

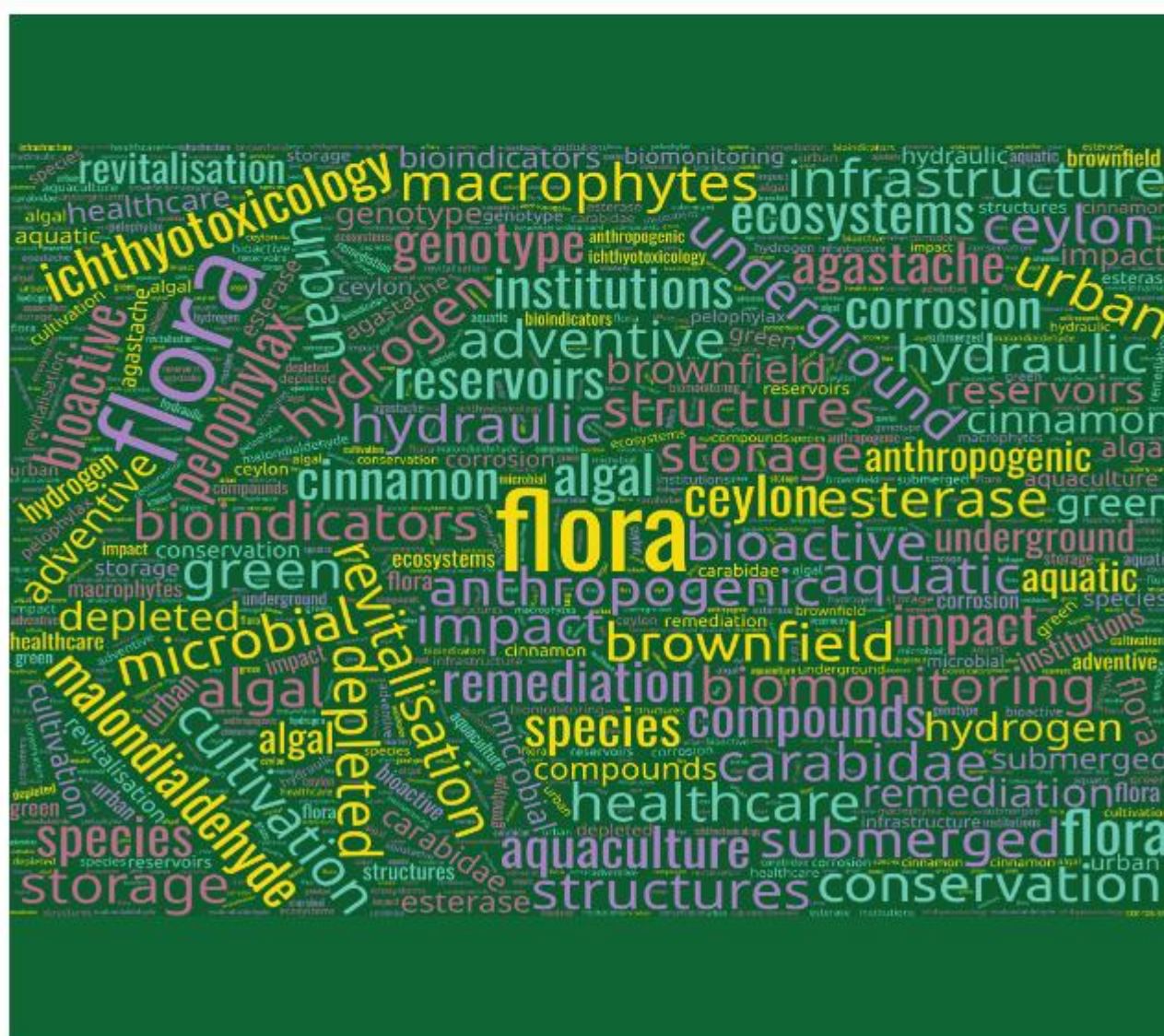
UDC 57:577:60:602:614

ВНТ²₂₀₂₆

BIOTA. HUMAN. TECHNOLOGY

International Scientific Journal

Electronic Edition





BHT

2026 | 2

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 journals of Ukraine (category “B”) (cluster "Biology, Biotechnology, Medicine and Rehabilitation", specialties E1 Biology and Biochemistry; G21 Biotechnology and Bioengineering; I9 Public Health) from June 1, 2026 to May 31, 2029 [in accordance with the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 928, Appendix 6 (dated 2026-06-11)].

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 OpenAlex

Google Scholar CAS Source Index (CASSI) 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
Slupsk, 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 Slupsk, Poland

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

Foreword

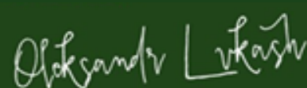
from the Editor-in-Chief

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

**ФІТОБІОТА**

ФІТОБІОТА

Наталія Прокопів

ГЕОГРАФІЧНА СТРУКТУРА І ГОСПОДАРСЬКА ОЦІНКА
АДВЕНТИВНИХ ВИДІВ УРБАНОФЛОРИ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКА

Nataliia Prokopiv

THE GEOGRAPHICAL STRUCTURE AND ECONOMIC ASSESSMENT OF
ADVENTIVE SPECIES IN THE URBAN FLORA OF IVANO-FRANKIVSK

[in Ukrainian]

-11-

Світлана Кормош, Ірина Повлін, Інна Митенко

АГРОБІОЛОГІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ГЕНОТИПУ
AGASTACHE FOENICULUM (PURSH) KUNTZE) ТА ІНШИХ ВИДІВ
РОДУ *AGASTACHE* L. У ФОРМУВАННІ СТАЛИХ АГРОФІТОЦЕНОЗІВ

Svitlana Kormosh, Iryna Povlin, Inna Mytenko

AGROBIOLOGICAL POTENTIAL OF GENOTYPE OF
AGASTACHE FOENICULUM (PURSH) KUNTZE) AND OTHER GENUS SPECIES
AGASTACHE L. IN THE FORMATION OF STABLE AGROPHYTOCENOSES

[in Ukrainian]

-21-

Тетяна Івусь, Юрій Карпенко

ФІТОСОЗОЛОГІЧНА ЦІННІСТЬ ДІЛЯНКИ РІЧКИ ВЗДВИЖІ
ЯК ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИРОДООХОРОННОГО ОБ'ЄКТА

Tetiana Ivus, Yurii Karpenko

PHYTOSOOLOGICAL VALUE OF A SECTION OF THE VZDVYZHA RIVER
AS A POTENTIAL NATURE CONSERVATION SITE

[in Ukrainian]

-34-

Олександр Яковенко, Віталій Морський

КАРТУВАННЯ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ
ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. ЧЕРНІГОВА ЗАСОБАМИ ГІС

Oleksandr Yakovenko, Vitaliy Morskyi

GIS-BASED MAPPING OF VEGETATION COVER
IN CHERNIHIV'S GREEN INFRASTRUCTURE

[in Ukrainian]

-44-

Валерій Новосад, Ольга Щербакова, Катерина Новосад

РАРИТЕТНІ ВИДИ СУДИННИХ РОСЛИН
МІЖНАРОДНОЇ, НАЦІОНАЛЬНОЇ ТА РЕГІОНАЛЬНОЇ ОХОРОНИ ФЛОРИ
НИЖНЬОГО ПРИДНІПРОВ'Я В ЗОНІ КАТАСТРОФІЧНОГО ПАВОДКУ,
СПРИЧИНЕНОГО ПІДРИВОМ КАХОВСЬКОЇ ГЕС

Valerij Novosad, Olha Shcherbakova, Kateryna Novosad

RARE VASCULAR PLANT SPECIES
OF INTERNATIONAL, NATIONAL AND REGIONAL
CONSERVATION SIGNIFICANCE IN THE FLORA
OF THE LOWER DNIPRO REGION WITHIN THE ZONE OF CATASTROPHIC FLOODING
CAUSED BY THE DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA HYDROELECTRIC POWER

[in Ukrainian]

-65-

*Олександр Лукаш, Анастасія Змеу, Анна Радченко,
Марина Любко, Вікторія Шумська, Іван Кірвель*

ПРОСТОРОВО-СЕЗОННА ДИНАМІКА СТРУКТУРИ
ПРИБЕРЕЖНОЇ АЛЬГОФЛОРИ РІЧКИ СНОВ
У ЗОНІ ВПЛИВУ СЕДНІВСЬКОЇ ГЕС: ПІЛОТНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

*Oleksandr Lukash, Anastasia Zmeu, Anna Radchenko,
Maryna Liubko, Viktoriia Shumska, Ivan Kirvel*

SPATIAL-SEASONAL DYNAMICS OF
THE RIPARIAN ALGAL FLORA STRUCTURE
IN THE AREA OF THE SEDNIV HPP IMPACT ON THE SNOV RIVER: PILOT STUDY

[in Ukrainian]

-83-



ЗООБІОТА

Дорина Чома, Леонард Іллар, Степан Коложварі

ОСОБЛИВОСТІ УГРУПОВАНЬ ТУРУНІВ (COLEOPTERA: CARABIDAE)
РІЗНИХ ТИПІВ ОСЕЛИЩ В ОКОЛИЦЯХ СЕЛА ВЕЛИКА ДОБРОНЬ
(ЗАКАРПАТСЬКА НИЗОВИНА)

Dorina Csoma, Leonard Illar, Stepan Kolozsvari

FEATURES OF GROUND BEETLE ASSEMBLAGES (COLEOPTERA: CARABIDAE)
IN DIFFERENT HABITAT TYPES IN THE VICINITY OF VELYKA DOBRON VILLAGE
(TRANSCARPATHIAN LOWLAND)

[in Ukrainian]

-95-

Оксана Ткаченко, Анна Лymar

МОРФОЛОГІЯ ЖАБ РОДУ *PELOPHYLAX*
УЗБЕРЕЖЖЯ Р. ДЕСНА, М. ЧЕРНІГІВ

Oxana Tkachenko, Anna Lymar

MORPHOLOGY OF FROGS OF THE GENUS *PELOPHYLAX*
ALONG THE BANKS OF THE DESNA RIVER, CHERNIHIV

[in Ukrainian]

-106-



MICROBIOTA



МІКРОБІОТА

Наталія Демченко, Світлана Ткаченко

АНТИМІКРОБНА ТА АНТИКОРОЗІЙНА АКТИВНОСТІ
ЧЕТВЕРТИННИХ СОЛЕЙ ХІНОЛІНІЮ ТА ІМІДАЗО[1,2-А]ХІНОЛІНІЮ

Nataliia Demchenko, Svitlana Tkachenko

ANTIMICROBIAL AND ANTICORROSIVE ACTIVITIES OF
QUATERNARY QUINOLINIUM AND IMIDAZO[1,2-A] QUINOLINIUM SALTS

[in Ukrainian]

-120-



ENVIRONMENTAL POLLUTION
STRESSES AND ORGANISMS' RESPONSE



СТРЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ
ТА РЕАКЦІЯ ОРГАНІЗМІВ

Юлія Вороніна-Тузовських, Віктор Янченко, Олена Бондар,
Вероніка Вороніна, Ірина Курмакова, Ігор Савоста

ДОСЛІДЖЕННЯ ХРОНІЧНОЇ ТОКСИЧНОСТІ КОМПЛЕКСУ ОЛІЙНОГО
НА ОСНОВІ БУРШТИНУ

*Yuliia Voronina-Tuzovskiykh, Viktor Yanchenko, Olena Bondar,
Veronika Voronina, Iryna Kurmakova, Ihor Savosta*

RESEARCH OF CHRONIC TOXICITY OF THE OIL COMPLEX
BASED ON AMBER

[in Ukrainian]

-131-

Ірина Мунасіпова-Мотяш, Наталія Ткачук

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО БІОІНДИКАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ
ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

Iryna Munasyypova-Motyash, Nataliia Tkachuk

MODERN APPROACHES TO BIOINDICATIVE MONITORING
OF AQUATIC ECOSYSTEMS

[in Ukrainian]

-144-

Олександр Смольський

ВІЛЬНО-РАДИКАЛЬНІ ПРОЦЕСИ У ТКАНИНАХ КОРОПА
ЗА ТОКСИЧНОГО ВПЛИВУ ПРЕПАРАТУ «КОРАГЕН»
В УМОВАХ *IN VITRO*

Olexandr Smolsky

FREE RADICAL PROCESSES IN CARP TISSUES
UNDER THE TOXIC INFLUENCE OF THE PREPARATION "KORAGEN"
IN *IN VITRO* CONDITIONS

[in Ukrainian]

-155-

Дмитрій Філоненко, Марина Ячна, Ольга Мехед, Олександр Третяк

БІОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТА КЛІТИННО-ГЕНЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОБМІНУ
НУКЛЕЇНОВИХ КИСЛОТИ У ТКАНИНАХ КАРАСЯ ЗА ДІЇ МІКОТОКСИНІВ

Dmytrii Filonenko, Maryna Yachna, Olha Mekhed, Olexandr Tretiak

BIOCHEMICAL PARAMETERS AND CYTO-GENETIC ASPECTS OF NUCLEIC ACID
METABOLISM IN CRUCIAN CARP TISSUES UNDER THE INFLUENCE OF MYCOTOXINS

[in Ukrainian]

-165-



MAN AND HIS HEALTH



ЛЮДИНА ТА ЇЇ ЗДОРОВ'Я

Zbigniew Mazur, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk

CYNAMON CEJLOŃSKI (*CINNAMOMUM VERUM* J. PRESL) –
WŁAŚCIWOŚCI LECZNICZE, ZASTOSOWANIE I POTENCJAŁ TERAPEUTYCZNY

Zbigniew Mazur, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk

CEYLON CINNAMON (*CINNAMOMUM VERUM* J. PRESL) –
MEDICINAL PROPERTIES, USES, AND THERAPEUTIC POTENTIAL

[in Polish]

-177-

Микола Дейкун

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я:
ВІД ЕКОСИСТЕМНОГО ДО ЦИВІЛІЗАЦІЙНОГО ПІДХОДУ

Mykola Deikun

GLOBAL ARCHITECTURE OF THE PUBLIC HEALTH SYSTEM:
FROM AN ECOSYSTEM TO A CIVILISATIONAL APPROACH

[in Ukrainian]

-211-



ECOLOGICAL AND BIOLOGICAL ASPECTS
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES



ЕКОЛОГІЧНІ ТА БІОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Elyas Haddad, Marianna Vadászi

TECHNICAL VIABILITY OF UNDERGROUND HYDROGEN STORAGE
IN DEPLETED HYDROCARBON RESERVOIRS:
A GLOBAL COMPARATIVE ANALYSIS

Ільяс Хаддад, Маріанна Вадасі

ТЕХНІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ
У ВИЧЕРПАНИХ РЕЗЕРВУАРАХ ВУГЛЕВОДНЮ:
ГЛОБАЛЬНИЙ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

[in English]

- 229 -

Станіслав Душкін

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ДЕГРАДОВАНИХ ПРОМИСЛОВИХ ЗОН
У СТРУКТУРІ СУЧАСНОГО МІСТА

Stanislav Dushkin

ECOLOGICAL ASPECTS OF REVITALISING DEGRADED INDUSTRIAL AREAS
IN THE STRUCTURE OF A MODERN CITY

[in Ukrainian]

- 241 -

Яна Черничко, Габор Ловас

ВПЛИВ МИЮЧИХ ЗАСОБІВ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР ПВХ ПІДЛОГ
В МЕДИЧНІЙ ГАЛУЗІ ТА ЕЛЕКТРОННІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Jane Chernychko, Gábor Lovász

EFFECT OF GENERAL CLEANING AGENTS ON THE RESISTANCE OF PVC FLOORS
USED IN HEALTHCARE AND THE ELECTRONICS INDUSTRY

[in Ukrainian]

- 255 -

Павло Зубик, Інна Клечак

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ КУЛЬТИВУВАННЯ
TRAMETES HIRSUTA IBK 1569 ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПЕКТИНЕСТЕРАЗИ
ЯК ЧАСТИНИ ПЕКТИНОЛІТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Pavlo Zubyk, Inna Klechak

STUDY OF THE INFLUENCE OF CULTIVATION CONDITIONS OF
TRAMETES HIRSUTA IBK 1569 FOR OBTAINING PECTINESTERASE
AS PART OF THE PECTINOLYTIC COMPLEX

[in Ukrainian]

- 264 -

Ірина Короткова, Тетяна Чайка, Катерина Кожушко,
Дар'я Тристан, Ольга Бараболя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ СОКУ ЧОРНОЇ СМОРОДИНИ
КУЛЬТУРОЮ *LACTOBACILLUS PLANTARUM* LP-115

*Iryna Korotkova, Tetiana Chaika, Kateryna Kozhushko,
Daria Trystan, Olha Barabolia*

STUDY OF BLACK CURRANT JUICE FERMENTATION PROCESS BY
LACTOBACILLUS PLANTARUM LP-115

[in Ukrainian]

- 279 -



INSTRUCTIONS FOR AUTHORS



КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ

- 294 -



РНҮТОВІОТΑ

ΦΙΤΟΒΙΟΤΑ



UDC 581.9(477.86)

DOI: 10.58407/bht.2.26.1



Copyright (c) 2026 Nataliia Prokopiv

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 Прокопів

ГЕОГРАФІЧНА СТРУКТУРА І ГОСПОДАРСЬКА ОЦІНКА АДВЕНТИВНИХ ВИДІВ УРБАНОФЛОРИ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКА



Nataliia Prokopiv

THE GEOGRAPHICAL STRUCTURE AND ECONOMIC ASSESSMENT OF ADVENTIVE SPECIES IN THE URBAN FLORA OF IVANO-FRANKIVSK

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Встановлення географічної структури адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська та оцінка їхнього господарського значення.

