318–4322. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.8b01765>
- Mao, S., Gao, Y.-R., Zhu, X.-Q., Guo, D.-D., & Wang, Y.-Q. (2015). Copper-catalyzed radical reaction of N-tosylhydrazones: Stereoselective synthesis of (*E*)-vinyl sulfones. *Organic Letters*, 17(7), 1692–1695. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.5b00461>
- Morales-Sanfrutos, J., Lopez-Jaramillo, J., Ortega-Muñoz, M., Megia-Fernandez, A., Perez-Balderas, F., Hernandez-Mateo, F., & Santoyo-Gonzalez, F. (2010). Vinyl sulfone: a versatile function for simple bioconjugation and immobilization. *Organic & biomolecular chemistry*, 8(3), 667–675. <https://doi.org/10.1039/b920576d>
- Nair, V., Augustine, A., & Suja, T. D. (2002). CAN mediated reaction of aryl sulfinates with alkenes and alkynes: Synthesis of vinyl sulfones, β -iodovinyl sulfones and acetylenic sulfones. *Synthesis*, 2002(15), 2259–2265. <https://doi.org/10.1055/s-2002-34838>
- Prek, B., Bezenšek, J., Kasunič, M., Grošel, U., Svete, J., & Stanovnik, B. (2014). Reactions of enaminones and related compounds with N, N-dimethylacetamide dimethyl acetal. A simple one-pot metal-free synthesis of polysubstituted benzene derivatives. *Tetrahedron*, 70(14), 2359–2369. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2014.02.039>
- Qian, P., Bi, M., Su, J., Zha, Z., & Wang, Z. (2016). Electrosynthesis of (*E*)-vinyl sulfones directly from cinnamic acids and sodium sulfinates via decarboxylative sulfono functionalization. *The Journal of Organic Chemistry*, 81(11), 4876–4882. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.6b00661>
- Rao, W.-H., Li, Y.-G., Jiang, L.-L., Gao, C., Wang, Y.-Z., Liu, J.-F., Zhou, F.-Y., Zou, G.-D., & Cao, X. (2024). Nickel-catalyzed direct sulfonylation of styrenes and unactivated aliphatic alkenes with sulfonyl chlorides. *The Journal of Organic Chemistry*, 89(14), 9755–9768. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.4c00094>
- Rawat, A., Roy, M., Jyoti, A., Kaushik, S., Verma, K., & Srivastava, V. K. (2021). Cysteine proteases: Battling pathogenic parasitic protozoans with omnipresent enzymes. *Microbiological research*, 249, 126784. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126784>
- Reddy, G. J., Latha, D., Thirupathiah, C., & Rao, K. S. (2005). A facile synthesis of 2, 3-disubstituted-6-arylpyridines from enaminones using montmorillonite K10 as solid acid support. *Tetrahedron letters*, 46(2), 301–302. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2004.11.071>
- Rong, G., Mao, J., Yan, H., Zheng, Y., & Zhang, G. (2015). Phosphoric acid-mediated synthesis of vinyl sulfones through decarboxylative coupling reactions of sodium sulfinates with phenylpropionic acids. *The Journal of Organic Chemistry*, 80(15), 7652–7657. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.5b01212>
- Scott, K. A., & Njardarson, J. T. (2018). Analysis of US FDA-Approved Drugs Containing Sulfur Atoms. *Topics in current chemistry (Cham)*, 376(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s41061-018-0184-5>

- Shelke, G. M., Rao, V. K., Pericherla, K., & Kumar, A. (2014). An efficient and facile synthesis of vinyl sulfones via microwave-assisted copper triflate catalyzed hydrosulfonylation of alkynes. *Synlett*, 25(16), 2345–2349. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1378546>
- Shiri, M., Salehi, P., Mohammadpour, Z., Salehi, P., & Notash, B. (2021). Cs₂CO₃-mediated regio- and stereoselective sulfonylation of 1,1-dibromo-1-alkenes with sodium sulfinates. *Synthesis*, 53, 1149–1156. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1706295>
- Singh, R., Allam, B. K., Singh, N., Kumari, K., Singh, S. K., & Singh, K. N. (2015). A direct metal-free decarboxylative sulfono functionalization (DSF) of cinnamic acids to α , β -unsaturated phenyl sulfones. *Organic Letters*, 17(11), 2656–2659. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.5b01037>
- Spivey, A. C., Srikanan, R., Diaper, C. M., & Turner, D. J. (2003). Traceless solid phase synthesis of 2-substituted pyrimidines using an 'off-the-shelf' chlorogermane-functionalised resin. *Organic & biomolecular chemistry*, 1(10), 1638-1640. <https://doi.org/10.1039/B303064D>
- Stanovnik, B., & Svete, J. (2004). Synthesis of heterocycles from alkyl 3-(dimethylamino)propenoates and related enamines. *Chemical reviews*, 104(5), 2433–2480. <https://doi.org/10.1021/cr020093y>
- Strasser, S., Wappl, C., & Slugovc, C. (2017). Solvent-free macrocyclisation by nucleophile-mediated oxa-Michael addition polymerisation of divinyl sulfone and alcohols. *Polymer Chemistry*, 8(11), 1797-1804. <https://doi.org/10.1039/C7PY00152E>
- Taneda, H., Inamoto, K., & Kondo, Y. (2014). Direct condensation of functionalized sp³ carbons with formamides for enamine synthesis using an in situ generated HMDS amide catalyst. *Chemical Communications*, 50(49), 6523-6525. <https://doi.org/10.1039/C4CC02228A>
- Tang, Y., Jiang, L., Li, S., Chen, X., Li, C., & Zhang, X. (2025). Iodine-promoted synthesis of (Z)- β -dithiocarbamate enamine derivatives in water and their antibacterial evaluation. *Journal of Molecular Structure*, 1322, 140356. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140356>
- Taniguchi, N. (2011). Stereoselective synthesis of (E)-alkenyl sulfones from alkenes or alkynes via copper-catalyzed oxidation of sodium sulfinates. *Synlett*, 2011(09), 1308–1312. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1260544>
- Venkataraman, K. (Ed.). (2012). *The Chemistry of Synthetic Dyes V4* (Vol. 4). Elsevier.
- Voutyritsa, E., Triandafillidi, I., & Kokotos, C. G. (2017). Green organocatalytic oxidation of sulfides to sulfoxides and sulfones. *Synthesis*, 49(04), 917–924. <https://doi.org/10.1055/s-0036-1588315>
- Wang, L., Yue, H., Yang, D., Cui, H., Zhu, M., Wang, J., Wei, W., & Wang, H. (2017). Metal-free oxidative coupling of aromatic alkenes with thiols leading to (E)-vinyl sulfones. *The Journal of Organic Chemistry*, 82(13), 6857–6864. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.7b00994>
- Wang, P.-L., Gao, H., Jiang, Z.-S., Li, C., Tian, Z.-A., & Li, P.-H. (2020). Electrochemical synthesis of vinyl sulfones by sulfonylation of styrenes with a catalytic amount of potassium iodide. *Synlett*, 31(17), 1720–1724. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1707212>
- Wang, Y., Xiong, G., Zhang, C., & Chen, Y. (2021). Controllable activation of β -alkyl nitroalkenes: Regioselective synthesis of allyl and vinyl sulfones. *The Journal of Organic Chemistry*, 86(5), 4018–4026. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.0c02869>

- Xu, Q.-L., Dai, L.-X., & You, S.-L. (2010). Tandem Ir-catalyzed allylic substitution reaction of allyl sulfonates and isomerization. *Organic Letters*, 12(4), 800–803. <https://doi.org/10.1021/ol902873q>
- Xue, N., Guo, R., Tu, X., Luo, W., Deng, W., & Xiang, J. (2016). Efficient synthesis of vinyl sulfones by manganese-catalyzed decarboxylative coupling of cinnamic acids with aromatic sulfinic acid sodium salts. *Synlett*, 27(19), 2695–2698. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1562476>
- Yao, W., Lv, K., Xie, Z., Qiu, H., & Ma, M. (2023). Catalyst-free electrochemical sulfonylation of organoboronic acids. *The Journal of Organic Chemistry*, 88(4), 2296–2305. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.2c02690>
- Zhai, H. (2006). Synthesis of Nitrogen Heterocycles Using Unsaturated Sulfones (Doctoral dissertation, University of Calgary).
- Zhang, M., & Zeng, X. (2021). Metal-free radical thiocyanatosulfonation of terminal alkynes in aqueous medium. *Organic Letters*, 23(9), 3326–3330. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.1c00820>
- Zhang, M., Zhao, W., Ma, J., Li, J., Meng, Q., Shen, C., & Zeng, X. (2023). Syn-selective chlorosulfonylation of alkynes via a copper-powder-initiated atom transfer radical addition reaction and mechanistic studies. *Organic Letters*, 25(1), 231–235. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.2c04074>
- Zhao, Y., Lai, Y.-L., Du, K.-S., Lin, D.-Z., & Huang, J.-M. (2017). Electrochemical decarboxylative sulfonylation of cinnamic acids with aromatic sulfonylhydrazides to vinyl sulfones. *The Journal of Organic Chemistry*, 82(18), 9655–9661. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.7b01741>
- Zhou, C., & Zeng, X. (2021). Iodosulfonylation of alkynes under ultrasound irradiation. *Synthesis*, 53(24), 4614–4620. <https://doi.org/10.1055/a-1559-3346>

Received: 10.02.2026. **Accepted:** 10.03.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Поплавський Я., Янченко В. Сучасні стратегії синтезу заміщених вінілсульфонів. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 210-224. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.18>

Cite this article in APA style as:

Poplavskiy, Y., & Yanchenko, V. (2026). Suchasni stratehii syntezy zamishchenykh vinilsulfoniv [Modern synthetic strategies for substituted vinyl sulfones]. *Biota. Human. Technology*, (1), 210-224. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.18> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Poplavskiy Y. [*in Ukrainian*: **Поплавський Я.**] ¹, chemist, email: yoplav@gmail.com
ORCID: 0009-0008-5077-641X
Enamine Ltd,
78 Winston Churchill Street, Kyiv, 02094, Ukraine

Yanchenko V. [*in Ukrainian*: **Янченко В.**] ², Assoc. Prof., Ph.D. in Pharm. Sc., email: v.o.yanchenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6727-4124 Scopus-Author ID: 6602531355 ResearcherID: AAC-9900-2020
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

¹ Manuscript preparation, data collection

² Study design, manuscript preparation.