Методологія. Дослідження адвентивної фракції урбанofлори Івано-Франківська проводилося традиційним маршрутно-експедиційним методом протягом 2020–2024 рр. Номенклатура видів узгоджена відповідно до даних енциклопедичного інтернет-ресурсу Plants of the World Online (POWO, 2025). Географічний аналіз адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська проведено відповідно до загальноприйнятих підходів у сучасному трактуванні. Господарська оцінка адвентивних видів здійснювалася на основі узагальнення літературних даних із актуальних джерел.

Наукова новизна. Вперше для урбанofлори Івано-Франківська здійснено цілісний аналіз географічної структури адвентивних видів у поєднанні з оцінкою їхнього господарського значення. Поєднання цих аспектів дає змогу комплексно охарактеризувати роль адвентивних рослин у функціонуванні міських екосистем, виявити їхні ресурсні можливості та потенційні загрози довкіллю й здоров'ю населення.

Висновки. У результаті проведеного географічного аналізу адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська виявлено 22 типи ареалів, серед яких за кількістю видів домінує космополітний ареал – 54 види (26,7 % від загальної кількості видів), голарктичний – 44 (21,7 %), гемікосмополітний – 31 (15,3 %). Встановлено домінуючу роль полірегіональної групи ареалів, що свідчить про глобалізований характер флори та її екологічну пластичність. Господарська оцінка адвентивних видів досліджуваної урбанofлори показала поєднання ресурсного потенціалу (лікарські, кормові, декоративні рослини) та екологічних ризиків (бур'яни, токсичні види). Водночас окремі види становлять небезпеку для здоров'я населення (*Ambrosia artemisiifolia* L., *Heracleum sosnowskyi* (Manden.)). Комплексний підхід до аналізу дозволяє не лише розкрити сучасний стан урбанofлори, а й сформулювати практичні рекомендації щодо управління зеленими насадженнями та збереження біорізноманіття в міському середовищі.

Ключові слова: адвентивні види, урбанofлора, космополітні види, Івано-Франківськ, господарська оцінка

ABSTRACT

Purpose of the work. To determine the geographical structure of adventive species within the urban flora of Ivano-Frankivsk and to assess their economic significance.

Methodology. The study of the adventive fraction of the urban flora of Ivano-Frankivsk was conducted using the conventional route-survey method during 2020–2024. The nomenclature of species was standardized according to the data of the encyclopedic Internet resource Plants of the World Online (POWO, 2025). The geographical analysis of adventive species was performed in accordance with generally accepted approaches and contemporary concepts in floristic geography. The economic assessment of adventive species was based on a synthesis and critical analysis of published literature data concerning their practical uses and economic importance.

Scientific novelty. For the first time, the geographical structure of adventive species of Ivano-Frankivsk urban flora has been comprehensively analyzed in conjunction with an assessment of their economic significance. The integration of these approaches provides a holistic characterization of the role of adventive plants in urban ecosystem functioning, reveals their resource potential, and identifies possible environmental and public health risks associated with their occurrence and spread.

Conclusions. The geographical analysis of adventive species of Ivano-Frankivsk urban flora revealed 22 distribution range types. Among them, the cosmopolitan range was the most prevalent, comprising 54 species (26,7 % of the total number of species), followed by the Holarctic range with 44 species (21,7 %) and the hemicosmopolitan range with 31 species (15,3 %). A dominant contribution of the polyregional group of distribution ranges was identified, indicating the globalized character of the flora and its high ecological plasticity. The economic assessment of adventive species within the studied urban flora revealed a combination of considerable economic value, including medicinal, forage, and ornamental plants, alongside ecological risks associated with the presence of weeds and toxic species. At the same time, certain species pose significant risks to public health, particularly *Ambrosia artemisiifolia* L. and *Heracleum sosnowskyi* Manden. The integrated approach applied in this study not only provides insights into the current state of the urban flora but also serves as a basis for developing practical recommendations for urban green space management and the conservation of biodiversity within the urban environment.

Key words: adventive species, urban flora, cosmopolitan species, Ivano-Frankivsk, economic assessment

Вступ

Внаслідок антропогенного впливу на природні екосистеми процес адвентизації флори швидко посилюється, утворюючи нове природне та антропогенне середовище (Lagunova et al., 2021). Адвентивна фракція флори є специфічним компонентом, який вирізняється значною динамічністю порівняно з місцевою фракцією, що зумовлює необхідність її контролю та моніторингу.

Процес адвентизації регіональних флор, який охопив усі континенти, становить другу, після руйнування природних місцезростань, загрозу біорізноманіттю планети (Chornesky & Randall, 2003, Davis, 2003, Protoporova et al., 2002). Найбільш відчутним є негативний вплив адвентивних видів у регіонах, де природний рослинний покрив є дуже фрагментованим (Protoporova & Shevera, 2019). Дослідження урбанізованих територій як місць концентрації адвентивних видів рослин набуває особливої актуальності (Maltseva et al., 2017; Protoporova & Shevera, 2008). З огляду на те, що у міському середовищі занесені види найшвидше поширюються, виникає необхідність у вивченні видового складу адвентивної фракції міської флори, особливостей її формування задля розуміння напрямків подальшої трансформації регіональної флори.

Аналіз поширення видів, що складають ту чи іншу флору, дозволяє простежити її генезис і взаємозв'язки з іншими флорами. Особливо важливим є дослідження географічної структури адвентивних видів урбанофлори, оскільки саме міські території зазнають значного антропогенного навантаження та охоплюють майже всі типи

змінених людиною екоотопів (Derevyanska & Glukhov, 2016).

Івано-Франківськ (24° 42' сх. д. та 48° 55' пн. ш., 260 м н.р.м.) – місто, розташоване на Покутській рівнині на заході України між річками Бистрицею Надвірнянською та Бистрицею Солотвинською. З ландшафтної точки зору місто вважається урбанізованим територіальним комплексом. Воно є частиною природного ландшафту, значно трансформованого будівлями, комунікаційною інфраструктурою та іншими міськими елементами (Piotrowska-Werysco et al., 2021). Попри наявність окремих флористичних робіт, комплексний аналіз досліджень адвентивної фракції цієї території не проводився. А представники, які до неї належать, не лише змінюють структуру урбанофлори, а й мають різноманітне господарське значення – від лікарського та кормового до декоративного й технічного. Господарська оцінка дає змогу визначити як ресурсний потенціал (лікарські, кормові рослини), так і ризики для міських екосистем (технічні бур'яни, токсичні види).

Таким чином, **метою дослідження** є встановлення географічної структури адвентивних видів урбанофлори Івано-Франківська та оцінка їхнього господарського значення, що у поєднанні дозволяє комплексно охарактеризувати їхню роль у функціонуванні міських екосистем. Об'єкт дослідження – адвентивна фракція урбанофлори Івано-Франківська. Предмет – хорологічні особливості та господарське значення адвентивних видів у складі міста.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження адвентивної фракції урбанofлори Івано-Франківська проводилося традиційним маршрутно-експедиційним методом протягом 2020–2024 рр. Враховано території всіх населених пунктів, підпорядкованих Івано-Франківській міській раді. Спеціальними флористичними дослідженнями були охоплені місця найбільш інтенсивного занесення адвентивних рослин (території залізничних станцій, виробничих підприємств, будівельні майданчики, придорожні смуги вздовж автомобільних шляхів і залізничних колій, звалища, смітники).

Під час складання конспекту адвентивних видів урбанofлори використовувались власні дані автора, літературні дані та матеріали наукового гербарію Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Номенклатура видів узгоджена відповідно до даних енциклопедичного інтернет-ресурсу Plants of the World Online (POWO, 2025). Географічний аналіз адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська проведено відповідно до загальноприйнятих підходів у сучасному трактуванні (Dvirna, 2014). Господарська оцінка адвентивних видів здійснювалася на основі узагальнення літературних даних із актуальних джерел (Minarchenko, 2005; Bondarenko et al., 2025; Blackburn et al., 2011).

Результати дослідження та обговорення

Адвентивна фракція урбанofлори Івано-Франківська представлена 202 видами рослин, що належать до 143 родів і 48 родин. Найбільша кількість видів відмічається у родинях *Asteraceae* (44 види або 21,8 %), *Brassicaceae* (20 видів або 10 %), *Poaceae* (17 видів або 8,4 %). Загалом, такий розподіл домінуючих трьох родин характерний і для адвентивної фракції флори України. Двадцять чотири родини (або 50 %) досліджуваної флори представлені одним видом. Значна їх кількість є характерною рисою адвентивної та синантропної флор.

Внаслідок здійсненого географічного аналізу сучасних ареалів досліджуваної флори виявлено 22 типи ареалів, серед яких за кількістю видів домінує космополітний ареал

– 54 види (26,7 % від загальної кількості видів). Представниками є *Acer negundo* L., *Ambrosia artemisifolia* L., *Atriplex tatarica* L., *Caragana arborescens* Lam., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik. Наступні позиції займають голарктичний – 44 (21,7 %), гемікосмополітний – 31 (15,3 %). До голарктичних видів належать *Aethusa cynapium* L., *Artemisia absinthium* L., *Carduus nutans* L., *Xanthium spinosum* L., *Cynoglossum officinale* L.; до гемікосмополітних – *Brassica napus* L., *Lepidium rudemale* L., *Hyoscyamus niger* L. Менш чисельними є європейсько-середземноморсько-ірано-туранський – 11 (5,4 %), європейсько-середземноморський – 10 (5 %), європейсько-середземноморсько-азійський – 10 (5 %). Решта ареалів налічує менше ніж 10 видів. Шість ареалів є одновидовими (Табл. 1).

Виділивши три основні ареалогічні групи, спостерігаємо переважання видів полірегіональної групи ареалів: їх налічується 97 видів (48 % від загальної кількості видів). Домінуючими в ній є космополіти та гемікосмополіти, які становлять 88 % складу цієї групи. Наступну позицію займають ареалогічні групи голарктичного типу – 28 %. Найнижчий ступінь участі у формуванні адвентивної фракції флори досліджуваного регіону належить давньосередземноморській групі ареалів – 24 %. Переважаючими в цій групі ареалів є європейсько-середземноморсько-ірано-туранські, європейсько-середземноморські та європейсько-середземноморсько-азійські, які становлять 64 % від складу цієї групи (рис. 1).

Схожі тенденції виявлено за даними географічного аналізу інших територій. На відміну від наших даних, у флорі Волинського Полісся домінуючу роль відіграють ареалогічні групи голарктичного типу, а полірегіональний тип займає другу позицію. Це може бути зумовлено різним соціально-економічним розвитком регіонів, ґрунтово-кліматичними умовами та географічним положенням (Dvirna, 2014).

Виявлені особливості географічної структури адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська створюють основу для їхньої господарської оцінки. Зростаючі на досліджуваній території адвентивні види мають як негативне, так і позитивне господарське значення.

Таблиця 1

Типи ареалів адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська

№ п/п	Ареал	Кількість видів, %
1.	Космополітний	54 (26,7)
2.	Голарктичний	44 (21,7)
3.	Гемікосмополітний	31 (15,3)
4.	Європейсько-середземноморсько-ірано-туранський	11 (5,4)
5.	Європейсько-середземноморський	10 (5)
6.	Європейсько-середземноморсько-азійський	10 (5)
7.	Центральноєвропейсько-північноамериканський	6 (3)
8.	Європейсько-середземноморсько-передньоазійський	5 (2,4)
9.	Європейсько-азійський	4 (2)
10.	Євразійський	4 (2)
11.	Європейсько-північноамериканський	3 (1,5)
12.	Європейсько-американський	3 (1,5)
13.	Європейський	3 (1,5)
14.	Європейсько-давньосередземноморсько-східноазійський	3 (1,5)
15.	Європейсько-кавказький	3 (1,5)
16.	Європейсько-давньосередземноморський	2 (1)
17.	Європейсько-кавказько-північноамериканський	1 (0,5)
18.	Палеарктичний	1 (0,5)
19.	Євросибірсько-середземноморсько-ірано-туранський	1 (0,5)
20.	Європейсько-північноамерикансько-середземноморсько-передньоазійський	1 (0,5)
21.	Європейсько-кавказько-малоазійський	1 (0,5)
22.	Європейсько-північноамерикансько-давньосередземноморський	1 (0,5)



Рис. 1. Основні ареологічні групи адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська

У результаті проведеної господарської оцінки адвентивні види урбанofлори Івано-Франківська розподілено на 8 груп (рис. 2). Найбільш чисельну групу становлять бур'яни: 95 видів або 47 % від загальної кількості адвентивних. Високою шкодо-чинністю відзначено такі бур'яни, як *Erigeron canadensis* L., *Galinsoga parviflora* Cav., *Vicia villosa* Roth, *Helianthus tuberosus* L., *Raphanus raphanistrum* L. Культурні рослини сприймають шкідливу дію бур'янів ще в період проростання, коли алелопатія є основною формою взаємодії між рослинами. Фітотоксини, які бур'яни виділяють через кореневу систему у ґрунт, негативно впливають на формування паростків культурних рослин. Так, ріст соняшнику затримують кореневі виділення *Sonchus arvensis* L.; кукурудзи – *Xanthium strumarium* L. (Kosolap, 2004; Sergienko et al., 2024). Бур'яни знижують температуру ґрунту, оскільки затінюють культурні рослини, сприяючи затримці процесу фотосинтезу. В останні роки спостерігається зростання забур'яненості частини земель, які не освоюються новими землекористувачами або вивільняються з інтенсивного господарського використання. Високі бур'яни верхніх ярусів (*Ambrosia artemisifolia* L., *Xanthium orientale* L.) є найбільш небезпечними в агрофітоценозах низько-стеблових сортів. Значну небезпеку становлять також малорічні однодольні бур'яни, цикл розвитку яких близький до життєвого циклу зернових колосових культур. Так наявність 5 шт. /м² *Apera spica-venti* (L.) P. Beauv. у посівах озимої пшениці стало причиною втрати 35 кг/га врожаю (Kosolap, 2004). Для покращення ситуації особлива увага повинна приділятися процедурі очищення насінного матеріалу, його перевірки; повинен зрости рівень і дієвості фітосанітарного контролю.

За кількістю представлених видів другу позицію займає група декоративних рослин. Високі декоративні якості мають такі види: *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch., *Cotinus coggygria* Scop., *Lonicera caprifolium* L., *Phlox paniculata* L. Так, *Parthenocissus quinquefolia*, завдяки високій холодостійкості та низьким потребам у догляді, використовується для озеленення

будівель та парканів (Semak et al., 2025). *Cotinus coggygria*, окрім декоративних якостей, використовується у традиційній та народній медицині. Численні фармакологічні та біологічні властивості виду роблять його ефективним засобом у лікуванні широкого спектра захворювань (Lukash et al., 2024). *Amorpha fruticosa* L. використовується як допоміжний засіб при ускладненнях діабету. Настій з його листя і стебел використовують як загальний тонік, а також у комплексі з іншими рослинами для лікування ревматизму та хронічних захворювань (Kozuharova et al., 2017). *Robinia pseudoacacia* L. широко використовується як декоративний вид у міському озелененні, проте має схильність до дичавіння та утворення монодомінантних угруповань, що створює інвазійні ризики; водночас цей вид є важливим медоносом, що підтверджується сучасними дослідженнями якості псевдо-акацієвого меду (Stehlíková et al., 2026). Декоративна роль окремих адвентивних видів поєднується з потенційною небезпекою їхнього поширення, що особливо стосується *Acer negundo* L. (Sikorska et al., 2019). Вид швидко освоює нові біотопи та витісняє природні види урбанofлори.

У той же час на територіях, порушених внаслідок антропогенної діяльності, зустрічається велика кількість лікарських рослин. Виявлено 27 видів із чітко вираженими лікувальними властивостями, що використовуються у народній та офіційній медицині. Першочергове значення мають види *Fumaria officinalis* L., *Urtica dioica* L., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik. *Fumaria officinalis* застосовують при мігрені, астенії, малярії, виразковій хворобі шлунка, жовчнокам'яній та сечокам'яній хворобах, туберкульозі легень, геморої, циститі, набряках; зовнішньо – при алергії, екземі, лишаях. *Capsella bursa-pastoris* володіє кровоспинною, фітонцидною, м'язостимулюючою дією. Настій трави, рідкий екстракт, сік використовують при післяпологових, легених, шлунково-кишкових і ниркових кровотечах, сильних місячних, високому артеріальному тиску. *Urtica dioica* стимулює кровотворення, застосовується при анемії (Kurdyukova, 2009; Minarchenko, 2005).

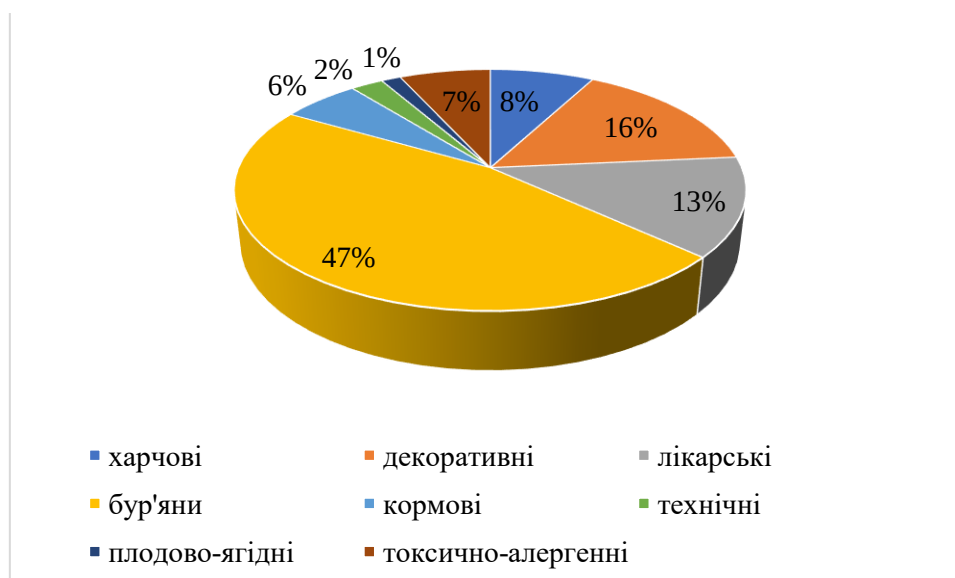


Рис. 2. Господарська оцінка адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська

12 видів є кормовими, насамперед з родин *Fabaceae* та *Poaceae*. Серед них: *Medicago sativa* L., *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Trifolium hybridum* L., *Avena sativa* L., *Hordeum vulgare* L., *Panicum miliaceum* L. Менш чисельними за господарським значенням є харчові, технічні, плодово-ягідні види.

Серед видів-адвентів є чимало карантинних представників, які негативно впливають не тільки на аборигенні види рослин, а й на здоров'я людини. Пилкові зерна окремих адвентів характеризуються високим алергенним потенціалом і здатні викликати алергічні реакції в сенсibilізованих груп населення. Дуже небезпечним адвентивним видом під час цвітіння є *Ambrosia artemisifolia* L., пил якої спричиняє амброзійний поліноз або сінову пропасницю (Piotrowska-Weryscko et al., 2021). Враження пилком супроводжується сльозотечею, підвищенням температури тіла, різким запаленням верхніх дихальних шляхів, що призводить до нападів бронхіальної астми. Висока температура та характер циркуляції повітряних мас є сприятливими факторами для поширення захворювання. Рослиною-агресором є *Heracleum sosnovskyi* Manden., який містить велику кількість кумаринів (Minarchenko, 2005). Чутливість до дії борщівника є індивідуальною. Деякі люди майже не реагують на дію рослини навіть за

тривалого контакту, тоді як іншим достатньо кількох хвилин, щоб протягом 2 діб проявився опік шкіри 1-го ступеня. Фотоактивні сполуки, на які багатий прозорий сік рослини, під дією ультрафіолету надають йому токсичних властивостей. Уражені ділянки шкірного епітелію важко гояться. Людина стає більш чутливою до інших шкірних захворювань. Отруйними речовинами дурману звичайного (*Datura stramonium* L.) є алкалоїди – гіосциамін і скополамін. Симптоми отруєння проявляються галюцинаціями, появою паралічів, першінням у горлі. Через високий вміст алкалоїдів отруйними вважають всі частини дурману (Kretsul & Dzhanur, 2017). Дослідження токсичних властивостей адвентивних видів є основою успіху в боротьбі з подібними отруєннями. Санітарно-просвітницька робота з населенням є профілактичним засобом щодо зменшення числа уражень небезпечними отруйними рослинами.

Варто відзначити, що чимало видів досліджуваної урбанofлори мають комплексне господарське значення, поєднуючи кілька напрямів використання. Так, *Juglans regia* L. належить до харчових видів, проте водночас характеризується вираженими лікувальними властивостями. Плоди використовують як сечогінний, антитоксичний засіб; кору – для лікування виразок і пухлин;

листя – при ураженнях слизової оболонки ротової порожнини та гнійних ранах (Minarchenko, 2005).

З огляду на наведене, можна стверджувати, що господарське значення адвентивних видів флори міста є неоднозначним. Більш широке залучення заносних видів до безпосереднього господарського використання може стати ефективним засобом регулювання їх чисельності та контролю за динамікою популяцій.

Висновки

Переважає полірегіональної групи ареалів урбанofлори Івано-Франківська

свідчить про її глобалізований характер, екологічну пластичність та здатність до адаптації в умовах міського середовища. Така структура зумовлює універсальність флори, що проявляється у багатофункціональному господарському значенні адвентивних видів: поряд із бур'яновими властивостями вони можуть виступати як лікарські, кормові, декоративні чи технічні рослини, а окремі – становити небезпеку для здоров'я населення. Отже, поєднання географічного аналізу та оцінки господарського значення створює підґрунтя для детальної характеристики ролі адвентивних видів у функціонуванні міських екосистем.

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 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

Автор використовувала інструменти генеративного штучного інтелекту (ChatGPT, Gemini) для перевірки граматики, вдосконалення стилістики тексту і оформлення бібліографічного списку використаних джерел. Після використання названих інструментів автор ретельно переглянула та відредагувала вміст і несе 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 author used generative AI tools (ChatGPT, Gemini) for grammar checking, improving text style, and formatting the bibliography. After using these tools, the author 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

Blackburn, T. M., Pyšek, P., Bacher, S., Carlton, J. T., Duncan, R. P., Jarošík, V., Wilson, J. R. U., & Richardson, D. M. (2011). A proposed unified framework for biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 26(7), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.03.023>

Bondarenko, O. Yu., Nazarchuk, Yu. S., & Bondarenko, M. Ye. (2025). Cultivated plant species in the flora of state significance roadside (vicinity of Odesa). *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Agronomy and Biology*, 59(1), 42–50. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2025.1.6> (in Ukrainian)

Бондаренко, О. Ю., Назарчук, Ю. С., та Бондаренко, М. Є. (2025). Культивовані рослини у флорі державного значення узбіччя дороги (поблизу Одеси). *Бюлетень Сумського національного аграрного університету. Серія: Агрономія та біологія*, 59(1), 42–50. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2025.1.6>

Chornesky, E. A., & Randall, J. M. (2003). The threat of invasive alien species to biological diversity: Setting a future course. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 90(1), 67–76. <https://doi.org/10.2307/3298527>

Davis, M. (2003). Biotic globalization: Does competition from introduced species threaten biodiversity? *BioScience*, 53, 481–489. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0481:BGDCFJ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0481:BGDCFJ]2.0.CO;2)

Derevyanska, G. G., & Glukhov, O. Z. (2016). Geographical structure of the urban floras of the steppe zone of Ukraine. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 6(2), 239–245. <https://doi.org/10.15421/201653> (in Ukrainian)

Дерев'янська Г. Г., Глухов О. З. Географічна структура урбанофлор степової зони України. *Біологічний вісник Богдана Хмельницького Мелітопольського державного педагогічного університету*. 2016. Т. 6, № 2. С. 239–245. <https://doi.org/10.15421/201653>

Dvirna, T. S. (2014). Geographical structure of the adventive fraction of the flora of the Romensko-Poltava geobotanical district. *Ukrainian Botanical Journal*, 71(3), 308–312. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj71.03.308> (in Ukrainian)

Двірна Т. С. Географічна структура адвентивної фракції флори Роменсько-Полтавського геоботанічного округу. *Український ботанічний журнал*. 2014. Т. 71, № 3. С. 308–312. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj71.03.308>

Kosolap, M. P. (2004). *Herbology: Textbook*. Aristei. (in Ukrainian)

Косолап М.П. Гербологія: навчальний посібник. Київ: Арістей, 2004. 364 с.

Kozuharova, E., Matkowski, A., Wozniak, D., Simeonova, R., Naychov, Z., Malainer, C., Mocan, A., Nabavi, S. M., & Atanasov, A. G. (2017). *Amorpha fruticosa* – A noxious invasive alien plant in Europe or a medicinal plant against metabolic disease? *Frontiers in Pharmacology*, 8, 333. <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00333>

Kretsul, N. I., & Dzhuran, V. M. (2017). Knowledge of synanthropic landscapes is one of the bases for prevention of biological risk. *Young Scientist*, 9.1(49.1), 201–205. (in Ukrainian)

Крецул Н. І., Джуран В. М. Знання про синантропні отруйні рослини – одна з основ запобігання біологічної небезпеки. *Молодий вчений*. 2017. № 9.1(49.1). С. 201–205.

Kurdyukova, O. M. (2009). Ruderal plants as medical plants in composition of the kulturphytocenosis. *Problems of Ecological and Medical Genetics and Clinical Immunology*, 4(91), 42–47. (in Ukrainian)

Курдюкова О. М. Бур'яни як лікарські рослини у складі культурфітоценозів. *Проблеми екологічної та медичної генетики і клінічної імунології*. 2009. Вип. 4(91). С. 42–47.

Lagunova, E. G., Ankipovich, E. S., & Shaulo, D. N. (2021). Adventive and invasive plant species of natural ecosystems in the Republic of Khakassia. *BIO Web of Conferences*, 38, 68. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213800068>

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

Maltseva, S. Y., Maltsev, Y. I., Solonenko, A. M., & Bren, O. G. (2017). Anthropogenic transformation of the flora of urbanoecosystems of the Northern Pryazov territories. *Biosystems Diversity*, 25(3), 222–227. <https://doi.org/10.15421/011734>

Minarchenko, V. M. (2005). *Medicinal vascular plants of Ukraine (medical and resource significance)*. Kyiv: Phytosociocenter. (in Ukrainian)

Мінарченко В. М. Лікарські судинні рослини України (медичне та ресурсне значення). Київ: Фітосоціоцентр, 2005. 324 с.

Piotrowska-Weryszko, K., Weryszko-Chmielewska, E., Melnychenko, G., Konarska, A., Mylenka, M., Prokopiv, N., & Bożek, M. (2021). Comparison of *Ambrosia* L. Pollen Seasons in Lublin (Poland) and Ivano-Frankivsk (Ukraine) and Presentation of the Morphotypes of Trichomes on *A. artemisiifolia* L. Shoots in Terms of the Allergenic Properties of the Plant. *Agronomy*, 11(9), 1764. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091764>

POWO. (2025). Plants of the World Online. Version 2025. Retrieved May 25, 2026, from <https://powo.science.kew.org>

Protopopova, V. V., Mosyakin, S. L., & Shevera, M. V. (2002). *Plant invasions in Ukraine as a threat to biodiversity: The present situation and tasks for the future*. M. G. Kholodny Institute of Botany, NAS of Ukraine (in Ukrainian)

Протопопова В. В., Мосякін С. Л., Шевера М. В. Фітоінвазії в Україні як загроза біорізноманіттю: сучасний стан, завдання на майбутнє. Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України, Київ, 2002. 1–32.

Protopopova, V. V., & Shevera, M. V. (2008). Participation of alien species in urban floras in different botanical and geographical zones of Ukraine: a preliminary assessment. *Biodiversity: Research and Conservation*, (11-12), 9–16. <https://doi.org/10.14746/biorc.2008.11-12.2>

Protopopova, V., & Shevera, M. (2019). Invasive species in the flora of Ukraine. I. The group of highly active species. *GEO&BIO*, 17, 116–135. <https://doi.org/10.15407/gb.2019.17.116> (in Ukrainian)

Протопопова В. В., Шевера М. В. Інвазійні рослини у флорі України. I. Група високоактивних видів. *GEO&BIO*. 2019. Вип. 17. С. 116–135. <https://doi.org/10.15407/gb.2019.17.116>

Semak, U., Mylenka, M., & Melnyk, T. (2025). Integrated design and ecological efficiency of vertical greening systems in an academic building. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Biology*, 12, 149–159. <https://doi.org/10.15330/jpnbio.12.149-159> (in Ukrainian)

Семак У., Миленка М., Мельник Т. Інтегрований дизайн і екологічна ефективність вертикальних систем озеленення в академічній будівлі. *Журнал Василя Стефаника Прикарпатського національного університету. Біологія*. 2025. Т. 12. С. 149–159. <https://doi.org/10.15330/jpnbio.12.149-159>

Sergienko, V., Tyshchuk, O., Balan, G., & Tsurkan, R. (2024). Allelopathic influence of weeds on corn seed germination. *Interdepartmental Thematic Scientific Collection of Phytosanitary Safety*, (70), 290–302. <https://doi.org/10.36495/phss.2024.70.290-302> (in Ukrainian)

Сергієнко В. Г., Тищук О. П., Балан Г. О., Цуркан Р. П. Алелопатичний вплив бур'янів на проростання насіння кукурудзи. *Фітосанітарна безпека*. 2024. Вип. 70. С. 290–302. <https://doi.org/10.36495/PHSS.2024.70.290-302>

Sikorska, D., Sikorski, P., Archiciński, P., Chormański, J., & Hopkins, R.J. (2019). You can't see the woods for the trees: Invasive *Acer negundo* L. in urban riparian forests harms biodiversity and limits recreation activity. *Sustainability*, 11(20), 5838. <https://doi.org/10.3390/su11205838>

Stehlíková, D., Farkas, Á., Filep, R., Papp, N., Purger, D., Tóth, J., & Czigle, S. (2026). Pseudoacacia honey of Hungarian and Slovak origin: Selected quality parameters and antioxidant capacity. *Molecules*, 31(5), 755. <https://doi.org/10.3390/molecules31050755>

Received: 29.05.2026. Accepted: 28.06.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Прокопів Н. Географічна структура і господарська оцінка адвентивних видів урбанofлори Івано-Франківська. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 11-20. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.1>

Cite this article in APA style as:

Prokopiv, N. (2026). Neohrafichna struktura i hospodarska otsinka adventyvnykh vydiv urbanoflory Ivano-Frankivska [The geographical structure and economic assessment of adventive species in the urban flora of Ivano-Frankivsk]. *Biota. Human. Technology*. (2), 11-20. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.1> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Prokopiv N. [in Ukrainian: **Прокопів Н.**], PhD student, email: plosanska_n@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9896-7401>
Department of Biology and Ecology, Vasyl Stefanyk Carpathian National University
201-B Halytska Street, Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine

UDC 582.943

DOI: 10.58407/bht.2.26.2



Copyright (c) 2026 Svitlana Kormosh, Iryna Povlin, Inna Mytenko

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/).

Світлана Кормош, Ірина Повлін, Інна Митенко

АГРОБІОЛОГІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ГЕНОТИПУ *AGASTACHE FOENICULUM* (PURSH) KUNTZE) ТА ІНШИХ ВИДІВ РОДУ *AGASTACHE* L. У ФОРМУВАННІ СТАЛИХ АГРОФІТОЦЕНОЗІВ



Svitlana Kormosh, Iryna Povlin, Inna Mytenko

AGROBIOLOGICAL POTENTIAL OF GENOTYPE OF *AGASTACHE FOENICULUM* (PURSH) KUNTZE) AND OTHER GENUS SPECIES *AGASTACHE* L. IN THE FORMATION OF STABLE AGROPHYTOCENOSES

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Метою дослідження було здійснити комплексну агробіологічну оцінку нових генотипів роду *Agastache* в агрокліматичних умовах Карпатського регіону та визначити їхню придатність для формування сталих багаторічних агрофітоценозів.

Методологія. Дослідження проводили впродовж вегетаційних періодів 2021–2025 рр. у колекційно-інтродукційному розсаднику Інституту аграрних ресурсів та регіонального розвитку НААН. Дослідний матеріал охоплював вітчизняні сорти, місцеві селекційні лінії ЛАМ-1 і ЛАМ-2 та інтродуковані декоративні генотипи роду *Agastache*. У роботі поєднано фенологічні спостереження, аналіз тривалості міжфазних періодів, оцінку продуктивності рослин, розрахунок гідротермічного коефіцієнта Селянінова, відносної швидкості розвитку (V) та індексу інтенсивності (I) щодо стандартного сорту.

Наукова новизна. Обґрунтовано диференціацію генотипів роду *Agastache* за онтогенетичними стратегіями в умовах посилення гідротермічного стресу. Встановлено, що період 2021–2025 рр. характеризувався вираженою тенденцією до аридизації, з критично низькими значеннями гідротермічного коефіцієнта в окремі місяці. На цій основі дослідні зразки поділено на інтенсивний, помірний та екстенсивний типи розвитку.

Висновки. Зразок Black Adder виявив найвищу інтенсивність розвитку ($I=108,6\%$) і може розглядатися як генотип зі стратегією уникнення посухи завдяки прискореному проходженню фенологічних фаз. Сорт Лелека та нові селекційні лінії ЛАМ-1 і ЛАМ-2 сформували помірну групу ($I=89,8-91,7\%$) зі збалансованим ритмом онтогенезу, високою біологічною надійністю та доброю адаптацією до місцевого вегетаційного періоду. Генотипи Alabaster, Apache Sunset і Tangerine Dream належать до екстенсивної групи та характеризуються пролонгованим вегетативним розвитком і більшою залежністю від вологозабезпечення. Отримані результати свідчать, що ЛАМ-1 і ЛАМ-2 є перспективними генетичними ресурсами для селекції та моделювання сталих агрофітоценозів ефіроолійних і лікарських рослин в умовах мінливого клімату.

Ключові слова: рід *Agastache*, генотип, агрофітоценоз, гідротермічний коефіцієнт, фенологічна пластичність

ABSTRACT

Purpose of the work. The purpose of the study was to carry out a comprehensive agrobiological assessment of new genotypes of the genus *Agastache* under the agroclimatic conditions of the Carpathian region and to determine their suitability for the formation of stable agrophytocenoses.