RESEARCH INTEGRITY

ДОБРОЧЕСНІСТЬ У ДОСЛІДЖЕННЯХ



UDC 61:57]:502/504:519.233.4:378.2+001]:174.7

DOI: 10.58407/bht.1.26.19



Copyright (c) 2026 Oleksandr Lukash, Anita Szikura, Olha Mekhed, Svitlana Strilets

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Олександр Лукаш, Аніта Сікура, Ольга Мехед, Світлана Стрілець
MANOVA ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОБРОЧЕСНОСТІ
МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



Oleksandr Lukash, Anita Szikura, Olha Mekhed, Svitlana Strilets

MANOVA AS A TOOL FOR ENSURING THE INTEGRITY OF
BIO-MEDICAL AND ENVIRONMENTAL RESEARCH

АНОТАЦІЯ

Відтворюваність та доброчесність досліджень є важливими принципами наукових, зокрема медико-біологічних та екологічних, досліджень, з позицій реалізації цілей сталого розвитку та принципів відкритої науки.

Мета роботи. Метою роботи є довести, що застосування багатомірного дисперсійного аналізу у медико-біологічних та екологічних дослідженнях є інструментом забезпечення доброчесності наукової діяльності.

Методологія. У роботі використані результати досліджень авторів з метою ілюстрування переваг підходу MANOVA для циклічних даних у медико-біологічних та екологічних дослідженнях з позицій доброчесності. Застосований аналіз сучасних опублікованих робіт з проблеми використання статистичної обробки результатів наукових досліджень, а також використано загальнонаукові методи: абстрактно-логічний, індукції-дедукції та порівняння.

Наукова новизна. Розглянуто доречність застосування того чи іншого аналізу для вирішення ситуацій у медико-біологічних та екологічних дослідженнях, що включають статистичне порівняння більше двох груп, і часто з використанням даних, отриманих шляхом застосування складних експериментальних планів. На конкретних прикладах показано, як MANOVA покращує зменшує кількість хибнопозитивних результатів, підвищує статистичну ефективність, дозволяє виявити взаємодії між незалежними та залежними змінними, забезпечуючи повне уявлення про досліджувану систему, повноцінну інтерпретацію результатів та формулювання обґрунтованих висновків. Окреслено проблеми академічної доброчесності, пов'язані з використанням MANOVA: правильність процедури *post hoc* – описовим дискримінантним аналізом (DDA) та недостатність повідомлень про статистичне програмне забезпечення, яке використовується для аналізу кількісних даних.

Висновки. Багатомірний дисперсійний аналіз підвищує доброчесність медико-біологічних та екологічних досліджень одночасно тестуючи кілька залежних змінних, що дозволяє контролювати рівень хибнопозитивних помилок в експерименті. Він є статистично ефективнішим, ніж виконання кількох окремих аналізів. MANOVA також дозволяє виявляти взаємодії між факторами, залежними та незалежними змінними, краще фіксуючи складність організації біологічних та екологічних систем. Це призводить до більш повних та надійних результатів, особливо при роботі з кількома пов'язаними медико-біологічними або екологічними вимірюваннями.

Ключові слова: академічна доброчесність, багатомірний дисперсійний аналіз, екологія, медична біологія, наукові дослідження

ABSTRACT

Reproducibility and integrity of research are important principles of scientific, in particular biomedical and environmental, research, from the perspective of implementing sustainable development goals and the principles of open science.

Purpose of the work. The aim of the work is to prove that the use of multivariate analysis of variance in biomedical and environmental research is a tool for ensuring the integrity of scientific activity.

Methodology. The paper uses the authors' research results to illustrate the advantages of the MANOVA approach for cyclical data in biomedical and environmental research from an integrity perspective. An analysis of modern

published works on the problem of using statistical processing of scientific research results was applied, and general scientific methods were used: abstract-logical, induction-deduction and comparison.

Scientific novelty. The appropriateness of using one or another analysis to address situations in biomedical and environmental research involving statistical comparison of more than two groups, and often using data obtained through the application of complex experimental designs, is considered. Specific examples show how MANOVA improves and reduces the number of false positives, increases statistical efficiency, and allows for the identification of interactions between independent and dependent variables, providing a complete picture of the system under study, a full interpretation of the results, and the formulation of well-founded conclusions. Academic integrity issues related to the use of MANOVA are outlined: the validity of the post hoc procedure – descriptive discriminant analysis (DDA) and the lack of reporting on the statistical software used to analyze quantitative data.

Conclusions. Multivariate analysis of variance improves the integrity of life-science and environmental research by testing multiple dependent variables simultaneously, allowing for control of the rate of false positive errors in an experiment. It is statistically more efficient than performing multiple separate analyses. MANOVA also allows for the detection of interactions between factors, dependent and independent variables, better capturing the complexity of the organization of biological and ecological systems. This leads to more complete and reliable results, especially when working with multiple related biomedical or ecological measurements.

Key words: academic integrity, multivariate analysis of variance, ecology, medical biology, scientific research

Вступ

Схематичний зв'язок між окремими цілями сталого розвитку характеризує зв'язок «університет – якість досліджень – трансфер технологій – промисловість», де важливого значення надається доброчесності досліджень, зокрема процедурами внутрішнього та зовнішнього забезпечення їх якості (Artyukhov et al. (2021).

Прихильники відкритої науки також часто згадують питання, що стосуються доброчесності досліджень, і навпаки. У праці Haven et al. (2022) стверджується, що такі поняття, як відповідальна дослідницька практика, прозорість та відкрита наука, пов'язані одне з одним, але кожне з них має різний фокус. Відповідальна дослідницька практика більше зосереджена на ретельному проведенні досліджень, прозорість переважно зосереджена на повному звітуванні про дослідження, а основна увага відкритої науки зосереджена на поширенні результатів досліджень. Справедливе врахування цих понять вимагає дій від дослідників та дослідницьких установ, щоб зробити дослідження з доброчесністю можливими, легкими, нормативними та корисними (Haven et al., 2022). Отже, дослідницька доброчесність набуває важливості в дослідницькій спільноті, дозволяючи її членам довіряти попередній роботі та спиратися на неї, а також розвиваючи впевненість у своїх наукових результатах. Таким чином, довіра до дослідницької системи є результатом доброчесності досліджень. (Muthanna et al., 2024). Забезпечення доброчесності дослідницьких даних має вирішальне

значення для точності та відтворюваності будь-якого наукового дослідження, що базується на даних. Цього можна досягти лише шляхом встановлення та впровадження суворих правил обробки дослідницьких даних. Miller & Spiegel (2025) надають чіткі та практичні інструкції для всього дослідницького процесу, включаючи загальну стратегію збору даних, визначення змінних та рекомендації щодо обробки даних, що покращує стійкість та достовірність наукового дослідження, підкреслюючи критичну роль якості даних у них. Формування безпечного та доброчесного наукового середовища є ключовим методологічним аспектом у підготовці фахівців з громадського здоров'я (Deukun et al., 2025).

Відтворюваність та доброчесність досліджень є важливими принципами кожного наукового дослідження та відкриття. Вони служать доказом того, що усталену та задокументовану роботу можна перевірити, повторити та відтворити (Diaba-Nuhofo & Amponsah-Offeh, 2021).

У статті Li et al. (2025) представлено міжнаціональне дослідження, яке вивчає сприйняття та практику дослідників щодо дослідницької доброчесності. Результати показують кореляцію між дотриманням цінностей, рівнем прийняття дослідницької неправомірної поведінки та самостійно повідомленою дослідницькою неправомірною поведінкою. Це міжнаціональне дослідження виявляє значні відмінності в цих змінних серед дослідників з різних країн, а також пропонує цінну інформацію про ставлення та поведінку дослідників щодо дослідницької неправомірної поведінки,

сприяючи просуванню етичної дослідницької практики в усьому світі та підвищуючи довіру та чесність наукової діяльності.

Об'єктивне представлення результатів є важливим, наголошує Damasio (2024), і зазначає, що мало хто з науковців маніпулює результатами, а отже, й використовує інші види неправомірної поведінки, такі як фабрикація даних, фальсифікація та плагіат. Однак структурні та інституційні фактори, включаючи стимули для досліджень та системи визнання, відіграють важливу роль у дослідницькій поведінці. Тому сприяння доброчесності досліджень вимагає колективних зусиль усіх зацікавлених сторін для підтримки суспільної довіри до наукової спільноти та забезпечення надійності науки (Armond et al., 2024).

Доброчесність наукових досліджень тісно пов'язана зі статистичною обробкою. Доброчесність у наукових дослідженнях, зокрема біомедичних та екологічних, передбачає застосування статистичних моделей (Lukash et al., 2025). Відомо, що обґрунтована статистика забезпечує чесні, відтворювані та достовірні результати (надійність, точність), тоді як неправильне використання (наприклад, Р-хакінг, вибіркоче висвітлення) є науковою порушницею, підриває довіру та призводить до помилкових висновків. Точний, прозорий статистичний аналіз, що використовує відповідні методи та інструменти, є основоположним для підтримки доброчесності (Zhao et al., 2022) та відтворюваності досліджень, що робить статистичний етап критично важливим контрольним пунктом для етичного поводження з даними та достовірної науки.