Methodology. The research was conducted during the 2021–2025 growing seasons in the collection and introduction nursery of the Institute of Agricultural Resources and Regional Development of NAAS. The studied material included domestic varieties, local breeding lines LAM-1 and LAM-2, and introduced decorative genotypes of the genus *Agastache*. The analysis combined phenological observations, evaluation of interphase periods, assessment of productivity, and calculation of Selyaninov's hydrothermal coefficient, relative developmental rate (V), and intensity index (I).

Scientific novelty. The study substantiates the differentiation of *Agastache* genotypes according to their ontogenetic strategies under increasing hydrothermal stress. It was established that the 2021–2025 period was characterized by a pronounced tendency toward aridization, with critically low values of the hydrothermal coefficient in individual months. On this basis, the studied samples were divided into intensive, moderate, and extensive developmental types.

Conclusions. Black Adder showed the highest intensity of development ($I=108.6\%$) and can be regarded as a genotype with a strategy of drought avoidance due to the accelerated passage of phenological phases. The variety Leleka and the new breeding lines LAM-1 and LAM-2 formed a moderate group ($I=89.8\text{--}91.7\%$) with a balanced rhythm of ontogenesis, high biological reliability, and good adaptation to the local growing season. The genotypes Alabaster, Apache Sunset, and Tangerine Dream belonged to the extensive group and were characterized by prolonged vegetative development and higher dependence on moisture availability. The obtained results indicate that LAM-1 and LAM-2 are promising genetic resources for breeding and for modeling stable agrophytocenoses of essential oil and medicinal plants under changing climate conditions.

Key words: the genus *Agastache*, genotype, agrophytocenosis, hydrothermal coefficient, phenological plasticity

Вступ

У сучасних умовах глобальних екологічних трансформацій та антропо-генного тиску збереження і раціональне використання генетичних ресурсів стає стратегічним пріоритетом для сталого розвитку аграрного сектору. Стан світового агробіорізноманіття потребує негайних заходів щодо мобілізації та адаптації генофонду культурних рослин для забезпечення не лише продовольчої, а й нутриціологічної безпеки (FAO, 2019). Особливо гостро ця проблема постає для ефіроолійних та лікарських культур, які є джерелом унікальних біологічно активних сполук. Серед них особливе місце займають генотипи роду *Agastache*, що характеризується високою біологічною пластичністю та економічною цінністю.

Тенденція до переходу суспільства на засади здорового способу життя (Wellness-індустрія) зумовлює зростання попиту на натуральну ароматичну продукцію. Різноманітність асортименту харчових продуктів функціонального призначення потребує залучення нових видів сировини, багатих на антиоксиданти та ефірні олії. У цьому контексті лофант виділяється серед інших представників родини Lamiaceae своєю невибагливістю до агрокліматичних умов, тривалим періодом вегетації та стійкістю до патогенів (Rakhmetov et al., 2016).

Важливим науковим завданням є збагачення вітчизняного генофонду через інтродукцію нових цінних зразків, що дозволяє створювати вихідний матеріал для селекції адаптованих сортів. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції, розроблені академіком Д. Б. Рахметовим (2011),

вказують на те, що успішна акліматизація видів є фундаментом для фітодизайну та промислового рослинництва. Проте посилення аридності клімату, згідно зі звітами ІРСС (2022), висуває нові вимоги до адаптивного потенціалу інтродуцентів.

Дослідження фітохімічного профілю роду *Agastache* підтверджують значну варіабельність вторинних метаболітів – зокрема фенілпропаноїдів (естрагол) та терпенів – залежно від генотипу та едафічних чинників Piatczak et al., 2022). Це робить лофант перспективним об'єктом для сучасної фармакології, зокрема для створення протизапальних та антибактеріальних препаратів (Shanaida, 2021). Історичний досвід та сучасний аналіз поширення цих рослин у культурі підтверджують їхній високий потенціал як універсальних садових, медоносних та ефіроолійних форм (Ju Hyeon An et al., 2018).

Важливим напрямом у селекції з родом *Agastache* є створення форм з коротким періодом до фази цвітіння, що дозволило б сформувати повноцінний урожай продуктивної сировини і можливість повторного скошування отави. Для розширення і збереження, як видового так і сортового складу рослин, що використовуються у селекції з метою отримання декоративних і адаптованих до умов агрокліматичних зон сортів – інтродукція ароматичних та ефіроолійних рослин є надзвичайно важливим чинником. Тому, виходячи із вищевказаного метою роботи є комплексна агробіологічна оцінка нових генотипів роду *Agastache* за показниками адаптивності та морфо-біологічної пластичності для обґрунтування їх використання у формуванні сталих агрофітоценозів.

Для досягнення мети досліджень були вирішені наступні завдання: проаналізовані особливості росту та розвитку нових генотипів у конкретних ґрунтово-кліматичних умовах (визначені тривалість міжфазних періодів та темпи наростання біомаси), досліджені морфометричні параметри рослин (висота, облиствленість, площа асиміляційної поверхні) як індикатори реалізації агробіологічного потенціалу генотипів, оцінена стійкість досліджуваних зразків до стресових чинників довкілля та їхня здатність до самовідновлення в структурі агрофітоценозу, виділено найбільш перспективні генотипи за сукупністю агробіологічних ознак для подальшого впровадження у виробництво та селекційний процес.

Матеріали та методи дослідження

Важливим чинником збагачення сортового складу є інтродукція нових зразків світової флори. Колекція ІАРПП НААН постійно поповнюється новими інтродуцентами роду *Agastache*, а саме: *A. rupestris*, *A. rugosa*, *A. tibetica*. Попри значний потенціал, колекція ІАРПП НААН у період 2021–2023 років зазнала суттєвих втрат через кліматичну невідповідність окремих інтродуцентів. Повна загибель таких зразків, як Little Adder, Korean Zest та *Agastache tibetica*, свідчить про обмежену екологічну пластичність іноземних сортів.

На початок 2025 року в колекційно-інтродукційному розсаднику збереглося лише 9 зразків, зокрема сорти Початок, Лелека, Синій велетень, Alabaster, Apache Sunset, Black Adder, Tangerine Dream та форми ЛАМ-1, ЛАМ-2. Для розширення та збереження видового і сортового складу в умовах агрокліматичних змін головним етапом є порівняльна оцінка адаптивності та продуктивності інтродукованих та наявних генотипів лофанту.

Досліджено біологічний потенціал представників роду *Agastache* (зокрема *Agastache foeniculum* (Pursh) Kuntze), відомого у вітчизняній практиці під синонімічною назвою *Lophanthus anisatus* Benth.».

Вплив агрокліматичних чинників на морфо-фізіологічні показники та темпи розвитку представників роду *Agastache* є визначальним фактором його адаптивного потенціалу.

Аналіз табличних даних ГТК за період 2021–2025 рр. (табл. 1) дозволяє оцінити ступінь зволоження та теплозабезпеченості вегетаційних періодів лофанту. 2021–2022 роки (посушливий та екстремально посушливий періоди (ГТК за сезон – 0,6 та 0,1) характеризувався глибоким дефіцитом вологи, особливо в червні (0,2 й 0,0) та липні (0,4), що свідчить про практичну відсутність ефективних опадів на фоні високих температур.

Таблиця 1

Агрокліматична характеристика вегетаційних періодів 2021–2025 рр.

Місяць	ГТК					
	2021	2022	2023	2024	2025	СБП
Квітень	0,5	0,1	1,5	1,4	0,5	1,5
Травень	1,1	0,1	0,5	1,0	1,3	1,4
Червень	0,2	0,0	0,8	1,1	0,2	1,5
Липень	0,4	0,3	1,9	0,3	1,8	1,3
Серпень	1,1	0,4	0,6	0,1	0,3	1,1
Вересень	0,3	4,4	1,0	1,9	0,4	1,1
За період квітень-вересень	0,6	0,1	1,1	1,0	0,8	1,3

Примітка: Джерело сформовано авторами за даними Закарпатського обласного центру з гідрометеорології (Transcarpathian Center for Hydrometeorology, n.d.).

Такі умови є екстремальним стресом для інтродуцентів, що призводить до вимушеного спокою або передчасного завершення вегетації. Це критично для лофанту, оскільки

саме в червні відбувається інтенсивне наростання вегетативної маси. Вересень також був сухим (0,3 у 2021 році) і надмірно вологим у 2022 році (4,4), але ці показники

вже не мали суттєвого значення для основного етапу онтогенезу. 2023–2024 роки: оптимально-помірні періоди (ГТК 1,1 та 1,0). Ці роки були найбільш сприятливими для культури. У 2023 році достатнє зволоження на старті (квітень – 1,5) та в період цвітіння (липень – 1,9) забезпечило високий вихід зеленої маси. У 2024 році рівномірний розподіл вологи у першій половині літа (травень–червень ГТК 1,0–1,1), проте серпень був критично сухим (0,1), що сприяло швидкому досягненню насіння. 2025 рік: (недостатньо вологий, ГТК за сезон = 0,8) із вираженою нерівномірністю. Сухий старт (0,5) та сухий червень (0,2) стримували ріст, проте липень (1,8) компенсував дефіцит вологи, забезпечивши соковитість суцвіть під час збору сировини.

Загальний сезонний показник середніх багаторічних показників (СБП) становив 1,3, що відповідає зоні достатнього зволоження. Аналіз 2021–2025 років демонструє чітку тенденцію до аридизації (опустелювання) клімату в Карпатському регіоні, до якого віднесено і територію ІАППР НААН: 1) дефіцит вологи: жоден з досліджуваних років не досяг рівня СБП за весь сезон; 2) червневий провал: у чотирьох з п'яти років червень був суттєво сухішим за норму (1,5), що є лімітуючим фактором для формування врожаю зеленої маси; 3) температурна компенсація: оскільки ГТК – це відношення опадів до температур, низькі значення свідчать не лише про відсутність дощів, а й про аномально високі температури, що підсилюють випаровування. Генотипи роду *Agastache*, як інтродуценти, гостро реагують на відхилення гідротермічного режиму від оптимальних значень, що модулює не тільки тривалість міжфазних періодів, а й біологічний профіль сировини.

Отже, дослідження проводили впродовж 2021–2025 рр. на дослідних полях Інституту

аграрних ресурсів та регіонального розвитку НААН України (с. Велика Бакта, Берегівський р-н, Закарпатська обл.), які за агрокліматичними умовами характеризуються помірно-континентальним кліматом із достатнім зволоженням, проте значною мінливістю температурного режиму за роками вегетації.

Методологія закладання польових дослідів базувалася на загальноприйнятих принципах наукових досліджень в агрономії. У роботі поєднано фенологічні спостереження, аналіз тривалості міжфазних періодів, оцінку продуктивності рослин, розрахунок гідротермічного коефіцієнта Селянінова, відносної швидкості розвитку (V) та індексу інтенсивності (I) щодо стандартного сорту (Bondarenko & Yakovenko, 2001; Andrushchenko & Kryvytskyi, 2007; Rakhmetov, 2011).

Результати дослідження та обговорення

Фенологічний моніторинг є ключовим інструментом оцінки адаптивного потенціалу інтродукованих видів, оскільки ритми розвитку рослин безпосередньо відображають їхню реакцію на зміну екологічних чинників. У ході досліджень 2021–2025 рр. було встановлено, що темпи онтогенезу нових генотипів роду *Agastache* визначалися специфікою гідротермічного режиму, зокрема значними відхиленнями показників зволоження від середньобагаторічних значень.

Отримані результати дозволяють диференціювати дослідні генотипи за ступенем їхньої адаптованості до аридних умов та оптимізувати технологічні схеми вирощування лікарської сировини в умовах мінливого клімату.

Встановлено, що терміни відновлення весняної вегетації залежали від генотипових особливостей зразків (табл. 2).

Таблиця 2

Характеристика колекційних генотипів роду *Agastache* за вегетаційним періодом (середнє за 2021–2025 рр.)

Зразки	Тривалість вегетаційного періоду від масових сходів до фаз, діб			
	відростання рослин	цвітіння	достигання насіння	відхилення від стандарту $\pm$
1	2	3	4	5
Початок (St)	10-19.04	88	138	–
ЛАМ-1	17-20.04	98	143	+5

Продовження Таблиці 2

1	2	3	4	5
ЛАМ-2	18-20.04	98	143	+5
Лелека	10-11.04	96	132	-6
Синій велетень	20-21.04	90	127	-11
Alabaster	20.04	108	132	-6
Apache Sunset	17.04	113	насіння не утворюється	-
Black adder	26-28.03	81	145	+7
Tangerine Dream	12-20.04	90	насіння не утворюється	-
НІР ₀₅		2,3	1,1	

Дані таблиці 2 демонструють значну генетичну мінливість дослідних зразків за показником початку весняного відростання. Це критично важливий етап, оскільки він визначає тривалість всього вегетаційного періоду та здатність виду і сорту максимально ефективно використовувати весняні запаси вологи в ґрунті.

Початок весняного відростання є першим індикатором адаптації інтродуцентів до умов середовища. Для генотипів роду *Agastache* цей процес тісно пов'язаний із переходом середньодобових температур через поріг +5...7°C та станом кореневої системи після перезимівлі. Аналіз отриманих даних дозволяє згрупувати дослідні зразки за темпами ініціації вегетації.

Абсолютним лідером за темпами відновлення вегетації виявився зразок Black Adder, який розпочав відростання ще у третій декаді березня (26-28.03). Це свідчить про низький температурний поріг активації фізіологічних процесів та високу зимостійкість даного генотипу. До групи ранніх також належить сорт Лелека (10-11.04), який стабільно випереджає стандарт та інші зразки на 7-10 діб. Ранній старт цих зразків дозволяє їм сформувати потужну розетку листя до настання червневого дефіциту вологи, що є важливою адаптивною перевагою в умовах агрозони. Раннє відростання зразка Black Adder створює передумови для отримання більш ранньої та якісної лікарської сировини, а також потенційно дозволяє отримати другий укіс (отаву) в цих умовах. Зазначимо, що хоча ранній старт (Black Adder, Лелека) є перевагою для накопичення біомаси, такі зразки можуть потрапляти під ризик пізньовесняних заморозків.

Більшість дослідних зразків, за виключенням контролю (St, 10-19.04), Apache Sunset (17.04) та Tangerine Dream (12-20.04), демонструють помірні темпи розвитку. Початок їх вегетації припадає на другу декаду квітня, що корелює із середньобагаторічними даними для даної кліматичної зони. Коливання термінів у межах 8-10 діб у зразка Tangerine Dream вказує на його вищу чутливість до мінливості весняних температур. Зразки ЛАМ-1 (17-20.04), ЛАМ-2 (18-20.04), Alabaster (20.04) та Синій велетень (20-21.04) характеризуються найбільш пізнім відростанням. Затримка старту вегетації на 10-25 днів порівняно з Black Adder обумовлена довшим періодом глибокого спокою, що може бути захисним механізмом від пізніх весняних приморозків.

Диференціація генотипів за тривалістю міжфазного періоду «сходи – початок цвітіння» є критично важливою для селекції, оскільки цей етап визначає оптимальне вікно для збору лікарської сировини. Тому за результатами досліджень всі зразки диференційовані на три групи, а саме:

Група I – швидкі (спринтери) – < 90 діб. Зразки Black Adder (81 доба) й Початок (St) (88 діб) максимально ефективно використовують стартові запаси вологи та швидко накопичують суму активних температур для переходу до репродукції, демонструють стабільний розвиток. Мають найкоротший вегетативний період. Це дозволяє проводити перший укіс уже в середині червня, що відкриває можливість для повноцінного другого укусу (отави).

Група II – середньостиглі (стабільні) – 90-100 діб. Найбільш чисельна група, яка поєднує достатній час для формування

вегетативної маси з вчасним вступом у фазу цвітіння. Синій велетень та Tangerine Dream (по 90 діб) демонструють інтенсивний темп розвитку. Попри те, що відростання у них може бути пізнішим, вони «надолужують» час на етапі інтенсивного росту стебла. Лелека (96 діб) зразок вітчизняної селекції, що стабільно входить у цвітіння на 8 діб пізніше стандарту. ЛАМ-1 та ЛАМ-2 (98 діб) – нові генотипи, що характеризуються помірним темпом розвитку. Вони формують щільніший кущ за рахунок довшого вегетативного періоду.

Група III – пізньостиглі (гіганти) – > 100 діб. Зразки з подовженим циклом вегетативного росту. Вони формують найбільшу біомасу, але вимагають стабільного зволоження у липні та потребують значно більшої суми активних температур для переходу до генеративної фази, що необхідно враховувати при плануванні укосів.

Alabaster (108 діб) потребує на 20 діб більше часу порівняно зі стандартом для

ініціації цвітіння. А Apache Sunset (113 діб) – найбільш пізній генотип. Його розвиток пролонгований майже на місяць порівняно з лідером групи (Black Adder). Це робить його ідеальним для пізньолітнього медозбору.

Якісним показником, що відображає швидкість проходження рослиною етапів онтогенезу в одиницю часу є відносна інтенсивність розвитку. Якщо тривалість фази в днях є кількісною характеристикою, то інтенсивність ($V=1/n$) вказує на біологічну «напруженість» фізіологічних процесів. В умовах інтродукції цей показник є вирішальним для оцінки адаптивності. Висока інтенсивність розвитку часто є механізмом екологічного уникнення несприятливих умов (наприклад, літньої посухи), тоді як низька інтенсивність свідчить про стратегію максимального нарощування вегетативної потужності. Аналіз інтенсивності дозволяє виявити генотипи, які найбільш раціонально використовують гідротермічні ресурси регіону (табл. 3).

Таблиця 3

Відносна інтенсивність розвитку генотипів (період «сходи–цвітіння»), середнє за 2021–2025 рр.