У своїй статті Vardeman & Morris (2003) підкреслюють важливість неупередженості для статистиків і зазначають, що професійний статистик ніколи не повинен поводитися як адвокат у судовій залі, оскільки останній вибірково використовує докази, щоб представити правду (або її частину) у світлі, найбільш сприятливому для певної точки зору.

Для лінійних вимірювань існує добре відомий статистичний інструментарій. Проте деякі шкали вимірювання в науці за своєю суттю є періодичними, а не лінійними.

Циркулярні дані є поширеним явищем у медико-біологічних та екологічних дослідженнях. Багатовимірний дисперсійний аналіз – MANOVA (Multivariate Analysis of Variance) пропонує суттєве розширення таких та інших наукових питань (Cleophas & Zwinderman, 2012), які можна вирішити статистично за допомогою циклічних даних (Landler et al., 2018, 2022). Саме тому цей аналіз активно використовується у сучасних дослідженнях фізіологічних параметрів організмів, зокрема людини, та екосистем. На нашу думку, крім методологічної модернізації та удосконалення дослідження, він є одним з інструментів забезпечення доброчесності наукових пошуків.

Метою роботи було довести, що застосування багатовимірного дисперсійного аналізу у медико-біологічних та екологічних дослідженнях є інструментом забезпечення доброчесності наукової діяльності.

Матеріали та методи дослідження

У роботі використані результати авторських досліджень (Kurhaluk et al., 2022; Lukash et al., 2024, 2025a, Tkaczenko et al., 2024) з метою ілюстрування переваг підходу MANOVA для циклічних даних у медико-біологічних та екологічних дослідженнях з позицій доброчесності. Застосований аналіз сучасних опублікованих робіт з проблеми використання статистичної обробки результатів наукових досліджень, а також використано загальнонаукові методи: абстрактно-логічний, індукції-дедукції та порівняння.

Результати дослідження та обговорення

Високоякісні результати у природничих та медичних науках базуються на доброчесно отриманих дослідницьких даних. Доброчесність є невід'ємною частиною життєвого циклу дослідницьких даних завдяки своїй критичній ролі в точності дослідження, відтворюваності, реплікації та повторному використанні даних (Condon et al., 2022). Доброчесність дослідницьких даних тісно пов'язана з управлінням даними, якістю даних та безпекою даних (рис. 1).

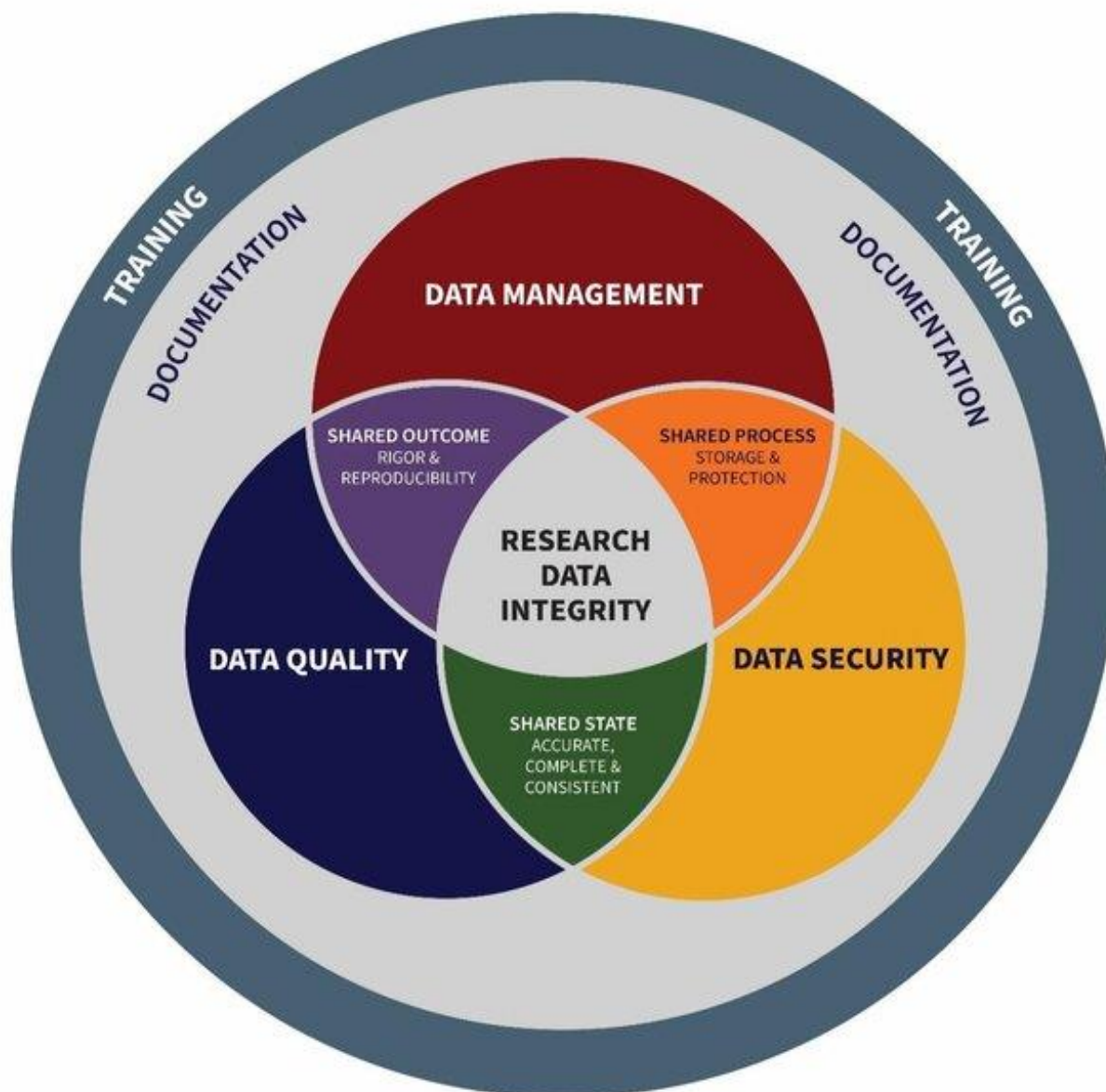


Рис 1. Концептуальна модель доброчесності дослідницьких даних. Візуальне представлення основних компонентів доброчесності дослідницьких даних, взаємодії між цими компонентами та фундаментальної ролі документації та навчання (Condon et al., 2022)

Збір даних, які є надійними, достовірними, валідними та безпечними протягом усього дослідницького процесу, вимагає цілеспрямованого планування доброчесності дослідницьких даних та ретельного врахування дій життєвого циклу дослідницьких даних, таких як збір, аналіз та збереження даних. Крім того, цілеспрямоване планування дозволяє дослідникам проводити ретельні дослідження та отримувати результати, які є відтворюваними, повторюваними та повторно використовуваними (Condon et al.,

2022). Вчені повинні мати можливість довіряти результатам досліджень своїх колег та спиратися на них. Diaba-Nuhoho & Amponsah-Offeh (2021), зазначаючи, що наукові інновації та дослідницькі відкриття, особливо в галузі медицини, сприяють покращенню життя пацієнтів та збільшенню тривалості життя наголошують на тому, що зростаюча стурбованість щодо недотримання належних наукових принципів призвела до проблем із доброчесністю та відтворюваністю досліджень. Погана відтворюваність та добро-

чесність, таким чином, можуть призвести до неефективних втручань та застосувань. Запобігти таким ситуаціям може застосування доречних методів статистики.

Розглянемо доречність застосування того чи іншого аналізу для вирішення ситуацій у медико-біологічних та екологічних дослідженнях, що включають статистичне порівняння більше двох груп, і часто з використанням даних, отриманих шляхом застосування складних експериментальних планів. Дисперсійний аналіз (ANOVA) у своїх численних формах використовується для одночасної перевірки рівності всіх груп у дослідженні. Однофакторний (з однією незалежною змінною), двофакторний (з двома незалежними змінними) та повторно-вимірковий (наприклад, пацієнти служать контролем) ANOVA є формами цієї методики. Кожна форма була розроблена для аналізу даних з певного експериментального плану. Коваріаційний аналіз (ANCOVA) дозволяє досліднику контролювати змінні, що впливають на реакцію залежної змінної. Нарешті, багатовимірний дисперсійний аналіз (MANOVA) оцінює одночасну реакцію кількох залежних змінних на ≥ 1 незалежну змінну (Lumivero, 2026). У той час як ANOVA є правильною альтернативою статистично невідповідним множинним t-тестам, MANOVA є правильною альтернативою статистично невідповідним множинним одновимірним розрахункам ANOVA. Використання кожного з цих статистичних методів вимагає відповідного експериментального плану та даних, що відповідають ряду припущень. При правильному використанні кожен із цих методів забезпечує потужний метод статистичного аналізу (Gaddis, 1998).

Наш досвід показує, що MANOVA покращує зменшує кількість хибнопозитивних результатів, так званих помилок I типу. Аналізуючи кілька залежних змінних одночасно, MANOVA допомагає запобігти кумулятивному збільшенню ризику помилок I типу порівняно з тим, коли для кожної змінної проводилися б окремі тести на значущість. Крім того, MANOVA підвищує статистичну ефективність, адже ефективніше виявляє справжні відмінності, оскільки враховує кореляції між залежними змінними, визначаючи справжні фактори, що діють, в рамках єдиної інтегрованої моделі. Наведемо два приклади.