Генотип	Діб (n)	Швидкість (V)	Інтенсивність до St (%)	Статус
Black Adder	81	0,0123	108,6 %	Надінтенсивний
Початок (St)	88	0,0114	100,0 %	Контроль (Еталон)
Синій велетень	90	0,0111	97,8 %	Висока інтенсивність
Tangerine Dream	90	0,0111	97,8 %	
Лелека	96	0,0104	91,7 %	Помірна інтенсивність
ЛАМ-1/ЛАМ-2	98	0,0102	89,8 %	
Alabaster	108	0,0093	81,5 %	Низька інтенсивність
Apache Sunset	113	0,0088	77,9 %	Мінімальна інтенсивність

Період «сходи-початок цвітіння» є фундаментом продуктивності, оскільки саме в цей час закладається архітектоніка куща та синтезується первинна біомаса. Показники відносної інтенсивності розвитку дозволяють перевести кількісні показники (кількість діб) у якісну оцінку «біологічної швидкості» онтогенезу. Це важливо для розуміння того, наскільки ефективно генотип використовує наявні ресурси тепла та вологи.

У досліджуваній колекції спостерігається значна амплітуда коливання інтенсивності – від 0,0123 (Black Adder) до

0,0088 (Apache Sunset). Тому, колекційні зразки диференційовані на чотири групи, а саме:

- група «Спринтерів» (Black Adder): цей зразок демонструє найвищу інтенсивність розвитку на початкових етапах. Це дозволяє йому завершити формування першого врожаю за найкоротший термін (81 доба), що на 8,6 % швидше за еталонний зразок. Така стратегія забезпечує гарантований збір якісної сировини до настання критичних липневих температур, тобто, дозволяє рослині завершити

вегетативну фазу до настання літнього піку аридності (червневої посухи), що ми бачили в аналізі ГТК для регіону.

- Група «Стабільної норми» (Синій велетень, Tangerine Dream): їхня інтенсивність розвитку лише на 2,2 % нижча за стандарт. Це свідчить про високу адаптивність цих генотипів до місцевих умов – вони практично ідентичні до еталонного зразка за темпами проходження фаз.
- Група «Повільного накопичення» (Alabaster, Apache Sunset): ці зразки розвиваються на 18,5–22,1 % повільніше за стандарт. Така стратегія онтогенезу вказує на «гігантський» тип розвитку – рослини витрачають більше часу на побудову складної морфологічної структури куща та накопичення вторинних метаболітів. Подовження вегетативного етапу до 108–113 діб сприяє формуванню більшої кількості пагонів другого та третього порядків, що підвищує декоративність, але подовжує час до отримання товарної продукції. Однак вони є критично залежними від наявності опадів у другій половині вегетації.
- Група «Помірної інтенсивності розвитку» (90–95 % відносно стандарту) представлена зразками Лелека, ЛАМ-1 та ЛАМ-2. Дані генотипи характеризуються збалансованим ритмом онтогенезу, де тривалість вегетативної фази (96–98 діб) забезпечує оптимальне співвідношення між темпами росту та накопиченням вторинних метаболітів. Помірні темпи проходження фенофаз свідчать про високу онтогенетичну стабільність цих зразків та їхню здатність до повної реалізації генетичного потенціалу в умовах помірно вологих років.

Показники швидкості розвитку в межах 0,0102–0,0104 свідчать про те, що дані генотипи проходять етап від сходів до цвітіння на 8,3–10,2 % повільніше, ніж стандартний зразок (St, $V=0,0114$). Така стратегія онтогенезу визначається як «помірно-консервативна». Зниження інтенсивності розвитку на ~10 % порівняно зі

стандартом дозволяє рослинам груп Лелека та ЛАМ сформувати потужнішу архітектоніку куща. Довший період до цвітіння (96–98 діб) сприяє збільшенню кількості міжвузлів та площі листкової поверхні, що є критичним для ефіро-олійних культур. Завдяки помірній швидкості, ці зразки демонструють високу пластичність. Вони «не поспішають» вступати у генеративну фазу за перших ознак потепління, що захищає їх від можливих зворотних весняних холодів.

Аналіз інтенсивності у 89,8–91,7 % відносно еталона вказує на те, що ці генотипи ідеально адаптовані до довготривалого вегетаційного періоду регіону. Вони планомірно використовують суму активних температур, завершуючи формування врожаю в період найбільш стабільних гідротермічних показників (кінець липня – початок серпня).

Отже, диференціація за інтенсивністю розвитку дозволяє рекомендувати Black Adder як найбільш стійкий до весняно-літніх посух генотип. Натомість генотипи групи помірної інтенсивності (Лелека, ЛАМ-1, ЛАМ-2) складають основу для створення стабільних агрофітоценозів. Показник швидкості розвитку $V=0,010$ є індикатором високої біологічної надійності: рослини не піддаються швидкому «старінню» (переходу до насіння), що подовжує технологічне вікно збору лікарської сировини. На відміну від ультраранніх зразків, дані генотипи орієнтовані на максимальний вихід зеленої маси з одиниці площі, що досягається саме за рахунок помірних, генетично детермінованих темпів онтогенезу.

Показник тривалості періоду до досягання насіння характеризує загальну довжину вегетаційного циклу та здатність зразка формувати повноцінний насіннєвий матеріал. Цей період інтегрує всі адаптивні реакції рослини та визначає її здатність до повноцінного відтворення (самовідтворення) у нових умовах.

Загальна тривалість життя рослин коливалася в межах 127–146 діб. Проте, лідери за швидкістю на етапі цвітіння не завжди залишаються лідерами на етапі дозрівання.

Зразок Синій велетень демонструє найбільш гармонійне поєднання інтен-

сивності. Попри середні темпи зацвітання, він найшвидше завершує повний цикл (127 діб, що на 11 діб менше за стандарт). Це робить його найбільш «захищеним» від осінніх погодних ризиків і найбільш перспективним для зон із коротким безморозним періодом.

Найдовшим періодом вегетації вирізняються Tangerine Dream (146 діб) та Black Adder (145 діб). Цікаво, що Black Adder, попри ранній початок цвітіння, має тривалий період плодоутворення. Велика кількість часу між цвітінням і збором насіння (64–56 діб) сприяє кращій виповненості насіннєвого матеріалу та вищій масі 1000 насінин.

За загальною господарською оцінкою зразків за темпами дозрівання встановлено, що до ранньостиглих можна віднести Синій велетень (-11 діб), Лелека та Alabaster (-6 діб), що суттєво випереджають стандарт за термінами завершення вегетації.

Колекційні зразки ЛАМ-1 та ЛАМ-2 демонструють помірне відхилення від стандарту (+5 діб), що вказує на їхню високу стабільність та пристосованість до тривалого вегетаційного періоду. Зразок Tangerine Dream демонструє схильність до подовження вегетації, що в умовах Карпатського регіону дозволяє їм максимально використовувати осінній період.

Отримані дані підтверджують, що скорочення тривалості формування насіння у пізньостиглих інтродуцентів є

адаптивною реакцією на зниження середньодобових температур у кінці сезону, що може обмежувати їхню насіннєву продуктивність у північних регіонах України.

За результатами досліджень встановлено специфіку репродуктивної біології інтродуцентів в умовах низинної зони Закарпаття. Зокрема, зразки Apache Sunset та Tangerine Dream за даної лімітації гідротермічних умов подовжується фаза цвітіння, однак вони не формують життєздатного насіння, що зумовлює можливість їхнього відтворення виключно вегетативним способом.

Кореляція між датою відростання та загальною тривалістю вегетації не завжди є прямою. Наприклад, Black Adder має найраніший старт, але один із найпізніших термінів досягання насіння, що вказує на розширений репродуктивний період. Водночас Синій велетень демонструє стратегію «стисненого» розвитку, швидко проходячи всі етапи від цвітіння до формування насіння. Ці дані є базовими для створення стабільних агрофітоценозів, оскільки дозволяють комбінувати зразки з різними ритмами розвитку для безперервного отримання сировини.

На основі вищенаведених даних та статистичного показника $HP_{05}(2,3 \text{ доби})$, дослідні зразки можна розділити на три чіткі групи за темпами проходження фенологічних фаз (табл. 4).

Таблиця 4

Узагальнена характеристика генотипів за темпами розвитку

Група	Генотипи	Особливості онтогенезу
Інтенсивний тип	Black Adder, Синій велетень	Швидкий перехід до генеративної фази; висока ефективність використання весняної вологи.
Збалансований тип	Початок (St), Лелека, ЛАМ-1, ЛАМ-2	Рівномірне проходження фаз; найвища відповідність середньобагаторічним кліматичним нормам.
Екстенсивний тип	Apache Sunset, Alabaster, Tangerine Dream	Уповільнений розвиток; формування великої кількості квітучих пагонів; висока потреба у теплі та волозі на пізніх етапах.

Встановлено, що відносна інтенсивність розвитку лофанту є генетично детермінованою ознакою, яка суттєво корегується гідротермічними умовами. Найвищу адаптивну здатність в умовах Закарпаття виявили зразки *інтенсивного типу*, які завершують основні фази розвитку в період

найбільш сприятливого співвідношення тепла та вологи (травень-червень), уникаючи глибокої серпневої посухи.

Отже, аналіз міжфазних періодів свідчить про високу пластичність культури, проте виявляє чітку залежність тривалості вегетації від динаміки гідротермічного

коефіцієнта. Екстремальні умови 2021–2022 рр. (ГТК 0,1–0,6) спричинили трансформацію фенологічної кривої: спостерігалось явище «фенологічного стиснення», де дефіцит вологи на фоні високих температур призводив до примусового скорочення репродуктивних фаз. Натомість у помірно зволожені роки (2023–2024 рр.) ритм розвитку зразків відповідав біологічній нормі виду, що забезпечило максимальну тривалість періоду масового цвітіння.

При формуванні продуктивності виявлено зворотну кореляцію між швидкістю та виходом біомаси: ранньостиглі форми характеризуються короткими термінами накопичення сировини за відносно низької врожайності, тоді як пізньостиглі генотипи мають пролонгований період формування товарної маси з високими показниками виходу продукції. Попередній аналіз гібридного матеріалу свідчить, що при схрещуванні контрастних за стиглістю форм домінує тенденція до формування ранньостиглих нащадків із проміжною продуктивністю. Це відкриває перспективи цілеспрямованого добору пізньостиглої батьківської компоненти для скорочення вегетаційного періоду за окремими міжфазними етапами у потомстві.

Попри складні кліматичні умови останніх 5 років, досліджувані зразки виявили високий рівень адаптивності, сформувавши компактні, добре облистяні

кущі. За морфо-біологічними ознаками генофонд диференційовано на дві групи: 1) колекційні адаптовані зразки (вітчизняні сорти та місцеві форми): характеризуються потужним габітусом. Висота рослин варіювала від 78,9 см (сорт Початок) до 101,4 см (ЛАМ-1), діаметр куща – від 39,3 до 51,8 см. Показник багатостебловості досягав 5 шт. (ЛАМ-1, Лелека, Синій велетень); 2) декоративні інтродуценти: відзначаються компактністю (висота 63,5–80,0 см) та інтенсивним пагоноутворенням. Особливістю цієї групи є видовжена ланцетоподібна форма листової пластинки із зелено-сірим забарвленням та збільшена кількість суцвіть першого порядку (до 10 шт. у Apache Sunset).

За результатами багатофакторного аналізу морфологічних ознак виділено групу лідерів, що поєднують максимальну кількість позитивних селекційних характеристик, а саме: серед колекційних зразків: Лелека та Синій велетень (8 ознак), ЛАМ-1 (7 ознак); серед декоративних інтродуцентів: Apache Sunset (9 ознак) та Tangerine Dream (6 ознак).

Аналіз кількісних показників продуктивності (табл. 5) свідчить про суттєву генотипову диференціацію зразків за основними господарсько-цінними ознаками. Усереднені дані за 2021–2025 рр. відображають вплив агрокліматичних умов періоду досліджень на формування біомаси та структуру врожаю.

Таблиця 5

**Продуктивність ароматичної сировини різних видів роду
Agastache, середнє за 2021–2025 рр.**

Зразок (форма)	Урожайність, т/га	Маса рослини, г	Вихід листків і суцвіть, %
Початок (St)	5,4	113,5	56,4
ЛАМ-1	7,2	146,0	60,3
ЛАМ-2	7,6	189,3	54,3
Лелека	6,8	158,0	50,2
Синій велетень	7,9	159,9	52,0
Alabaster	5,8	100,8	49,1
Apache Sunset	4,2	80,7	43,6
Black Adder	3,8	78,1	45,9
Tangerine Dream	4,3	78,3	40,7
HIP ₀₅	0,52	6,52	-

Показник індивідуальної продуктивності зразків варіював у широкому діапазоні: маса однієї рослини становила від 78,1 г/росл. (у сорту Black adder) до 189,3 г/росл. (у форми ЛАМ-2). Відповідно, урожайність ароматичної сировини корелювала з масою рослин і знаходилася в межах від 3,8 т/га до 7,9 т/га. Максимальні показники врожайності зафіксовано у вітчизняних та місцевих генотипів. За масою однієї рослини переважав зразок ЛАМ-2 (189,3 г), що забезпечило врожайність на рівні 7,6 т/га. Найвищу врожайність у досліді продемонстрував сорт Синій велетень (7,9 т/га) при масі рослини 159,9 г. Генотип ЛАМ-1 також виявив стабільно високий результат: урожайність 7,2 т/га при масі рослини 146,0 г, що достовірно перевищує показники стандарту (сорт Початок) на 33,3 % ($HP_{05} = 0,52$ т/га). Такі результати свідчать про високий адаптивний потенціал цих зразків та їхню здатність до інтенсивного накопичення вегетативної маси в умовах Закарпаття.

Іноземні інтродуценти (Apache Sunset, Black Adder, Tangerine Dream) продемонстрували найнижчу продуктивність у досліді. Їхня врожайність варіювала в межах 3,8–4,3 т/га, що суттєво нижче за стандарт (5,4 т/га). Маса однієї рослини у цих зразків не перевищувала 80,7 г.

Особливу увагу приділено структурі врожаю, зокрема виходу продуктивної частини (суцвіття та листки), що коливався від 40,7 % до 60,3 %. Встановлено, що декоративні форми характеризуються достовірно нижчим вмістом корисної фракції порівняно з колекційними зразками. Це зумовлено їхніми морфологічними особливостями: наявністю дрібних листових пластинок та формуванням суцвіть за типом волоті або китиці (Tangerine Dream – 40,7 %, Apache Sunset – 43,6 %, Black Adder – 45,9 %).

За сукупністю показників урожайності та накопичення біомаси виділено групу найбільш перспективних генотипів для отримання рослинної сировини: Синій велетень (7,9 т/га; 159,9 г/росл.); ЛАМ-2 (7,6 т/га; 189,3 г/росл. 54,3 %); ЛАМ-1 (7,2 т/га; 146,0 г/росл., 60,3 %). Серед інтродукованого декоративного матеріалу відносно кращі результати продемонстрували зразки

Alabaster (5,8 т/га, 100,8 г/росл., 49,1 %) та Black Adder (3,8 т/га, 78,1 г/росл., 45,9 %).

Адаптивність генотипів є фундаментальним показником їхньої селекційної цінності, оскільки здатність рослин нівелювати вплив лімітуючих факторів довілля визначає стабільність майбутніх сортів. У зв'язку з цим, подальший етап селекційної роботи з *Agastache* передбачає комплексний аналіз параметрів адаптивності за наступними критеріями: коефіцієнт екологічної пластичності (b_i); специфічна адаптивна здатність (САЗ) і загальна селекційна цінність генотипу (СЦГ).

Комплексна оцінка адаптивного потенціалу за ознакою «урожайність ароматичної сировини» дозволила диференціювати досліджувані зразки за їхньою реакцією на мінливість умов довкілля і виділити групу генотипів з високою екологічною стабільністю ($b_i < 1$). Найменшу чутливість до лімітуючих факторів середовища виявили: генотип ЛАМ-1 ($b_i = 0,44$), сорти Синій велетень ($b_i = 0,75$), Лелека (0,84) та інтродуцент Black Adder (0,87), що свідчить про їхню здатність зберігати стабільну продуктивність у стресових агрокліматичних умовах і є цінними для селекції на адаптивність. Найвищі значення САЗ зафіксовано у зразків Alabaster (1750,5), ЛАМ-2 (1471,8) та Tangerine Dream (1216,9). Висока САЗ вказує на значний генетичний потенціал цих форм, який найповніше розкривається при оптимізації технології вирощування.

Інтегральна оцінка СЦГ дозволила визначити зразки з найбільш вдалим поєднанням високої середньої врожайності та стабільності.

Отже, пріоритетне значення для подальшого залучення у селекційний процес мають: Apache Sunset (СЦГ=33,6) – лідер за інтегральним показником; Початок (СЦГ=23,0) – стабільний стандарт; ЛАМ-1 (СЦГ=18,4) та Black Adder (СЦГ=17,8).

Висновки

Встановлено, що вегетаційні періоди 2021–2025 рр. характеризувалися вираженою тенденцією до аридизації, що підтверджується зниженням гідротермічного коефіцієнта (ГТК) до критичних значень (0,0–0,1) у червні та серпні. Такі умови виступали лімітуючим фактором, що

зумовив диференціацію дослідних генотипів за ступенем їхньої адаптивності.

Досліджувані зразки виявили значну генетичну мінливість за темпами онтогенезу. Встановлено амплітуду весняного відростання у 30 діб (від 26.03 у Black Adder до кінця квітня у ЛАМ-2) та розбіжність у загальній тривалості вегетації від 127 (Синій велетень) до 146 діб (Tangerine Dream).