Так, під час дослідження накопичення радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr домінантами та співдомінантами березово-соснових лісів на півночі України аналіз β -коефіцієнтів у MANOVA показав фактори (наприклад, ярус $\beta=2,601\pm 0,159$, $p=0,000$, вид рослин $\beta=-0,429\pm 0,151$, $p=0,005$, частина рослини $\beta=-2,456\pm 0,101$, $p=0,000$), які мали значний вплив на накопичення радіонуклідів у досліджуваних лісах (Lukash et al., 2024).

Як приклад, багатовимірні тести значущості були використані для аналізу даних з використанням T-коефіцієнта для оцінки відмінностей між середніми значеннями групи в MANOVA та F-теста для виявлення значущих відмінностей між трьома групами в межах складних наборів даних (фотоперіод, стать та рівень фізичної активності) під час аналізу сезонно-залежного компонента в оцінці морфологічних та біохімічних показників крові шотландських поні (Tkaczenko et al., 2024).

Крім того, MANOVA може виявити взаємодії між незалежними та залежними змінними, які були б пропущені в окремих аналізах, забезпечуючи повне уявлення про досліджувану систему. Так, аналіз дозволив з'ясувати, чи існують статистично значущі відмінності в концентраціях ^{90}Sr та ^{137}Cs між різними типами екосистем (наприклад, псамофітними, рудеральними, лучними та болотними) та відмінності в цих концентраціях у залежності від типу біоморфи або виду рослини у заплавах екосистемах Дніпра (Lukash et al., 2025a).

Дуже важливим аспектом доброчесності є забезпечення повної інтерпретації, що дозволяє формулювання обґрунтованих висновків. MANOVA дозволяє перевіряти гіпотези на єдиній інтегрованій моделі, зокрема розглядати кілька залежних змінних як уніфікований набір результатів, що дуже важливо для медико-біологічних досліджень. Як приклад, при виявленні залежних від фотоперіоду змін маркерів оксидативного стресу в крові MANOVA дозволив достовірно встановити, що фактор фотоперіоду відігравав провідну роль у змінах цих біомаркерів, тоді як фізичні навантаження та стать поні мали менший вплив (Kurhaluk et al., 2022). Крім того, ефективне використання MANOVA у дослідженнях громадського здоров'я дозволяє оцінити відмінності в результатах лікування різних груп населення та різних втручань

(Buderer & Brannan, 2024) з гарантією доброчесності клінічних випробувань.

Отже MANOVA пропонується для досліджень з кількома групами, що є типовими для досліджень результатів. Цей метод можна використовувати для великої кількості конкретних дослідницьких дизайнів (Cleophas & Zwinderman, 2012), коли збираються кілька показників результатів. Крім того, MANOVA пропонує дві конкретні переваги порівняно з більш звичними одновимірними підходами: він забезпечує кращий контроль над коефіцієнтами помилок першого типу, зберігаючи при цьому статистичну потужність, і дозволяє більш ретельно аналізувати складні дані (Spector, 1981.).

Однак MANOVA та пов'язані з ним процедури часто не розуміються належним чином. Це у своєму дослідженні ілюструє Warne (2014), підкреслюючи, що лише деякі з MANOVA, опублікованих у науковій літературі, супроводжувалися правильною процедурою *post hoc* – описовим дискримінантним аналізом (DDA). Warne (2014) наводить приклад простого MANOVA з реальними даними про психічне здоров'я 4384 підлітків, щоб показати, як інтерпретувати результати MANOVA.

Проблему недостатності повідомлень про статистичне програмне забезпечення, яке використовується для аналізу кількісних даних у публікаціях на прикладі наукових журналів з медсестринства піднімають

Hedlund & Lindberg (2024). Вони проаналізували статті, опубліковані у 2023 році у п'яти найвищих та п'яти найнижчих рейтингах журналів з медсестринства, і виявили, що в одному з 10 досліджень не повідомлялося про використане програмне забезпечення. Разом з тим найчастіше використовуваним дослідниками статистичним програмним забезпеченням було IBM SPSS Statistics. З точки зору підтримки доброчесності досліджень, це створює проблему, оскільки ставить під загрозу прозорість, щирість і, як наслідок, здатність відтворювати методи та мати впевненість у результатах (Hedlund & Lindberg, 2024).

Висновки

Багатовимірний дисперсійний аналіз підвищує доброчесність медико-біологічних та екологічних досліджень одночасно тестуючи кілька залежних змінних, що дозволяє контролювати рівень хибнопозитивних помилок в експерименті. Він є статистично ефективнішим, ніж виконання кількох окремих аналізів. MANOVA також дозволяє виявляти взаємодії між факторами, залежними та незалежними змінними, краще фіксуючи складність організації біологічних та екологічних систем. Це призводить до більш повних та надійних результатів, особливо при роботі з кількома пов'язаними медико-біологічними або екологічними вимірюваннями.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори Олександр Лукаш, Аніта Сікура та Ольга Мехед є членами редакційної колегії Biota. Human. Technology. Вони не брали участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийняття цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Authors Oleksandr Lukash, Anita Szikura, Olha Mekhed are the members of the editorial board of Biota. Human. Technology. They were not involved in the editorial decision-making, peer review, or acceptance process for this manuscript. The authors have no other conflicts of interest to note.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

- Armond, A. C. V., Cobey, K. D., & Moher, D. (2024). Research Integrity definitions and challenges. *Journal of clinical epidemiology*, 171, 111367. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2024.111367>
- Artyukhov, A., Krmela, J., Krmelova, V., Volk, I. (2021). Quality of Scientific Activity, Technology Transfer and Research Integrity: Case of Ukrainian University. *Business Ethics and Leadership*, 5(4), 101–109. [https://doi.org/10.21272/bel.5\(4\).101-109.2021](https://doi.org/10.21272/bel.5(4).101-109.2021)
- Buderer, N. M., & Brannan, G. D. (2024). Comparing the Means of Independent Groups: ANOVA, ANCOVA, MANOVA, and MANCOVA. In *StatPearls* (pp. 51–72). StatPearls Publishing. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39163457/>
- Cleophas, T. J., & Zwinderman, A. H. (2012). Multivariate Analysis of Variance (35 and 30 Patients). In *SPSS for Starters, Part 2* (pp. 13–19). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4804-0_4
- Condon, P., Simpson, J., & Emanuel, M. (2022). Research data integrity: A cornerstone of rigorous and reproducible research. *IASSIST Quarterly*, 46(3), 1–21. <https://doi.org/10.29173/iq1033>
- Damasio, E. (2024). Research Integrity and Publish or Perish: Definitions and Relations. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202304.0051.v2>
- Deykun, M. P., Lukash, O. V., & Mekhed, O. B. (2025). Methodological aspects of forming a safe and virtuous educational and scientific environment during the training of public health specialists. *Health & Education*, 3, 297–302. <https://doi.org/10.32782/health-2025.3.34>
Дейкун М. П., Лукаш О. В., Мехед О. Б. Методологічні аспекти формування безпечного та добросесного освітнього та наукового середовища під час підготовки фахівців громадського здоров'я. *Health & Education*. 2025. Вип. 3. С. 297–302. <https://doi.org/10.32782/health-2025.3.34>
- Diaba-Nuhoho, P., & Amponsah-Offeh, M. (2021). Reproducibility and research integrity: the role of scientists and institutions. *BMC Res Notes*, 14, 451. <https://doi.org/10.1186/s13104-021-05875-3>
- Gaddis, M. L. (1998). Statistical methodology: IV. Analysis of variance, analysis of covariance, and multivariate analysis of variance. *Academic emergency medicine : official journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, 5(3), 258–265. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.1998.tb02624.x>
- Haven, T., Gopalakrishna, G., Tjldink, J., van der Schot, D., & Bouter, L. (2022). Promoting trust in research and researchers: How open science and research integrity are intertwined. *BMC research notes*, 15(1), 302. <https://doi.org/10.1186/s13104-022-06169-y>
- Hedlund, Å., & Lindberg, M. (2024). A matter of research integrity: the reporting of statistical software used in studies published in nursing journals in 2023. *Learned publishing*, 37(4), e1622. <https://doi.org/10.1002/leap.1622>

- Kurhaluk, N., Lukash, O., & Tkachenko, H. (2022). Photoperiod-dependent changes in oxidative stress markers in the blood of Shetland pony mares and stallions involved in recreational horseback riding. *Chronobiology International*, 39(1), 1419–1434. <https://doi.org/10.1080/07420528.2022.2115922>
- Landler, L., Ruxton, G. D., & Malkemper, E. P. (2018). Circular data in biology: advice for effectively implementing statistical procedures. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 72, 128. <https://doi.org/10.1007/s00265-018-2538-y>
- Landler, L., Ruxton, G. D., & Malkemper, E. P. (2022). The multivariate analysis of variance as a powerful approach for circular data. *Movement ecology*, 10(1):21. <https://doi.org/10.1186/s40462-022-00323-8>
- Li, D., Mach, L.T. & Cornelis, G. (2025). Aligning Scientific Values and Research Integrity: A Study of Researchers' Perceptions and Practices in Four Countries. *Science and Engineering Ethics*, 31, 15. <https://doi.org/10.1007/s11948-025-00539-y>
- Lukash, O., Tkachenko, H., Szikura, A., Mekhed, O. & Kurkhalyuk, N. (2025). The problem of integrity of modern medical and environmental research. *Biota. Human. Technology*, 3, 231–237. <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.21>
Лукаш О., Ткаченко Г., Сікура А., Мехед О., Кургалюк Н. Проблема доброчесності сучасних біомедичних та екологічних досліджень. *Biota. Human. Technology*. 2025. No 3. С. 231–237. <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.21>
- Lukash, O., Tkaczenko, H., Yakovenko, O., Szikura, A., & Kurhaluk, N. (2024). Accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides by dominants and co-dominants of birch-pine forest communities in Northern Ukraine. *iForest*, 17(6), 386–393. <https://doi.org/10.3832/ifor4577-017>
- Lukash, O., Yakovenko, O., Miroshnyk, I., Tkaczenko, H., Szikura, A., Strilets, S., & Kurhaluk, N. (2025a). Assessment of radioisotope concentrations of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the herbaceous phytocenoses plants of the Dnieper river floodplain ecosystems (northern Ukraine). *Journal of Hazardous Materials*, 494, 138406. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138406>
- Lumivero (2026). Multivariate Analysis of Variance (MANOVA). XLSTAT by Lumivero. <https://www.xlstat.com/solutions/features/multivariate-analysis-of-variance-manova>
- Miller, G., & Spiegel, E. (2025). Guidelines for research data integrity (GRDI). *Scientific Data*, 12, 95. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04312-x>
- Muthanna, A., Chaaban, Y., & Qadhi, S. (2024). A model of the interrelationship between research ethics and research integrity. *International Journal of Qualitative Studies on Health and Well-Being*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/17482631.2023.2295151>
- Spector, P. E. (1981). Multivariate data analysis for outcome studies. *American journal of community psychology*, 9(1), 45–53. <https://doi.org/10.1007/BF00896359>
- Tkaczenko, H., Lukash, O., & Kurhaluk, N. (2024). Analysis of the season-dependent component in the evaluation of morphological and biochemical blood parameters in Shetland ponies of both sexes during exercise. *Journal of veterinary research*, 68(1), 155–166. <https://doi.org/10.2478/jvetres-2024-0017>
- Vardeman, S. B., & Morris, M. D. (2003). Statistics and Ethics: Some Advice for Young Statisticians. *The American Statistician*, 57(1), 21–26. <https://doi.org/10.1198/0003130031072>
- Warne, R., (2014) A Primer on Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) for Behavioral Scientists. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 19(1), 17. <https://doi.org/10.7275/sm63-7h70>

Zhaao, L., Lia, Y., Fenga, Y., Zhanga, H., & Zhanga, M. (2022). Research on the influencing factors of scientific researchers' integrity based on grounded theory. *Procedia Computer Science*, 214, 1467–1475. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.332>

Received: 18.01.2026. **Accepted:** 11.02.2026. **Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Лукаш О., Сікура А., Мехед О., Стрілець С. MANOVA як інструмент забезпечення доброчесності медико-біологічних та екологічних досліджень. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 226-234. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.19>

Cite this article in APA style as:

Lukash, O., Szikura, A., Mekhed, O., & Strilets, S. (2026). MANOVA yak instrument zabezpechennia dobrochesnosti medyko-biologichnykh ta ekolohichnykh doslidzhen [MANOVA as a tool for ensuring the integrity of bio-medical and environmental research]. *Biota. Human. Technology*, (1), 226-234. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.19> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Lukash O. [in Ukrainian: **Лукаш О.**] ¹, Dr. of Biol. Sc., Prof., email: lukash2011@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2702-6430 Scopus-Author ID: 57202369398

Department of Ecology, Geography and Nature Management, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium" 53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Szikura A. [in Ukrainian: **Сікура А.**] ², Cand. Sc. (Biol.), Prof., email: szikura.anita@kmf.org.ua

ORCID: 0000-0002-6474-4821

Department of Biology and Chemistry, Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University 6 Education Kossuth Square, 90202, Berehove, Transcarpathia, Ukraine

Mekhed O. [in Ukrainian: **Мехед О.**] ³, Cand.Sc. (Biol.), D.Sc. (Pedagogics), Prof., email: mekhedolga@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9485-9139 Scopus Author ID: 6506181994

Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium" 53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Strilets S. [in Ukrainian: **Стрілець С.**] ⁴, D.Sc. (Pedagogics), Prof., email: sv.strilets@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2854-9188 Scopus Author ID: 57219441731

Faculty of Preschool, Primary Education and Arts, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium" 53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

¹ Study design, manuscript preparation.

² Manuscript preparation, data collection.

³ Manuscript preparation, data collection.

⁴ Manuscript preparation, data collection.



INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ



INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The article is presented in the original language (Ukrainian, Polish, English). The deadline for submitting articles is determined by the person responsible for the issue. On average, the period of publication of articles from the moment of receipt is 4 months, unless unforeseen circumstances arise.

The article must necessarily contain the following elements: statement of the problem in general form and its connection with important scientific or practical tasks; analysis of the main researches and publications on the raised problem; formulation of the purpose of the article; coverage of the theoretical-methodological and/or experimental research procedure with an indication of research methods; presentation of the main research material with justification of the obtained scientific results; research conclusions and prospects for further scientific research.

The text of the article must be carefully checked and edited by the author. An article that is not designed according to the requirements, with semantic, grammatical or stylistic errors, will not be accepted for publication. **When designing an article, be sure to use [the article template](#).**

Using the article template (BHT styles):

1. Open the article template in Microsoft Word.

All the necessary formatting styles are already built into the document and begin with the BNT mark (for example, *BHT-Heading 1 row*, *BHT-Authors 1 row*, *BHT-Article text*, etc.).

2. Enable the styles panel:

- On the “Home” tab, click the arrow in the lower right corner of the “Styles” block - a list of available styles will open.

- If necessary, select “Manage Styles” or “Show All Styles” to see the full list.

3. Apply appropriate styles to each text element:

- BHT-Title – for the title of the article
- BHT-Authors – for the list of authors
- BHT-Abstract, BHT Keywords – for the relevant sections
- BHT-Article sections – for sections and subsections
- BHT-Article text – for the main text of the article
- BHT-Figure / table caption – for captions
- BHT-References English or Ukrainian – for the list of references
- etc.

4. Do not manually change the font size, indents or spacing – all parameters are already set in the template through styles.

WARNING! It is not allowed to use data that was presented in protected dissertation studies, as well as previously published articles.

The approximate length of the article is 10–16 pages of A4 format.

Structure of the article:

1. UDC index, with a paragraph indent, in the upper left corner of the first page.

2. The next line is the name and surname of the author(s) in English. Authorship should be based on the following criteria:

- **Significant contribution** to the conception, design, data collection, or analysis and interpretation of the results of the study.
- **Participation in writing the manuscript** or critical revision of its intellectual content.
- **Approval of the final version** for publication.

Individuals who do not meet these criteria may be listed in the Acknowledgements section.

3. The next line is the title of the article in English, Ukrainian and Polish (if the article is written in Polish) or in English and Ukrainian (if the article is written in Ukrainian), in capital letters, without paragraph indent, centered. The title should be short (no more than 8 words) and reflect the content of the article.

4. The next line is the abstract in English, Polish (if the article is written in Polish) and Ukrainian (with the word “**ABSTRACT**” in the appropriate language, in the center; the text of the abstract is paragraph indented, aligned with the width of the text, single line spacing). The length is **at least 1800, but no more than 2200 characters with spaces**. The abstract should contain the following structural elements highlighted in bold text: **purpose of the work, methodology, scientific novelty, conclusions**.

5. The next line is key words (the phrase “Key words” in bold, paragraph indented, aligned to the width of the text, single line spacing). No more than five keywords.

6. Through the line – the main text of the article according to the structural elements: **statement of the problem, research results, conclusions**.

7. The text of the article should include references to all references. The editorial board strongly recommends that authors avoid using outdated and undigitized references. To do this, we recommend that authors **conduct comprehensive and up-to-date searches** in global bibliographic databases such as Scopus, Web of Science, PubMed, and others, depending on the topic of the research.

References are given in round brackets with the name(s) of the author(s) in chronological order, for example:

one author – Lukash, 2019;

two authors – Tkachuk & Zelena, 2020;

three authors and more – Kurmakova et al., 2021.

Publications without authors are cited in accordance with [APA style](#).

8. The following information is provided after the main text of the article:

Funding: Provide one of two statements: no external funding or details of a grant received. Make sure you spell the names of funding institutions correctly by checking them on an official resource. Mistakes can make it difficult to obtain funding in the future.

Ethical approval: This section is required to document the ethical approval of the study. For work with humans, indicate compliance with the Declaration of Helsinki and approval by an ethics committee. For animal studies, provide information about protocol approval. If ethical approval is not required, justify this or indicate “Not applicable”.

Informed Consent Statement: This section is required for studies involving human subjects. Confirm that consent was obtained from participants or explain its absence. This is especially important in cases where participants are identifiable – written consent for publication is required.

Data access: Describe where the data from your study can be found. Provide links to data archives. Even if no new data were created or there are access restrictions, this should be noted. For more information, see the following guidelines:

Data availability status	Recommended Data Availability Statement
Open access in repository	All primary data from the study are freely available in [repository] at [identifier].
Restricted access upon request	Due to [reason for restriction], data can be obtained by contacting the corresponding author.
Data from third-party organizations	Access is restricted by proprietary rights. Data provided by [organization] and available under [access terms] with their permission.
Temporary restriction for commercialization	After the commercialization period, data will be available in [repository] at [identifier].
Special access conditions	Due to [specific reason, e.g., data is part of an ongoing study or due to technical/time constraints], direct access to the data is restricted. For access, please contact [contact].
Open source data	Data used are available in [repository], [identifier]. Data sources: [list of public resources].
No new data	The study did not generate new data, it is based on theoretical analysis.
Data in the publication	All data are presented directly in the article and appendices. For additional information, please contact the authors.
Data on request	The authors will provide the original data of the study upon request of interested parties.

Acknowledgements: A place to acknowledge assistance that is not included in the author's contribution or funding – administrative support, technical assistance, materials provided, etc.

Conflict of interest: Authors should disclose any financial or personal relationships that may affect the objectivity of their research. This includes:

Funding: grants, sponsorships, or other forms of financial support.

Employment/employment: work for organizations that may have an interest in the publication.

Financial interests: ownership of stocks, patents, or receipt of royalties.