На основі розрахунків відносної швидкості (V) виділено три стратегії розвитку: інтенсивна: (Black Adder, I=108,6 %) – тип «уникнення посухи» завдяки прискореному проходженню фаз; помірна: (Лелека, ЛАМ-1, ЛАМ-2, I=90-92 %) – збалансований тип, що демонструє

найвищу онтогенетичну стабільність та синхронність із кліматичною нормою регіону й екстенсивна: (Alabaster, Apache Sunset, I < 82 %) – «гігантський» тип із пролонгованим вегетативним періодом, що потребує додаткових заходів вологозбереження.

Нові генотипи ЛАМ-1 та ЛАМ-2 за показниками швидкості розвитку (V=0,0102) та тривалістю вегетації (143 доби) виявилися найбільш перспективними для створення стабільних агрофітоценозів у цьому регіоні. Їхня помірна інтенсивність розвитку забезпечує оптимальний баланс між накопиченням біомаси та стійкістю до гідротермічного стресу.

Фінансування / Funding

Дослідження не отримало зовнішнього фінансування / The research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Первинні дані дослідження автори нададуть на запит зацікавлених осіб / The authors will provide the primary research data upon request to interested parties.

Подяка / Gratitude

Автори висловлюють подяку Інституту аграрних ресурсів та регіонального розвитку НААН за надання дослідницьких ресурсів / The authors express their gratitude to the Institute of Agrarian Resources and Regional Development of the NAAS for providing the research facilities.

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

Під час підготовки цього рукопису використано штучний інтелект для оптимізації опису даних. Після використання цього інструменту автори ретельно переглянули та відредагували вміст за потреби та несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію / During the preparation of this manuscript uses artificial intelligence to optimize data description. Following the application of this tool, the authors thoroughly reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the final published version.

References

Andrushchenko, A. V., & Kryvytskyi, K. M. (2009). Methodology for conducting examination of anise hyssop varieties (*Lophanthus anisatus* Benth.) for DUS. Methodology for conducting an examination of plant varieties of the medicinal and essential oil group for distinctiveness, uniformity and stability (VOS) (DUS) (PP. 360–369). <https://sops.gov.ua/uploads/page/5a5f1d0aefa2c.pdf> (in Ukrainian)

Андрущенко А. В., Кривицький К. М. Методика проведення експертизи сортів лофанту анісового (*Lophanthus anisatus* Benth.) на ВОС // Методика проведення експертизи сортів рослин групи лікарських та ефіроолійних на відмінність, однорідність та стабільність (ВОС). 2009. С. 360–369. <https://sops.gov.ua/uploads/page/5a5f1d0aefa2c.pdf>

Bondarenko, H. L., & Yakovenko, K. I. (Eds.). (2001). *Methodology of experimental work in vegetable and melon growing* (3rd ed., rev. and suppl.). Osnova. (in Ukrainian)

Методика дослідної справи в овочівництві і баштанництві / за ред. Г. Л. Бондаренка, К. І. Яковенка. Харків: Основа, 2001. 369 с.

FAO. (2019). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca3129en>

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

Ju Hyeon An, Heung Joo Yuk, Doo-Young Kim, Chu Won Nho, Dongho Lee, Hyung Won Ryu. (2018). Evaluation of phytochemicals in *Agastache rugosa* (Fisch. & C.A.Mey.) Kuntze at different growth stages by UPLC-QToF-MS. *Industrial Crops and Products*, 112, P. 608-616. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.050>

Piatczak, E., Kolniak-Ostek, J., Kozłowska, W., Bielcka, M., Stafiniak, M., Pencakowski, B., Sobiecka, A., Płachno, B., Matkowski, A., & Zielińska, S. (2022, August 28–31). *Polyphenolic profile in hairy root cultures of Agastache rugosa* (Fisch. & C. A. Mey.) Kuntze [Conference presentation]. 70th International Congress and Annual Meeting of the Society for Medicinal Plant and Natural Product Research (GA), Thessaloniki, Greece. *Planta Med.*, 88, 1388–1389 <https://doi.org/10.1055/a-1950-7375> ISSN 0032-0943

Rakhmetov, D. B. (2011). *Theoretical and applied aspects of plant introduction in Ukraine*. Agrarian Science. (in Ukrainian)

Рахметов Д. Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні. Київ : Аграрна наука, 2011. 398 с.

Rakhmetov, D. B., Kalevska, S. M., & Rakhmetov, S. O. (2016). Introduction of new and less common medicinal plants in Ukraine. In *Medicinal plants: Traditions and perspectives of research: Materials of the III International Conference* (pp. 71–73). <https://dslr.com.ua> (in Ukrainian)

Рахметов Д. Б., Калевська С. М., Рахметов С. О. Інтродукція нових та малопоширених лікарських рослин в Україні. Лікарські рослини: традиції та перспективи досліджень : матеріали III міжнар. конф. Березоточа, 2016. С. 71–73. <https://dslr.com.ua>.

Transcarpathian Center for Hydrometeorology. (n.d.). *Data of the Berehove meteorological station*. Retrieved 2021-2025, from <http://gmc.uzhgorod.ua/metdata.php?StNo=33634>.

Закарпатський центр з гідрометеорології. (б. д.). Дані метеорологічної станції Берегово. Звернення 2021-2025. <http://gmc.uzhgorod.ua/metdata.php?StNo=33634>

Shanaida, M. I. (2021). Phytochemical analysis of terpenoid compounds in the raw material of some representatives of the tribe Mentheae (family Lamiaceae). *Pharmaceutical Journal*, (3), 5–13. <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2021.3.12387>

Шанайда М. І. Фітохімічний аналіз сполук терпенової природи в сировині деяких представників триби Mentheae (родина Lamiaceae). *Фармацевтичний часопис*, (3), 5–13. <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2021.3.12387>

Received: 10.06.2026. Accepted: 20.07.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Кормош С., Повлін І., Митенко І. Агробіологічний потенціал генотипу *Agastache foeniculum* (Pursh) Kuntze та інших видів роду *Agastache* L. у формуванні сталих агрофітоценозів. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 21-33. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.2>

Cite this article in APA style as:

Kormosh S., Povlin I., Mytenko I. (2026). Ahrobiolohichniyi potentsial henotypu *Agastache foeniculum* (Pursh) Kuntze ta inshykh vydiv rodu *Agastache* L. u formuvanni stalykh ahrofitotsenoziv [Agrobiological potential of genotype of *Agastache foeniculum* (Pursh) Kuntze and other genus species *Agastache* L. in the formation of stable agrophytocenoses]. *Biota. Human. Technology*, (2), 21-33. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.2> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Kormosh S. [in Ukrainian: **Кормош С.**] ¹, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, e-mail: korsveta1967@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1694-8280

Institute of Agricultural Resources and Regional Development of NAAS, Head of the Laboratory of Rare Vegetable and Spice Crops
17 Svobody Avenue, Velyka Bakta, Zakarpattia region, 90252, Ukraine

Povlin I. [in Ukrainian: **Повлін І.**] ², Doctor of Philosophy (PhD) in Agricultural Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, email: polin.iren@kmf.org.ua

ORCID: 0000-0001-6028-6168

Department of Biology and Chemistry, Ferenc Rákóczi II Transcarpathian Hungarian University
6 Kossuth Square, Berehove, 90202, Ukraine

Mytenko I. [in Ukrainian: **Митенко І.**] ³, Doctor of Philosophy (PhD) in Agricultural Sciences, Researcher, email: mytenko.iob@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8571-937X

Institute of Vegetable and Melon Growing of NAAS, Laboratory of Genetics, Genetic Resources and Biotechnology
1 Instyutyska Street, Seleksiynе, Kharkiv region, 62478, Ukraine

¹ Study design, data collection, manuscript preparation.

² Study design, data collection, manuscript preparation.

³ Data collection, manuscript preparation.

UDC 502.17(477.51-751)

DOI: 10.58407/bht.2.26.3



Copyright (c) 2026 Tetiana Ivus, Yurii Karpenko

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 Івусь, Юрій Карпенко

ФІТОСОЗОЛОГІЧНА ЦІННІСТЬ ДІЛЯНКИ РІЧКИ ВЗДВИЖИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИРОДООХОРОННОГО ОБ'ЄКТА



Tetiana Ivus, Yurii Karpenko

PHYTOSOZOLOGICAL VALUE OF A SECTION OF THE VZDVYZHA RIVER AS A POTENTIAL NATURE CONSERVATION SITE

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Метою роботи є науково-екологічне обґрунтування доцільності розширення локальної екомережі Чернігівської області шляхом створення нового об'єкта природно-заповідного фонду (далі ПЗФ) – ботанічного заказника місцевого значення «Петрові плавні». Дослідження спрямоване на визначення созологічної цінності флори макрофітів у долині малої річки Вдзвижа, встановлення ступеня збереженості природних комплексів.

Методологія. Основу дослідження складала аналіз наукових джерел інформації та багаторічні польові дослідження авторів, проведені методом маршрутно-флористичного та фітоценотичного обстеження руслової й заплавної частин річки Вдзвижа. Головним критерієм визначення меж та природоохоронної цінності проекту ми обрали наявність стабільних популяцій рідкісних і вразливих видів рослин, а також ценозів, внесених до охоронних переліків.

Наукова новизна. Вперше здійснено комплексний аналіз екологічного потенціалу прибережно-водних екосистем середньої та нижньої течії річки Вдзвижа в межах Іванівської територіальної громади Чернігівської області на основі узагальнення раритетного фіторізноманіття. У межах дослідження виявлено та задокументовано новий локалітет вразливого виду Червоної книги України *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, оцінено стан ценопопуляції *Comarum palustre* L. та верифіковано наявність трьох рослинних формацій із Зеленої книги України. Особливу цінність становить обґрунтування превентивних заходів охорони гідрофільних екотопів, що дозволяє розглядати результати роботи як практичну основу для розширення мережі ПЗФ регіону, ведення екологічного моніторингу та прийняття рішень у сфері збалансованого природокористування і збереження біобезпеки малих річок Полісся.

Висновки. У заплавних комплексах досліджуваної ділянки річки Вдзвижа виділено стійке флористичне ядро макрофітів, причому найвищу созологічну вагу мають угруповання формацій *Nupharea luteae*, *Nymphaeeta albae* та *Nymphaeeta candidae*. Польові спостереження підтверджують, що попри фрагментарність, ці ценози зберігають високий відновлювальний потенціал, проте зазнають ризиків через порушення гідрорежиму. Виявлений локалітет *Dactylorhiza incarnata* (15 екз.) та ділянка зростання *Comarum palustre* (20 м²) свідчать про потребу резервації цих територій. Необхідним є оголошення ботанічного заказника «Петрові плавні» орієнтовною площею 125 га для забезпечення контролю за гідрологічним режимом та превентивного захисту раритетного генофонду.

Ключові слова: макрофіти, природно-заповідний фонд, Чернігівське Полісся, Червона книга України, Зелена книга України

ABSTRACT

Purpose of the work. The purpose of the work is a scientific and ecological substantiation of the efficiency of expanding the local ecological network of the Chernihiv region by establishing a new object of the nature reserve fund – the botanical reserve of local importance «Petrovi Plavni». The study is aimed at determining the sozoological value of the macrophyte flora in the small Vzdvyzha river valley, establishing the conservation degree of natural complexes.

Methodology. The study was based on the analysis of scientific information sources and long-term field investigations conducted by the authors using the method of route-floristic and phytocoenotic surveys of the Vzdvyzha river channel and floodplain. As the main criterion for determining the boundaries and nature conservation value of the project, we chose the presence of stable populations of rare and vulnerable plant species, as well as coenoses included in the state protection lists.

Scientific novelty. For the first time, a comprehensive analysis of the ecological potential of coastal-water ecosystems in the middle and lower reaches of the Vzdvyzha river within the Ivanivka territorial community of the Chernihiv region was carried out based on the generalization of rarity phytodiversity. Within the framework of the

research, a new locality of the vulnerable species of the Red Data Book of Ukraine *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó was discovered and documented, the state of the *Comarum palustre* L. coenopopulation was assessed, and the presence of three plant formations from the Green Data Book of Ukraine was verified. Of particular value is the substantiation of preventive measures for the protection of hydrophilic ecotopes, which allows considering the results of the work as a practical basis for expanding the regional nature reserve fund network, conducting ecological monitoring, and making decisions in the field of sustainable nature management and biosecurity conservation of small Polesie rivers.

Conclusions. A stable floristic core of macrophytes was identified in the floodplain complexes of the studied section of the Vzdvyzha river, with the communities of the formations *Nuphareta luteae*, *Nymphaeeta albae*, and *Nymphaeeta candidae* having the highest sozological weight. Field observations confirm that despite their fragmentation, these coenoses maintain a high recovery potential, but face risks due to hydrological regime disruption. The discovered locality of *Dactylorhiza incarnata* (15 individuals) and the growth area of *Comarum palustre* (20 m²) indicate the need for reservation of these territories. It is necessary to establish the «Petrovi Plavni» botanical reserve with an approximate area of 125 hectares to ensure control over the hydrological regime and preventive protection of the rare gene pool.

Key words: macrophytes, nature reserve fund, Chernihiv Polesie, Red Data Book of Ukraine, Green Data Book of Ukraine

Вступ

Збереження біологічного різноманіття є одним із пріоритетних напрямів сучасної екологічної політики, оскільки природні екосистеми забезпечують підтримання екологічної рівноваги, виконують важливі середовищеві функції та є основою екологічної безпеки й сталого розвитку (Barabash & Stechenko, 2021). Ухвалення Куньмінсько-Монреальської глобальної рамкової програми з біорізноманіття визначило нові міжнародні орієнтири щодо припинення втрати біорізноманіття, збереження природних оселищ, відновлення деградованих екосистем і розширення мережі природоохоронних територій (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2022). Одним із центральних завдань програми є Ціль 3 на період до 2030 року, спрямована на розширення природоохоронних територій. Вона передбачає, що до 2030 року принаймні 30 % наземних, внутрішніх водних, прибережних і морських територій, особливо тих, що мають особливе значення для збереження біорізноманіття, функціонування екосистем і надання екосистемних послуг, будуть ефективно охоронятися та управлятися (Novozhylova et al., 2023).

На виконання цих міжнародних зобов'язань Кабінет Міністрів України у 2026 році схвалив Стратегію збереження біологічного різноманіття України на період до 2035 року, якою визначено пріоритетні напрями державної політики у сфері охорони дикої природи, збереження та відновлення природних екосистем, посилення охорони рідкісних видів, розширення

природно-заповідного фонду та інтеграції природоохоронних підходів у різні сфери державного управління (Ministry of Economy, Environment and Agriculture of Ukraine, 2026).

На думку О. О. Бакуліч, Н. О. Кухтик, Л. І. Крюковської та О. П. Кобзистої, ПЗФ України є основним елементом системи збереження біорізноманіття, підтримання екологічної рівноваги, забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку територій (Bakulich et al., 2026). Тому наукове обґрунтування створення нових об'єктів ПЗФ є важливою складовою збереження територій із високою природоохоронною цінністю.

Інтенсивне антропогенне перетворення природних ландшафтів, зміна клімату, порушення гідрологічного режиму водойм, а також наслідки воєнних дій призводять до деградації природних оселищ, скорочення біологічного різноманіття та втрати екосистемних функцій. Особливо вразливими до цих процесів є малі річки та їхні заплавні комплекси, які виконують важливі водорегулюючі, середовищеві та біотопоформувальні функції, підтримують природний водний баланс територій і слугують осередками концентрації численних рідкісних видів рослин і тварин.

Прибережно-водні екосистеми малих річок належать до найбільш цінних природних комплексів Полісся. Вони забезпечують існування різноманітної водної та болотної рослинності, підтримують процеси природного самоочищення водойм, стабілізують гідрологічний режим та формують екологічні коридори, які забезпечують просторову цілісність регіональної екологічної мережі. Одним із

ключових компонентів таких екосистем є макрофіти, які визначають структуру водної рослинності, беруть участь у функціонуванні водних біоценозів і є чутливими індикаторами екологічного стану водних об'єктів.

Водночас заплавні комплекси малих річок України зазнають постійного антропогенного впливу. Осушувальна меліорація, розорювання заплав, порушення режиму прибережних захисних смуг, зміна гідрологічного режиму, рекреаційне навантаження, випасання худоби та засмічення берегів спричиняють трансформацію природних біотопів, фрагментацію популяцій рідкісних видів і поступове скорочення площ природної рослинності. Унаслідок цього знижується природоохоронна цінність територій, значна частина яких досі не має належного заповідного статусу.

Чернігівське Полісся характеризується значним природним потенціалом, проте окремі ділянки його річкових долин залишаються недостатньо дослідженими щодо їхньої соцологічної цінності. До таких територій належить долина малої річки Вдзвижа, лівої притоки Десни, де збереглися прибережно-водні, лучно-болотні та заплавні біотопи з високим рівнем флористичного різноманіття. Незважаючи на відносну збереженість природних комплексів, територія зазнає впливу господарської діяльності, що створює потенційну загрозу для існування рідкісних видів рослин і цінних рослинних угруповань.