Non-financial interests: personal or professional relationships that may influence the research.

Clearly state whether or not there are conflicts of interest. Describe any influence of sponsors on the conduct of the research and the publication of the results. If there is no such influence, state this separately by stating "The authors declare no conflict of interest." Disclosure of conflicts of interest is intended to provide transparency and allows readers to independently assess the possible influence. Authors who are Editor-in-Chief/Editor/Editorial board members should note: **Authors X are members of the editorial board of Biota. Human. Technology. They were not involved in**

the editorial decision-making, review, or acceptance of this manuscript. The authors have no other conflicts of interest to disclose.

The use of generative AI: The use of generative AI and AI-assisted technologies in scientific writing must be transparently declared. Authors should include a statement at the end of the manuscript at the time of initial submission. This statement will appear in the final published work, placed in a designated section (**Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process**) before the references list. An example of the required statement is as follows:

During the preparation of this manuscript, the author(s) utilized [NAME OF TOOL / SERVICE] to [PURPOSE OF USE]. Following the application of this tool/service, the author(s) thoroughly reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the final published version.

Or

This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

9. The article continues with a list of references. It should contain only those sources to which reference is made in the text. The word **“References”** is written aligned. References are presented in alphabetical order using the Latin alphabet. References that are originally written in languages using the Latin script are presented in the original language, formatted according to [APA style](#) indicating the language of publication in round brackets. References, which are written in the original language with Cyrillic writing, are presented in two paragraphs as follows: first, the translation into English (not transliteration!), formatted according to [APA style](#), and in the second paragraph – in the original language according to [DSTU 8302:2015. Bibliographic reference. General provisions and rules of compilation](#)

For example:

Tkachuk, N. V., & Zelena, L. B. (2022). Biosafety in the formation of professional competences of bachelors from the courses “Microbiology and virology with the basics of immunology” and “Genetics”. *Environmental sciences*, 2(41), 41-145. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.24> (in Ukrainian)

Ткачук Н. В., Зелена Л. Б. Біобезпека при формуванні фахових компетенцій бакалаврів з курсів «Мікробіологія і вірусологія з основами імунології» та «Генетика». *Екологічні науки*. 2022. №2(41). С. 141-145. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.24>

10. Tables, schemes, figures and diagrams presented in the article must be the author's own or reproduced from freely available sources that do not require special permission for use. In case of using materials from other sources, a clear reference to the original source is mandatory in accordance with the requirements of the bibliographic design of the journal. The use of tables, schemes, figures or diagrams from sources for which permission from the copyright holder (publisher or author) must be requested is not allowed. Authors are responsible for compliance with copyright and correctness of references. Tables, schemes, figures, diagrams must be numbered and placed without a paragraph in the center of the page immediately after the reference to them in the text of the article or on the next page. The word “Table” and its number are written on top aligned to the right, and the name of the table is aligned in the center on the line below. Illustrations (figures, block diagrams, graphs) must be made in one of the graphic editors. Figures can be submitted in color. Flow charts and figures (must be grouped) are additionally provided as separate files in electronic form. Illustrations are signed from the bottom aligned with the center.

11. Formulas and letter designations of quantities are typed in the MathType-Equation editor and presented in text or a separate line without paragraph indent, aligned with the center, numbered with Arabic numerals in round brackets on the right side of the page.

12. The following signs are used in the text of the article: quotation marks (“ ”), apostrophe (’), a dash (-) instead of a hyphen (-). A colon (:) is placed without a space.

13. Words, phrases and sentences in the Latin language in the article are highlighted in italics, regardless of the language of the article.

Examples:

... the plant extract was carried out *in vitro* by the Kirby-Bauer disc...

... are important *in vivo* biomarkers for biomonitoring...

Taxa (all) and syntaxa of vegetation are given only in Latin and highlighted in italics. The author(s) of the taxon or syntaxon should be indicated in normal font at the first mention in each structural part of the article (title, abstracts and keywords in any language, the actual text (body) of the article), as well as captions to tables and figures.

If species belonging to one genus are mentioned in the article, and between these mentions there are no mentions of species of other genera, then after the first writing of the full species name, the name of the species should be given further in the text, shortening the name of the genus to the first letter with a dot. This rule applies within any structural part of the article, as well as captions to tables and figures.

An example of writing the Latin names of taxa and syn taxa in one article:

PLATANUS L. GENUS IN TRANSCARPATIA

РІД *PLATANUS* L. НА ЗАКАРПАТТІ

Abstract

... the coexistence of other *Platanus* L. species... *Picea abies* (L.) Karst.

... the study of the genus *Platanus* in the ... as *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. is a...

... the genus *Platanus* in Transcarpathia will.... *Picea abies*...

The spruce forest communities of the Dnieper part of Eastern Polesie belong to the *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 and *Querco-Piceetum* (Matuszkiewicz 1952) Matuszkiewicz et Polakowska 1955 associations of the *Piceion excelsae* Pawłowski et al. 1928 alliance of the *Piceetalia excelsae* Pawłowski et al. 1928 order of the *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 class.

The natural spruce forest of the *Querco-Piceetum* association...

Key words: introduced plants, *Picea abies* (L.) Karst., *Platanus* L., Transcarpathia

Анотація

... міжвидових гібридів роду *Platanus* L. ...is *Picea abies* (L.) Karst.

... гібриди роду *Platanus* ... *Picea abies*...

... належить до виду *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. і має статусу...

Угрупування ялинових лісів придніпровської частини Східного Полісся належать до асоціацій *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 та *Quercu-Piceetum* (Matuszkiewicz 1952) Matuszkiewicz et Polakowska 1955 з союзу *Piceion excelsae* Pawłowski et al. 1928 порядку *Piceetalia excelsae* Pawłowski et al. 1928 класу *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939.

Природний ялиник асоціації *Quercu-Piceetum*...

Ключові слова: Закарпаття, рослини-інтродуценти, *Picea abies* (L.) Karst., *Platanus* L.

Formulation of the problem

In ... two primary progenitors: *Platanus orientalis* L. and *P. occidentalis* L. Additionally, there are several natural hybrid species, including the *P. acerifolia* (Aiton) Willd., *P. cuneate* Willd., *P. digitata* Gord., *P. hispanica* Münchh. and others.

Results and discussion

P. occidentalis also known simply as "sycamore", ..., *Ficus sycómorus* L., which is ... and even the *Acer pseudoplatanus* L....

...*Platanus orientalis* along with...

Fig. 1: *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd (photo by Ivan Dzurenko)

...*P. occidentalis* is notably affected by the fungus *Gloeosporium nervisequum* (Fuckel) Sacc....

... *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 association...

Table. Structure of the *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 association

...*Eu-Piceetum* is formed in an ecotone area ...

... both *Platanus occidentalis* and *P. acerifolia* grew...

... phytocenoses of the *Epilobietea angustifolii* Tx. et Preising ex von Rochow 1951 and *Robinietaea* Jurko ex Hadač et Sofron 1980 classes are formed...

Conclusions

... Among these species is *P. acerifolia*.

..., phytocenoses of the *Epilobietea angustifolii* class is...

14. After References, information about each author is provided **in English:**

•First line – **Surname, Name** [*in Ukrainian: Прізвище Ім'я*] ¹[\[i\]](#), position, scientific degree and academic title (if available), e-mail.

•The next line is the mandatory ORCID of the author (the profile must be filled and open for public viewing).

•The next line is the author's ResearcherID (if available), the author's Scopus-AuthorID (if available).

▪The next line is an indication of the organization in which the author works.

▪The next line is a mandatory indication of the full address of the organization where the author works, indicating the index and country.

15. At the end of the page, the date it was sent to the editorial office of the journal is indicated.

The article is accompanied by a list of 2-3 potential reviewers (PhD and/or Doctors of Sciences who carry out research in a specialty that corresponds to the topic of the material submitted for publication, and are authors (co-authors) of a total of at least three publications in scientific publications included in category "A" and/or category "B" of the List of scientific specialized publications of Ukraine, and /or in foreign publications indexed in the Web of Science Core Collection and/or Scopus databases for the relevant specialty, published within the last five years) with an indication of their place of work, scientific interests, ORCID and Google Scholar, e-mail.

Submission, publication and access to published articles are free.

The text of the article and additional materials should be sent by e-mail to the address lukash2011@ukr.net or bhtjournal.nuchc@gmail (indicate the author's last name in the letter).

EDITORS OF THE JORNAL ARE NOT RESPONSIBLE FOR THE CONTENT OF THE ARTICLES AND MAY NOT SHARE THE OPINION OF THE AUTHOR!

Appeals and complaints

In case of disagreement with the editorial decision, authors have the right to file an appeal. To do this, a written justification must be sent to the editor-in-chief. The appeal will be considered by the editorial board, and the decision based on the results of the review is final.

Corrections and withdrawal of articles

If significant errors or ethical violations are found in a published article, the journal may:

- Publish a correction** (erratum) in the case of minor errors that do not affect the main results.
- Withdraw the article** in the case of serious violations, such as plagiarism or falsification of data.

The withdrawal procedure involves publishing an appropriate notice and marking the article as withdrawn in all versions.

Research reporting standards

Authors must adhere to internationally recognized reporting standards, such as CONSORT ([Consolidated Standarts of Reporting Trials](#)) for randomized trials, PRISMA ([Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses](#)) for systematic reviews, and others, depending on the type of study. This will ensure transparency and reproducibility of results.

[i]¹ Indicate the contribution of the corresponding (1 – first, 2 – second, etc.) author to the publication choosing from the list: Conceptualization; Methodology; Software; Validation; Formal analysis; Investigation; Resources; Data Curation; Writing - Original Draft; Writing - Review & Editing; Visualization; Supervision; Project administration; Funding acquisition; Other roles (please specify contribution).

КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ

Стаття подається мовою оригіналу (українською, польською, англійською). Терміни подачі статей визначається відповідальним за випуск. В середньому термін публікації статей з моменту надходження становить 4 місяці, якщо не виникнуть непередбачені обставини.

Стаття обов'язково повинна містити такі елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; аналіз основних досліджень і публікацій з порушеної проблеми; формулювання мети статті; висвітлення процедури теоретико-методологічного та/або експериментального дослідження із зазначенням методів дослідження; виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з дослідження і перспективи подальших наукових розвідок.

Текст статті має бути ретельно перевірений і відредагований автором. Стаття, не оформлена згідно з вимогами, зі смисловими, граматичними чи стилістичними помилками, до друку не приймається. **При оформленні статті обов'язково використовуйте [шаблон статті](#).** Використання шаблону статті (стилі ВНТ):

1. Відкрийте шаблон статті у Microsoft Word.

Усі потрібні стилі форматування вже вбудовані в документ і починаються з позначки ВНТ (наприклад, *ВНТ-Заголовок 1 ряд*, *ВНТ-Автори 1 ряд*, *ВНТ-Текст статті* тощо).

2. Увімкніть панель стилів:

- На вкладці «Основне» (Home) натисніть стрілочку у правому нижньому куті блоку «Стилі» – відкриється список доступних стилів.
- За потреби виберіть «Керування стилями» або «Показати всі стилі», щоб бачити повний перелік.

3. Застосовуйте відповідні стилі до кожного елемента тексту:

- ВНТ-Заголовок – для назви статті
- ВНТ-Автори – для списку авторів
- ВНТ-Анотація, ВНТ Ключові слова – для відповідних розділів
- ВНТ-Розділи статті – для розділів і підрозділів
- ВНТ-Текст статті – для основного тексту статті
- ВНТ-Підпис рисунка / таблиці – для підписів
- ВНТ-Список літератури англ. чи укр. – для списку літератури
- тощо

4. Не змінюйте вручну розмір шрифту, відступи чи інтервали - усі параметри вже задані в шаблоні через стилі.

УВАГА! Не допускається використання даних, які було представлено у захищених дисертаційних дослідженнях, а також опублікованих раніше статтях.

Орієнтовний обсяг статті – 10–16 сторінок формату А4.

Структура статті:

1. Індекс УДК, з абзацним відступом, у верхньому лівому куті першої сторінки.

2. Наступний рядок – ім'я та прізвище автора (авторів) англійською мовою. Авторство повинно ґрунтуватися на таких критеріях:

- **Значний внесок** у концепцію, дизайн, збір даних або аналіз та інтерпретацію результатів дослідження.
- **Участь у написанні рукопису** або критичний перегляд його інтелектуального змісту.
- **Затвердження остаточної версії** для публікації.

Особи, які не відповідають цим критеріям, можуть бути перелічені в розділі «Подяки».

3. Наступний рядок – назва статті англійською, українською та польською (якщо стаття написана польською мовою) або англійською та українською (якщо стаття написана українською мовою), великими буквами, без абзацного відступу, вирівняно центром. Назва має бути короткою (не більше 8 слів) і відображати зміст статті.

4. Наступний рядок – анотація англійською, польською (якщо стаття написана польською) та українською мовами (із зазначенням слова «**АНОТАЦІЯ**» відповідною мовою, по центру; текст анотації з абзацним відступом, вирівняно шириною тексту, інтервал між рядками одинарний). Обсяг – **не менше 1800, але не більше 2200 символів з пробілами**. Анотація повинна містити виділені жирним текстом наступні структурні елементи: **мета роботи, методологія, наукова новизна, висновки**.

5. Наступний рядок – ключові слова (словосполучення «Ключові слова» напівжирним шрифтом, абзацний відступ, вирівняно шириною тексту, інтервал між рядками одинарний). Не більше п'яти ключових слів.

6. Через рядок – основний текст статті відповідно до структурних елементів: **постановка проблеми, результати дослідження, висновки**.

7. У тексті статті мають бути посилання на всі джерела у списку літератури. Редакція наполегливо рекомендує авторам уникати використання застарілих та неоцифрованих посилань. Для цього рекомендуємо авторам **проводити комплексні та актуальні пошуки** в глобальних бібліографічних базах даних, таких як Scopus, Web of Science, PubMed та інші, залежно від тематики дослідження.

Посилання на літературні джерела подаються у круглих дужках з вказанням прізвищ(а) автора(ів) у хронологічному порядку, наприклад:

один автор – Lukash, 2019;

два автори – Tkachuk & Zelena, 2020;

три автори та більше – Kurmakova et al., 2021.

Посилання на видання без авторів здійснюється відповідно до правил [APA стилю](#).

8. Після основного тексту статті подається наступна інформація:

Фінансування: Вкажіть одне з двох тверджень: відсутність зовнішнього фінансування або деталі про отриманий грант. Переконайтеся у правильності написання назв фінансових установ, перевіривши їх на офіційному ресурсі. Помилки можуть ускладнити отримання фінансування в майбутньому.

Етичне схвалення: Цей розділ потрібен для документування етичного схвалення дослідження. Для робіт з людьми вкажіть відповідність Гельсінській декларації та схвалення етичного комітету. Для досліджень на тваринах надайте інформацію про схвалення

протоколу. Якщо етичне схвалення не потрібне, обґрунтуйте це або вкажіть «Не застосовується».

Інформована згода: Обов'язковий розділ для досліджень за участю людей. Підтвердіть отримання згоди від учасників або поясніть її відсутність. Особливо важливо для випадків, коли учасників можна ідентифікувати – потрібна письмова згода на публікацію.

Доступ до даних: Опишіть, де можна знайти дані вашого дослідження. Надайте посилання на архіви даних. Навіть якщо нові дані не створювались або є обмеження доступу, потрібно це зазначити. Детальніше дивіться у наступних вказівках:

Статус доступності даних	Рекомендована заява про доступність даних
Відкритий доступ у репозиторії	Усі первинні дані дослідження знаходяться у вільному доступі в [репозиторій] за посиланням [ідентифікатор].
Обмежений доступ за запитом	Через [причина обмеження] дані можна отримати, звернувшись до відповідального автора.
Дані від сторонніх організацій	Доступ обмежений правами власності. Дані надані [організація] і доступні [умови доступу] за їхнім дозволом.
Тимчасове обмеження для комерціалізації	Після завершення періоду комерціалізації дані стануть доступними в [репозиторій] за посиланням [ідентифікатор].
Особливі умови доступу	Через [конкретна причина, наприклад, дані є частиною поточного дослідження або через технічні/часові обмеження] прямий доступ до даних обмежений. Для отримання доступу звертайтеся до [контакт].
Дані з відкритих джерел	Використані дані доступні в [репозиторій], [ідентифікатор]. Джерела даних: [список публічних ресурсів].
Відсутність нових даних	Дослідження не створювало нових даних, базується на теоретичному аналізі.
Дані у складі публікації	Усі дані представлені безпосередньо в статті та додатках. За додатковою інформацією звертайтеся до авторів.
Дані за запитом	Первинні дані дослідження автори нададуть на запит зацікавлених осіб.

Подяки: Місце для визнання допомоги, що не входить до авторського внеску чи фінансування – адміністративна підтримка, технічна допомога, надані матеріали тощо.

Конфлікт інтересів: автори повинні розкривати будь-які фінансові чи особисті зв'язки, які можуть вплинути на об'єктивність їхнього дослідження. Це включає:

- **Фінансування:** гранти, спонсорство або інші форми фінансової підтримки.
- **Зайнятість/працевлаштування:** робота в організаціях, які можуть мати інтерес у публікації.
- **Фінансові інтереси:** володіння акціями, патентами або отримання гонорарів.
- **Нефінансові інтереси:** особисті або професійні відносини, які можуть вплинути на дослідження.

Чітко заявіть про наявність або відсутність конфліктів інтересів. Опишіть будь-який вплив спонсорів на проведення дослідження та публікацію результатів. За відсутності такого впливу, вкажіть це окремо, зазначивши «Автори заявляють про відсутність конфлікту

інтересів». Розкриття конфлікту інтересів спрямоване на забезпечення прозорості та дозволяє читачам самостійно оцінити можливий вплив. Авторам, які є головним редактором/редактором/членом редколегії слід зазначити: **Автори X є членами редакційної колегії Biota. Human. Technology. Вони не брали участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийняття цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити.**

Використання генеративного ШІ: Використання генеративного штучного інтелекту та технологій за допомогою штучного інтелекту в наукових роботах має бути прозоро декларовано. Автори повинні включити заяву в кінці рукопису під час першого подання. Це твердження з'явиться в остаточній опублікованій роботі, розміщеній у спеціальному розділі (**Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання**) перед списком літератури. Приклад необхідної заяви виглядає наступним чином:

Під час підготовки цього рукопису автор (автори) використовував (використовували) [НАЗВА ІНСТРУМЕНТА/СЕРВІСУ] для [МЕТИ ВИКОРИСТАННЯ]. Після використання цього інструменту/сервісу автор(и) ретельно переглянули та відредагували вміст за потреби та несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію.

Або

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних.

9. Далі подається список літератури. У ньому мають бути лише ті джерела, на які зроблено посилання у тексті. Слово «**References**» пишеться вирівняно. Список посилань на джерела інформації подається у алфавітній послідовності за латиницею. Джерела, які в оригіналі написані мовами, де використовується латинський шрифт, подаються мовою оригіналу, оформленому за [APA стилем](#). Джерела, які написані у оригіналу мовою з кириличним написанням, подаються двома абзацами таким чином: спочатку переклад англійською мовою (не транслітерація!), оформлений за [APA стилем](#) із зазначенням мови видання у круглих дужках, а у другому абзаці – мовою оригіналу за [ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання](#).

Наприклад:

Tkachuk, N. V., & Zelena, L. B. (2022). Biosafety in the formation of professional competences of bachelors from the courses "Microbiology and virology with the basics of immunology" and "Genetics". *Environmental sciences*, 2(41), 41-145. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.24> (in Ukrainian)

Ткачук Н.В., Зелена Л.Б. Біобезпека при формуванні фахових компетенцій бакалаврів з курсів «Мікробіологія і вірусологія з основами імунології» та «Генетика». *Екологічні науки*. 2022. №2(41). С.141-145. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.24>

10. Таблиці, схеми, рисунки та діаграми, подані у статті, мають бути авторськими або такими, що відтворені з вільнодоступних джерел, які не потребують отримання спеціального дозволу на використання. У разі використання матеріалів з інших джерел обов'язковим є чітке посилання на першоджерело відповідно до вимог бібліографічного оформлення журналу. Використання таблиць, схем, рисунків чи діаграм із джерел, для яких необхідно запитувати дозвіл правовласника (видавця або автора), не допускається. Автори несуть

відповідальність за дотримання авторських прав та коректність посилань. Таблиці, схеми, рисунки, діаграми повинні бути пронумеровані та розміщуються без абзацу в центрі сторінки безпосередньо після посилання на них у тексті статті або на наступній сторінці. Слово «Таблиця» та її номер пишуться зверху вирівняно справа, а рядком нижче вирівняно центром – назва таблиці. Ілюстрації (рисунки, блок-схеми, графіки) повинні бути виконані в одному з графічних редакторів. Рисунки можна подавати кольоровими. Блок-схеми та рисунки (повинні бути згруповані) додатково подаються окремими файлами в електронному вигляді. Ілюстрації підписуються знизу вирівняно центром.

11. Формули та буквені позначення величин набираються у редакторі MathType-Equation і подаються в тексті або окремому рядку без абзацного відступу вирівняно центром, нумеруються арабськими цифрами в круглих дужках з правого боку сторінки.

12. У тексті статті вживаються такі знаки: лапки – (« »), апостроф – (’), через пробіл тире (–), а не дефіс (-). Двокрапка (:) ставиться без пробілу.

13. Слова, словосполучення та речення латинською мовою у статті виділяють курсивом, незалежно від мови написання статті.

Приклади:

... the plant extract was carried out *in vitro* by the Kirby-Bauer disc...

... є важливими біомаркерами *in vivo* для біомоніторингу...

Таксони (усі) та синтаксони рослинності наводять лише латинською мовою і виділяють курсивом. Звичайним шрифтом слід наводити автора(-ів) таксону чи синтаксону за першого згадування у кожній структурній частині статті (назві, анотаціях та ключових словах будь-якою мовою, власне тексті (тілі) статті), а також підписах до таблиць та рисунків.

Якщо у статті згадуються види, які належать до одного роду, і між цими згадуваннями немає згадувань видів інших родів, то після першого написання повної видової назви далі у тексті назву виду слід подавати, скорочуючи назву роду до першої літери з крапкою. Це правило застосовується у межах будь-якої структурної частини статті, а також підписів до таблиць та рисунків.

Приклад написання латинських назв таксонів і син таксонів у одній статті:

PLATANUS L. GENUS IN TRANSCARPATIA

РІД *PLATANUS* L. НА ЗАКАРПАТТІ

Abstract

... the coexistence of other *Platanus* L. species... *Picea abies* (L.) Karst.

... the study of the genus *Platanus* in the ... as *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. is a...

... the genus *Platanus* in Transcarpathia will.... *Picea abies*...

The spruce forest communities of the Dnieper part of Eastern Polesie belong to the *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 and *Quercu-Piceetum* (Matuszkiewicz 1952) Matuszkiewicz et Polakowska 1955 associations of the *Piceion excelsae* Pawłowski et al. 1928 alliance of the *Piceetalia excelsae* Pawłowski et al. 1928 order of the *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 class.

The natural spruce forest of the *Quercu-Piceetum* association...

Key words: introduced plants, *Picea abies* (L.) Karst., *Platanus* L., Transcarpathia

Анотація

... міжвидових гібридів роду *Platanus* L. ...is *Picea abies* (L.) Karst.

... гібриди роду *Platanus* ... *Picea abies*...

... належить до виду *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd. і має статусу...

Угрупування ялинових лісів придніпровської частини Східного Полісся належать до асоціацій *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 та *Quercu-Piceetum* (Matuszkiewicz 1952) Matuszkiewicz et Polakowska 1955 з союзу *Piceion excelsae* Pawłowski et al. 1928 порядку *Piceetalia excelsae* Pawłowski et al. 1928 класу *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939.

Природний ялинник асоціації *Quercu-Piceetum*...

Ключові слова: Закарпаття, рослини-інтродуценти, *Picea abies* (L.) Karst., *Platanus* L.

Formulation of the problem

In ... two primary progenitors: *Platanus orientalis* L. and *P. occidentalis* L. Additionally, there are several natural hybrid species, including the *P. acerifolia* (Aiton) Willd., *P. cuneata* Willd., *P. digitata* Gord., *P. hispanica* Münchh. and others.

Results and discussion

P. occidentalis also known simply as “sycamore”, ..., *Ficus sycómorus* L., which is ... and even the *Acer pseudoplatanus* L....

...*Platanus orientalis* along with...

Fig. 1: *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd (photo by Ivan Dzurenko)

...*P. occidentalis* is notably affected by the fungus *Gloeosporium nervisequum* (Fuckel) Sacc....

... *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 association...

Table. Structure of the *Eu-Piceetum* (Cajander 1921) Keilland-Lund 1967 association

...*Eu-Piceetum* is formed in an ecotone area ...

... both *Platanus occidentalis* and *P. acerifolia* grew...

... phytocenoses of the *Epilobietea angustifolii* Tx. et Preising ex von Rochow 1951 and *Robinietae* Jurko ex Hadač et Sofron 1980 classes are formed...

Conclusions

... Among these species is *P. acerifolia*.

..., phytocenoses of the *Epilobietea angustifolii* class is...

14. Після списку літературних джерел надається інформація про кожного автора **АНГЛІЙСЬКОЮ МОВОЮ:**

- Перший рядок – **Surname, Name [in Ukrainian: Прізвище Ім'я] ¹[i]**, посада, науковий ступінь та вчене звання (за наявності), e-mail.
- Наступний рядок – обов'язкове зазначення *ORCID* автора (профіль повинен бути заповнений та відкритий для перегляду громадськості).
- Наступний рядок – зазначення *ResearcherID* автора (за наявності), зазначення *Scopus-AuthorID* автора (за наявності).
- Наступний рядок – зазначення організації, в якій працює автор.

- Наступний рядок – обов'язкове зазначення повної адреси організації, у якій працює автор, з указанням індексу та країни.

15. У кінці сторінки вказується дата її надсилання у редакцію журналу

До статті додається список 2-3 потенційних рецензентів (кандидатів наук та/або докторів наук, які здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (співавторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років) із зазначенням їх місця роботи, наукових інтересів, ORCID та Google Scholar, e-mail.

Подання матеріалів, публікація та доступ до опублікованих статей безкоштовно.

Текст статті і додаткові матеріали надсилати електронною поштою на адресу lukash2011@ukr.net або [bht.journal.nuchc@gmail](mailto:bht.journal.nuchc@gmail.com) (у листі вказати прізвище автора).

РЕДАКЦІЯ ЖУРНАЛУ НЕ НЕСЕ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ ЗА ЗМІСТ СТАТЕЙ ТА МОЖЕ НЕ ПОДІЛЯТИ ДУМКУ АВТОРА!

Апеляції та оскарження

У разі незгоди з редакційним рішенням автори мають право подати апеляцію. Для цього необхідно надіслати письмове обґрунтування головному редактору. Апеляція буде розглянута редакційною колегією, і рішення за результатами розгляду є остаточним.

Виправлення та відкликання статей

Якщо в опублікованій статті виявлено суттєві помилки або порушення етики, журнал може:

- **Опублікувати виправлення** (erratum) у разі незначних помилок, які не впливають на основні результати.
- **Відкликати статтю** у випадку серйозних порушень, таких як плагіат або фальсифікація даних.

Процедура відкликання передбачає публікацію відповідного повідомлення та позначення статті як відкликаної у всіх версіях.

Стандарти звітності про дослідження

Автори повинні дотримуватися міжнародно визнаних стандартів звітності, таких як CONSORT ([Consolidated Standards of Reporting Trials](#)) для рандомізованих досліджень, PRISMA ([Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses](#)) для систематичних оглядів та інших, залежно від типу дослідження. Це забезпечить прозорість та відтворюваність результатів.

[i] ¹ Вказати внесок відповідного (1 – першого, 2 – другого тощо) автора у публікацію, обравши з переліку: Conceptualization; Methodology; Software; Validation; Formal analysis; Investigation; Resources; Data Curation; Writing - Original Draft; Writing - Review & Editing; Visualization; Supervision; Project administration; Funding acquisition; Other roles (please specify contribution).

SCIENTIFIC EDITION

BHT 

Biota. Human. Technology

International Scientific Journal

BHT : Biota. Human. Technology / Національний університет
«Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка; гол. ред.
О.В. Лукаш. 2026. №1. 250 с.

Designer – N. Tkachuk

Photo of the title page – created by WordClouds.com

Editing – O. Lukash, H. Tkaczenko, I. Kurmakova, N. Tkachuk, O. Klimova

Administrator of site – N. Tkachuk

Designer cover – N. Tkachuk

Passed for printing

25.03.2026 Format A4

Editorial and Publishing Department of T.H. Shevchenko National University
“Chernihiv Colehium”, 53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013,
Ukraine

Phone: +38(046)265-1799

nuchk.tipograf@gmail.com