Таким чином, актуальність дослідження визначається необхідністю наукового обґрунтування створення нового об'єкта пзф як одного з практичних механізмів реалізації Стратегії збереження біологічного різноманіття України до 2035 року, розширення регіональної екологічної мережі та забезпечення довгострокового збереження цінних прибережно-водних екосистем Чернігівського Полісся. У зв'язку з цим метою роботи є обґрунтування доцільності розширення локальної екомережі Чернігівської області шляхом створення ботанічного заказника місцевого значення «Петрові плавні», визначення соцологічної цінності флори макрофітів долини малої річки Вдзвижа та оцінка ступеня збереженості її природних комплексів.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження виконано на території заплавного комплексу річки Вдзвижа в межах Іванівської територіальної громади Чернігівського району Чернігівської області. Об'єктом дослідження були прибережно водні екосистеми середньої та нижньої течії річки, представлені русловими, заплавними та заболоченими ділянками, що характеризуються високим різноманіттям макрофітів та значним ступенем природної збереженості.

Методологічну основу дослідження становило поєднання польових, флористичних, геоботанічних, картографічних та аналітичних методів. Під час виконання роботи використано наукові публікації, нормативно правові акти у сфері природно заповідної справи, матеріали щодо сучасного стану природно заповідного фонду Чернігівської області, а також результати власних польових досліджень авторів.

Польові обстеження проводилися маршрутно-флористичним методом із детальним обстеженням руслової та заплавної частин річки Вдзвижа. Особливу увагу приділено виявленню водних та прибережно-водних видів рослин, визначенню їх поширення, оцінці стану ценопопуляцій та фіксації рослинних угруповань, що мають природоохоронне значення. Для кожної виявленої ділянки здійснювали опис екотопу, визначали характер рослинного покриву, ступінь антропогенної трансформації та особливості гідрологічних умов.

Основним критерієм оцінки природоохоронної цінності території була наявність популяцій рідкісних і вразливих видів судинних рослин, а також рослинних угруповань, включених до офіційних природоохоронних переліків. Особливу увагу приділено встановленню місцезростань видів, занесених до Червоної книги України та Конвенції про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори, що перебувають під загрозою зникнення (CITES), а також ценозів, включених до Зеленої книги України (Didukh, 2009b; CITES, 1973; Didukh, 2009a). Додатково оцінювали ступінь репрезентативності природних біотопів, рівень їх збереженості та перспективи включення до складу природно заповідного фонду.

Видовий склад рослин визначали за загальноприйнятими ботанічними визначниками, а номенклатуру та латинські назви таксонів стандартизували відповідно до міжнародної бази даних The WFO Plant List (WFO, 2025).

Для окремих раритетних видів проводили підрахунок особин, оцінювали площу займаних ділянок та документували їх географічне положення за допомогою географічних координат.

Чернігівська область посідає перше місце в Україні за кількістю об'єктів ПЗФ: нині їх налічується 685 загальною площею 263,8 тис. га (Chernihiv Regional Council, 2025).

Площа Іванівської територіальної громади становить 41370,8 га, з яких 1309,6 га належать до ПЗФ, що відповідає показнику заповідності 3,17 % (Department of Ecology and Natural Resources of the Chernihiv Regional State Administration, 2026). Це підкреслює важливу роль заповідних територій у збереженні біорізноманіття та підтриманні екологічної рівноваги громади.

Просторове обґрунтування меж проєктованого ботанічного заказника виконували за допомогою картографічного аналізу та послуговуючись геоінформаційними технологіями.

Межі території визначали за результатами польових обстежень з використанням геодезичної системи координат WGS 84. Картографічне моделювання дало можливість визначити оптимальну конфігурацію території, що забезпечує збереження найбільш цінних прибережно-водних і заплавних біотопів та їх функціональну цілісність.

Оцінку доцільності створення ботанічного заказника здійснювали на основі комплексного аналізу екологічних, флористичних, созологічних та правових критеріїв. При цьому враховували репрезентативність природних комплексів, наявність раритетного фіторізноманіття, екологічний стан території, її роль у формуванні локальної екологічної мережі Чернігівської області, а також відповідність вимогам чинного природоохоронного законодавства.

Результати дослідження та обговорення

Польові дослідження, проведені в долині малої річки Вздвига, лівої притоки Десни, у межах Іванівської територіальної громади Чернігівського району Чернігівської області, засвідчили високу природоохоронну цінність території. Її розташування в межах Дніпровсько-Нижньодеснянського фізико-географічного району та Остерського геоботанічного району визначає формування різноманітних прибережно-водних, лучно-болотних, заплавних і чагарникових біотопів, що забезпечують сприятливі умови для збереження значного флористичного різноманіття.

Рослинний покрив дослідженої території представлений комплексом водної, прибережно-водної, болотної та лучної рослинності, просторова структура якої сформувалася під впливом природного гідрологічного режиму річки. Прибережну смугу утворюють ценози за участю *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Phalaris arundinacea* L., *Typha latifolia* L., *Acorus calamus* L. та *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb. На ділянках відкритого водного плеса поширені *Hydrocharis morsus-ranae* L. і представники роду *Lemna*, характерні для евтрофних водойм із повільною течією. Сукупність цих угруповань забезпечує підтримання природного функціонування водної екосистеми, сприяє стабілізації берегів, бере участь у процесах природного самоочищення води та формує оселища для численних видів флори і фауни.

Особливу созологічну цінність досліджуваної території становить виявлення рослинних угруповань, занесених до Зеленої книги України відповідно до чинних переліків природних рослинних угруповань, що підлягають охороні (Didukh, 2009a; Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, 2020).

У русловій частині річки виявлено охоронювані рослинні угруповання, представлені асоціаціями *Nymphaeetum (albae) ceratophyllosum (submersi)*, *Nymphaeetum (candidae) ceratophyllosum (submersi)*, *Nuphareetum (luteae) ceratophyllosum (submersi)* та *Nuphareetum (luteae) salviniosum (natantis)*. Незважаючи на локальний характер їх поширення, угруповання перебувають у задовільному

стані та за умови збереження природного гідрологічного режиму мають сприятливі передумови для подальшого природного розвитку.

Під час проведення польових досліджень встановлено місцезростання *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, занесеного до Червоної книги України (Didukh, 2009b). Виявлена ценопопуляція налічує п'ятнадцять особин, що зростають у межах перезволоженої заплавної ділянки. Стан популяції оцінюється як задовільний, однак її подальше існування безпосередньо залежить від збереження природного водного режиму та цілісності болотних біотопів.

У межах заплави також виявлено локалітет *Comarum palustre* L. площею близько 20 м². Вид формує стійкі зарості у пониженнях рельєфу з постійним надлишковим зволоженням. Попри те, що на сьогодні цей вид не внесений до офіційного Переліку регіонально рідкісних видів рослин Чернігівської області, аналіз наукових джерел вказує на стрімку тенденцію до деградації його природних оселищ на загальнодержавному рівні (Chernihiv Regional Council, 2018). Цей таксон уже отримав офіційний охоронний статус у багатьох інших регіонах України, зокрема у Вінницькій, Полтавській, Хмельницькій, Закарпатській, Чернівецькій та Івано-Франківській областях (Andriienko & Perehrym, 2012). З огляду на це, включення виявленого локалітету до складу проекту природоохоронної території є виправданим і раціональним кроком на випередження. Це дозволить своєчасно забезпечити цілісність біотопу та сформувати надійний генетичний резерват виду до моменту ймовірного оновлення регіонального списку Чернігівщини, де цей гігрофільний вид має високі шанси отримати юридичний статус охорони.

Деревно-чагарниковий ярус прибережної ділянки представлений *Salix caprea* L., *Salix triandra* L., *Betula pendula* Roth, *Malus sylvestris* (L.) Mill. та *Pyrus communis* L.

У трав'яному покриві поширені *Carex acuta* L., *Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmb., *Glyceria fluitans* (L.) R. Br., *Phalaris arundinacea* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Iris pseudacorus* L., *Caltha palustris* L., *Peucedanum palustre* (L.) Moench, *Symphytum officinale* L.,

Althaea officinalis L., *Butomus umbellatus* L., *Lysimachia vulgaris* L., *Lysimachia thyrsoiflora* L. та ряд інших. Переважання гігрофільних видів підтверджує збереження характерних для Полісся прибережно-водних і болотних біотопів.

Водночас сучасний стан долини річки Вдвизжа характеризується наявністю низки антропогенних чинників, що негативно впливають на природні комплекси. Найбільш поширеними серед них є випасання худоби, сінокосіння, локальне розорювання заплавної ділянок, порушення режиму прибережних захисних смуг та засмічення берегової смуги. Додатковими факторами ризику залишаються зміни клімату, які супроводжуються збільшенням тривалості посушливих періодів та можуть призвести до порушення гідрологічного режиму заплавної екосистем. Сукупна дія цих чинників створює потенційну загрозу деградації місць зростання рідкісних видів рослин і трансформації природних біотопів.

Формування й функціонування природнозаповідного фонду, а також подальший розвиток заповідної справи в Україні повинні бути забезпечені шляхом збільшення площі територій і об'єктів природнозаповідного фонду, оскільки відсоток заповідності є важливим екологічним показником збереження територій та об'єктів, які мають особливу природоохоронну, наукову, естетичну, рекреаційну та іншу цінність (Чорко, 2020).

Результати проведених досліджень свідчать, що досліджувана територія відповідає критеріям, визначеним природоохоронним законодавством України для створення ботанічного заказника місцевого значення. Поєднання цінних прибережно-водних і болотних біотопів, наявність виду *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, занесеного до Червоної книги України, локалітету *Comarum palustre* L., а також рослинних угруповань, що підлягають охороні, є достатнім науковим обґрунтуванням необхідності заповідання цієї території.

З огляду на отримані результати запропоновано створення ботанічного заказника місцевого значення «Петрові плавні» орієнтовною площею 125 га. До складу проектованої території доцільно включити русло річки Вдвизжа, прилеглі прибережно-водні, лучно-болотні та

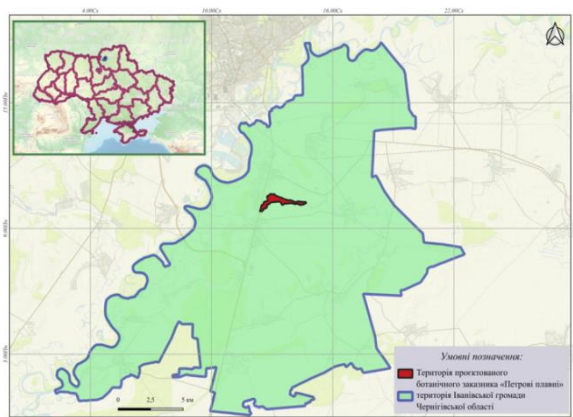
чагарникові біотопи, що забезпечить охорону природного комплексу як єдиної функціональної системи (рис. 1).

Відповідно до Закону України «Про ПЗФ України» створення заказника здійснюється без вилучення земельних ділянок у власників і землекористувачів, що дає можливість поєднати природоохоронні заходи із традиційним землекористуванням за умови дотримання встановленого режиму охорони (Law of Ukraine on the Nature Reserve Fund of Ukraine, 1992).

Запропонована назва «Петрові плавні» відображає природні та історико-культурні особливості території. Слово «плавні» характеризує заплавний і заболочений характер місцевості з переважанням прибережно-водної рослинності, тоді як означення «Петрові» походить від історичного топоніма «Петрів корінь», який був первісною назвою сучасного села

Іванівка. Використання цієї назви сприяє збереженню місцевої історико-культурної спадщини та підкреслює зв'язок природної території з історією її освоєння.

Створення ботанічного заказника «Петрові плавні» сприятиме збереженню цінних прибережно-водних екосистем долини річки Вздвиги, охороні місць зростання рідкісних видів рослин і рослинних угруповань, підтриманню екологічної цілісності заплавного комплексу та зміцненню локальної екологічної мережі Чернігівського Полісся. Запровадження природоохоронного режиму також створить умови для довгострокового моніторингу стану природних комплексів і реалізації державної політики у сфері збереження біологічного різноманіття відповідно до Стратегії збереження біологічного різноманіття України на період до 2035 року.



А



Б

Рис. 1. Картосхема місце розташування проєктованого ботанічного заказника «Петрові плавні». А – в межах Іванівської громади (QGIS); Б – проєкція меж ботанічного заказника «Петрові плавні» на місцевості (Google Earth)

Висновки

Проведене дослідження прибережно-водних екосистем річки Вздвиги в межах Іванівської громади Чернігівської області підтвердило їхній високий екологічний потенціал та соцологічну цінність. Заплавний комплекс зберіг стійке флористичне ядро макрофітів, яке стабілізує гідрорежим території та виконує функцію природного біофільтра.

Важливого природоохоронного значення для досліджуваної ділянки річки Вздвиги набувають підтверджені цінні ботанічні об'єкти, зокрема наявність рослинних угруповань, занесених до Зеленої книги України, виявлення нового локалітету виду *Dactylorhiza incarnata*, занесеного до Червоної книги України, а також встановлення стабільної популяції *Comarum palustre*.

Отримані дані свідчать про високу соціологічну цінність території та обґрунтовують доцільність її природоохоронного статусу. Попри відносну збереженість біотопів, екосистеми в околицях сіл Іванівка та Лукашівка зазнають постійного антропогенного тиску (випас худоби, розорювання заплав, порушення прибережних смуг, засмічення), що на тлі загальної аридизації Полісся створює загрозу деградації гідрофільних екотопів. Ефективним інструментом мінімізації цих ризиків та превентивного захисту раритетного генофонду є оголошення ботанічного заказника місцевого значення «Петрові плавні»

орієнтовною площею 125 га. Запропонована назва гармонійно поєднує ландшафтні ознаки території та історичну топоніміку краю.

У структурі екомережі Чернігівщини проєктований заказник виконуватиме роль важливого локального екологічного коридору. Створення об'єкта без вилучення земель у землекористувачів унеможливило соціально-економічні конфлікти й накладає дієві юридичні обмеження на деструктивну господарську діяльність. Результати роботи є практичним підґрунтям для розширення мережі ПЗФ регіону, ведення моніторингу та збереження біобезпеки малих річок Полісся.

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-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Andriienko, T. L., & Perehrym, M. M. (Comps.). (2012). *Official lists of regionally rare plants of the administrative territories of Ukraine (reference book)*. Alterpres. (in Ukrainian)

Андрієнко Т. Л., Перегрим М. М. (уклад.). Офіційні переліки регіонально рідкісних рослин адміністративних територій України (довідкове видання). Київ: Альтерпрес, 2012. 148 с.

Bakulich, O. O., Kukhtyk, N. O., Kriukovska, L. I., & Kobzysa, O. P. (2026). Assessment of the functioning and conservation of the Nature Reserve Fund of Ukraine under martial law. *Ecological Sciences*, 3(66), 119–125. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.16> (in Ukrainian)

Бакуліч О. О., Кухтик Н. О., Крюковська Л. І., Кобзиста О. П. Оцінка функціонування та збереження природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану. *Екологічні науки*. 2026. № 3(66). С. 119–125. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.16>

Barabash, A. H., & Stechenko, K. L. (2021). Objects of the nature reserve fund: problematic aspects of defining the concept and classification. *Legal Scientific Electronic Journal*, 8, 163–167. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2021-8/37> (in Ukrainian)

Барабаш А. Г., Стеченко К. Л. Об'єкти природно-заповідного фонду: проблемні аспекти визначення поняття й класифікації. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2021. № 8. С. 163–167. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2021-8/37>

Chernihiv Regional Council. (2018, March 28). *List of regionally rare plant species of Chernihiv region (Appendix 1 to the decision of the 12th session of the 7th convocation No. 32–12/VII)*. <https://n.forest.gov.ua/dostup-do-publichno%D1%97-informaci%D1%97/plani-lisonasadzhen-cherinigvshhini/> (in Ukrainian)

Чернігівська обласна рада. Перелік регіонально рідкісних видів рослин Чернігівської області: додаток 1 до рішення дванадцяті сесії обласної ради сьомого скликання 28 березня 2018 року № 32–12/VII. 2018. URL: <https://n.forest.gov.ua/dostup-do-publichno%D1%97-informaci%D1%97/plani-lisonasadzhen-cherinigvshhini/>

Chernihiv Regional Council. (2025). *Strategy for Sustainable Development of Chernihiv Oblast until 2027 (Appendix 1 to the Decision of the Twenty-Second Session of the Chernihiv Regional Council of the Eighth Convocation No. 3-22/VIII, March 14, 2025)*. https://chor.gov.ua/images/Razdely/Norm_docum/Rishennia/8_sklykannia/22/Dodatok_3.pdf (in Ukrainian).

Чернігівська обласна рада. Стратегія сталого розвитку Чернігівської області на період до 2027 року: додаток 1 до рішення двадцять другої сесії Чернігівської обласної ради восьмого скликання від 14 березня 2025 року № 3-22/VIII. Чернігів, 2025. URL: https://chor.gov.ua/images/Razdely/Norm_docum/Rishennia/8_sklykannia/22/Dodatok_3.pdf

Chopko, K. (2020). Legal foundations of the formation of the Nature Reserve Fund of Ukraine. *Ecological Law*, 4, 127–131. <https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.4.20> (in Ukrainian)

Чопко Х. Правові засади формування природно-заповідного фонду України. *Екологічне право*. 2020. № 4. С. 127–131. <https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.4.20>

Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES). (1973, March 3; as amended June 22, 1979; accession of Ukraine, May 14, 1999). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_129 (in Ukrainian)

Конвенція про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори, що перебувають під загрозою зникнення (підписана 03.03.1973, зі змінами від 22.06.1979; приєднання України від 14.05.1999). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_129

Department of Ecology and Natural Resources of the Chernihiv Regional State Administration. (2026). *List of Nature Reserve Fund objects of Chernihiv Oblast as of January 1, 2026*. <https://eco.cg.gov.ua/index.php?id=16893&tp=1&pg=> (in Ukrainian)

Департамент екології та природних ресурсів Чернігівської обласної державної адміністрації. Перелік об'єктів природно-заповідного фонду Чернігівської області станом на 01.01.2026. 2026. URL: <https://eco.cg.gov.ua/index.php?id=16893&tp=1&pg=>

Didukh, Ya. P. (Ed.). (2009a). *Green Book of Ukraine*. Alterpres. (in Ukrainian)

Дідух Я. П. (заг. ред.). *Зелена книга України*. Київ: Альтерпрес, 2009. 448 с.

Didukh, Ya. P. (Ed.). (2009b). *Red Data Book of Ukraine. Plant Kingdom*. Hlobalkonsaltnyh. <https://redbook-ua.org/> (in Ukrainian)

Дідух Я. П. (ред.). Червона книга України. Рослинний світ. Київ: Глобалконсалтинг, 2009. URL: <https://redbook-ua.org/>

Google. (n.d.). *Google Earth (web version)*. <https://earth.google.com/web/>

Law of Ukraine No. 2456-XII on the Nature Reserve Fund of Ukraine (as amended on March 11, 2026). (1992). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, 34, Art. 502. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12> (in Ukrainian)

Закон України № 2456-XII «Про природно-заповідний фонд України» (редакція від 11.03.2026). Відомості Верховної Ради України. 1992. № 34. Ст. 502. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12>

Ministry of Economy, Environment and Agriculture of Ukraine. (2026, June 11). *Ukraine approved the Biodiversity Conservation Strategy until 2035*. <https://me.gov.ua/News/Detail/c0afe66c-7fb6-4896-99a1-c20f99612103?lang=uk-UA&title=Riznomanittia> (in Ukrainian)

Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України. Схвалено Стратегію збереження біологічного різноманіття до 2035 року. 2026, 11 червня. URL: <https://me.gov.ua/News/Detail/c0afe66c-7fb6-4896-99a1-c20f99612103?lang=uk-UA&title=Riznomanittia>

Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2020, December 17). *Order No. 368 on approval of the lists of rare, endangered and typical natural plant communities subject to protection and inclusion in the Green Book of Ukraine, and plant communities removed from the Green Book of Ukraine*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0130-21> (in Ukrainian)

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Наказ від 17.12.2020 № 368 «Про затвердження переліків рідкісних і таких, що перебувають під загрозою зникнення, та типових природних рослинних угруповань, які підлягають охороні і заносяться до Зеленої книги України, та природних рослинних угруповань, які вилучені із Зеленої книги України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0130-21>

Novozhylova, T., Kryuchkova, V., & Pitak, R. (2023). Protected areas in the new reality: global goal and ways to achieve it. In *IV International Internet Conference "Actual problems of formal and informal education in environmental monitoring and nature conservation"* (pp. 44–47). Ukraine. (in Ukrainian)

Новожилова Т., Крючкова В., Пітак Р. Природоохоронні території в новій реальності: глобальна ціль і шляхи її досягнення. Матеріали IV Міжнародної інтернет-конференції «Актуальні проблеми формальної і неформальної освіти з моніторингу довкілля та заповідної справи». 2023. С. 44–47.

QGIS (n.d.). Spatial visualization and decision-making tools for everyone. Retrieved February 07, 2026, from <https://qgis.org/>

Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2022, December 19). *Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework (COP/15/L.25)*. <https://www.cbd.int/gbf>

World Flora Online. (2025). *Plant List (Version 2025.01)*. <https://wfoplantlist.org/plant-list>

Received: 30.06.2026. Accepted: 20.07.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Cite this article in APA style as:

Івусь Т., Карпенко Ю. Фітосоцологічна цінність ділянки річки Вздвигі як перспективного природоохоронного об'єкта. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.3>

Ivus, T., & Karpenko, Yu. (2026). Fitosozolohichna tsinnist dilianky richky Vzdvyzhi yak perspektyvnoho pryrodookhoronnoho obiekta [Phytosozological value of a section of the Vzdvyzha River as a potential nature conservation site]. *Biota. Human. Technology*, (2), 34–43. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.3> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Ivus T. [*in Ukrainian: Івусь Т.*] ¹, PhD student, email: tanya-ivus@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6993-611X

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

Karpenko Yu. [*in Ukrainian: Карпенко Ю.*] ², PhD (Biology), Assoc.Prof., email: yuch2011@i.ua

ORCID: 0000-0002-1703-8473

Scopus-Author ID:57225225632

Department of Ecology, Geography and Nature Management, 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, editing.

UDC 712.4(477.51-25):004.65:911.6

DOI: 10.58407/bht.2.26.4



Copyright (c) 2026 Oleksandr Yakovenko, Vitaliy 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/).

Олександр Яковенко, Віталій Морський
КАРТУВАННЯ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ
ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. ЧЕРНІГОВА ЗАСОБАМИ ГІС



Oleksandr Yakovenko, Vitaliy Morskyi
GIS-BASED MAPPING OF VEGETATION COVER
IN CHERNIHIV'S GREEN INFRASTRUCTURE

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Картування рослинного покриву структурних елементів мережі зеленої інфраструктури (ЗІ) м. Чернігова засобами геоінформаційних систем із синтаксономічною характеристикою виявлених угруповань.

Методологія. Базується на інтеграції трьох компонентів: автоматизованої класифікації земного покриву методом Random Forest у хмарній платформі Google Earth Engine на основі медіанних композитів Sentinel-2 (літо і весна 2020, 2024 рр.), вегетаційних індексів NDVI, EVI, LAI та параметрів рельєфу SRTM; польових геоботанічних описів за методом Браун-Бланке на ключових ділянках мережі; експертної синтаксономічної інтерпретації картографічних контурів у середовищі QGIS. Точність базової класифікації оцінено на незалежній валідаційній вибірці ($n = 578$).

Наукова новизна. Полягає в тому, що вперше для міста України здійснено інтеграцію GIS-картування засобами дистанційного зондування з синтаксономічною атрибуцією рослинності на рівні класів і асоціацій за Браун-Бланке в межах цілісної мережевої моделі ЗІ (ядра першого і другого порядків, сполучні коридори); встановлено, що просторова конфігурація синтаксонів жорстко детермінована геоморфологічною структурою міста, а цифрова модель рельєфу виявилася найважливішою прогностичною ознакою класифікаційної моделі, випереджаючи спектральні канали й вегетаційні індекси.

Висновки. Класифікація земного покриву досягла точності Overall Accuracy 95,85 % ($Kappa = 0,942$). Мережа ЗІ Чернігова охоплює 12 структурних елементів (п'ять ядер першого порядку, три ядра другого порядку, три сполучні коридори та один спеціалізований техногенно-меморіальний вузол – кладовище «Яцево») загальною площею 1397,1 га, у межах яких виявлено вісім типів рослинності. Найбільш цілісними є борові (Подусівський ліс, Ялівщина) і заплавні (Кордівка) ядра, які разом становлять майже 78 % площі мережі, тоді як сполучні коридори та кладовище «Яцево» демонструють найвищий рівень фрагментації і найнижчі значення вегетаційних індексів (густина країв до 1192 м/га, NDVI до 0,527) і потребують пріоритетних заходів з екологічної оптимізації.

Ключові слова: зелена інфраструктура, дистанційне зондування, Random Forest, синтаксономія, Чернігів

ABSTRACT

Purpose of the work. To map the vegetation cover of the structural elements of Chernihiv city's green infrastructure (GI) network using geographic information systems, with a syntaxonomic characterization of the identified plant communities.

Methodology. Is based on the integration of three components: automated land-cover classification using the Random Forest algorithm in the Google Earth Engine cloud platform, based on median Sentinel-2 composites (summer and spring, 2020 and 2024), NDVI/EVI/LAI vegetation indices and SRTM terrain parameters; field geobotanical relevés using the Braun-Blanquet method at key network sites; and expert syntaxonomic interpretation of the mapped polygons in QGIS. Classification accuracy was assessed on an independent validation sample ($n = 578$).

Scientific novelty. Lies in the fact that, for the first time for a Ukrainian city, remote-sensing-based GIS mapping was integrated with syntaxonomic attribution of vegetation at the class and association level (Braun-Blanquet approach) within a coherent GI network model (first- and second-order cores, connecting corridors); it was established that the spatial configuration of syntaxa is strongly determined by the city's geomorphological structure, and that the digital elevation model proved to be the most important predictive feature of the classification model, outranking spectral bands and vegetation indices.

Conclusions. The land-cover classification achieved an Overall Accuracy of 95.85 % (Kappa = 0.942). The Chernihiv GI network comprises 12 structural elements (five first-order cores, three second-order cores, three connecting corridors, and one specialized techno-memorial node – the "Yatsevo" necropolis) with a total area of 1397.1 ha, within which eight vegetation types were identified. The pine-forest (Podusivskyi forest, Yalivshchyna) and floodplain (Kordivka) cores are the most intact, together accounting for almost 78 % of the network area, whereas connecting corridors and the "Yatsevo" necropolis show the highest degree of fragmentation and the lowest vegetation index values (edge density up to 1192 m/ha, NDVI as low as 0.527) and require priority ecological optimization measures.

Key words: green infrastructure, remote sensing, Random Forest, syntaxonomy, Chernihiv

Вступ

Сучасний етап розвитку міст вимагає переходу від фрагментарного озеленення до створення цілісних мереж зеленої інфраструктури (ЗІ) – стратегічно спланованих систем природних і напівприродних територій, що надають широкий спектр екосистемних послуг: регулювання мікроклімату, управління зливовими стоками, підвищення біорізноманіття та забезпечення рекреаційних функцій (EUR-Lex, n.d.; Laforteza et al., 2018). В Україні правові та організаційні засади озеленення населених пунктів визначені на законодавчому рівні (Верховна Рада України, 2025). Головним провайдером переважної більшості цих послуг є рослинний покрив: склад і структура фітоценозів безпосередньо визначають здатність окремих ділянок виконувати функції ядер, коридорів або буферних зон мережі (Capotorti et al., 2019; Hansen & Pauleit, 2014). Зокрема, деревний ярус міських лісів забезпечує значну частину охолоджувального ефекту в умовах теплових островів (Bowler et al., 2010), а заплавна і прибережна рослинність виконує функцію природних гідрологічних регуляторів, критично важливих в умовах зростаючої посушливості клімату.

Геоінформаційні системи (GIS) та методи дистанційного зондування стали ключовим інструментарієм для вирішення цього завдання в умовах складної мозаїчної структури міських ландшафтів. Поєднання мультиспектральних супутникових знімків – зокрема, місії Sentinel-2 Європейського космічного агентства з просторовою роздільною здатністю 10 м – із польовими фітоценотичними описами дозволяє охопити весь просторовий континуум рослинних угруповань і суттєво підвищити репрезентативність картографічних моделей (Neuns & Canters, 2022). Вегетаційні індекси – NDVI, EVI та LAI – дають змогу кількісно

диференціювати структурні типи покриву та виявляти ділянки деградації ценозів (Huete et al., 2002; Rouse et al., 1974; Gitelson et al., 2005). Особливу наукову цінність має поєднання GIS-підходу із синтаксономічною класифікацією рослинності за методом Браун-Бланке (Mucina et al., 2016). Проте, незважаючи на активний розвиток цих методів, більшість публікацій обмежується функціональною класифікацією покриву, не виходячи на рівень синтаксонів, а для міст України такі комплексні дослідження фактично відсутні (Morar et al., 2022; Neuns & Canters, 2022; Dobrinic et al., 2025).

Місто Чернігів є репрезентативним і водночас унікальним об'єктом для дослідження міської ЗІ. Розташоване на правому березі р. Десни в межах Поліської природної зони, місто характеризується складним рельєфом: контрастне чергування борових терас, лесових останців, глибоких ерозійних ярів і заплавних комплексів формує систему геоморфологічно детермінованих ніш, до яких приурочені природні лісові масиви (Морський та ін., 2026). Саме ця морфологічна різноманітність зумовлює унікальне поєднання синтаксонів у межах одного міста: від субконтинентальних соснових борів на піщаних терасах (Ялівщина, Подусівський ліс) до реліктових термофільних дібров на інсольованих південних схилах ярів (Болдині гори, Маліїв яр) і гігроморфних тополево-вербових угруповань у заплаві Десни (урочище Кордівка). Гідрологічна мережа – річки Стрижень і Десна – виконує роль екологічних коридорів, що просторово зв'язують лісові ядра (Морський та ін., 2026).

Особливої наукової актуальності дослідженню надає виразна кліматична трансформація регіону. За даними системи MERRA-2 (GMAO, n.d.) та регіональних метеоспостережень, з 1991 р. середньорічна температура у Чернігові зросла приблизно на 2,8 °C, а гідротермічний коефіцієнт

Селянінова (ГТК) знизився з 1,4–1,5 (1961–1990 рр.) до 0,7–0,8 (2021–2023 рр.), що відповідає переходу від поліського до лісостепового режиму зволоження (Адаменко, 2014; Морський та ін., 2026). Це спричиняє фізіологічний стрес домінантів корінних ценозів і посилює ерозію схилів ярів, водночас підвищуючи значення заплавних екосистем як природних «губок», що підтримують рівень ґрунтових вод усього міста (Морський та ін., 2026).

Таким чином, Чернігів є містом, у якому природні умови – геоморфологічна різноманітність, розгалужена гідромережа та кліматична аридизація – у взаємодії формують складну і вразливу мережу ЗІ з високим синтаксономічним різноманіттям рослинного покриву. Метою роботи є картування рослинного покриву складових мережі зеленої інфраструктури м. Чернігова засобами GIS із синтаксономічною характеристикою виявлених угруповань.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження виконано у 2023–2024 рр. на ключових ділянках мережі ЗІ м. Чернігова. У Подусівському лісі закладено 30 повних фітоценотичних описів за стандартною методикою Браун-Бланке із застосуванням семибальної шкали рясності-покриття (Braun-Blanquet, 1964). Описи охоплювали всі яруси рослинності – деревний, чагарниковий, трав'яно-чагарничковий та моховий – на пробних площах 100–400 м² залежно від типу угруповання. Синтаксономічна приналежність угруповань визначена за Mucina et al. (2016), номенклатура судинних рослин наведена за Plants of the World Online (POWO, 2024).

Синтаксономічну характеристику рослинності окремих елементів мережі ЗІ здійснено також на основі опублікованих фітоценотичних матеріалів. Рослинність урочища Ялівщина охарактеризована за матеріалами Lukash et al. (2020), де описано трансформовані соснові та березові ліси з ознаками класів *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 і *Robinietea* Jurko ex Hadač et Sofron 1980, а на схилах борової тераси – фрагменти узлісних угруповань союзу *Trifolion medii* T.Müller 1962 класу *Trifolio-Geranietea sanguinei* T.Müller 1962. Рослинність Болдиних гір і Маліївого яру висвітлена у монографічному описі

термофільної діброви з *Prunus mahaleb* L. (Lukash, 2021): деревний ярус сформований *Quercus robur* L. віком 200–400 років, трав'яний – характеризується поєднанням ксероморфних, узлісних і рудеральних видів під значним антропогенним тиском. Для газонних фітоценозів сполучних коридорів використано результати п'ятирічного моніторингу придорожніх газонів Чернігова (Lukash, Hutnyk & Morskyi, 2023): встановлено приналежність культур-фітоценозів до класу *Molinio-Arrhenatheretea* Tx. 1937 та задокументовано чотири-стадійний ряд антропоидигресивних сукцесій. Для характеристики рослинності кладовища «Яцево» використано результати спеціального геоботанічного дослідження цього об'єкта (Lukash et al., 2026). На території кладовища виконано 17 геоботанічних описів на пробних площах 100 м², що охопили ділянки з різним ступенем антропогенної трансформації. Встановлено високу синантропізацію рослинного покриву: із 412 видів судинних рослин 59,2 % становлять адвентивні види. Найбільш вираженим проявом трансформації є поширення *Solidago canadensis* L., проективне покриття якої в окремих угрупованнях досягає 95–98 %, що супроводжується витісненням аборигенних видів та формуванням рудералізованих угруповань.

Просторовий аналіз земного покриву мережі ЗІ виконано у хмарній платформі Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) з подальшим опрацюванням результатів у настільній ГІС QGIS 3.x (QGIS Development Team, 2024). Використано мульти-спектральні знімки Sentinel-2 рівня Level-2A (колекція COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED; 13 каналів, просторова роздільна здатність 10–20 м, часова – 5 діб). Хмари, тіні від хмар і сніг маскувалися комбінацією класів шару Scene Classification Layer (SCL) і бітових прапорців каналу QA60. Для кожного вегетаційного сезону побудовано піксельний медіанний композит окремо для двох періодів і двох років: літо (червень–серпень, хмарність < 40 %) і весна (15 лютого–15 квітня, хмарність < 50 %) 2020 і 2024 рр. Весняний безлистяний композит використано для розрізнення хвойних і листяних порід за станом крони.

На основі літніх композитів обчислено три вегетаційних індекси: NDVI (Rouse et al., 1974), EVI (Liu & Huete, 1995; Huete et al., 2002) та наближення LAI через хлорофіловий індекс червоного краю ($CI_{red} = NIR/RedEdge - 1$, канали B8 і B5 Sentinel-2; Gitelson et al., 2005). Для 2020 і 2024 рр. розраховано описову статистику індексів (середнє, стандартне відхилення, мінімум, максимум) у межах кожної з ключових ділянок мережі ЗІ з метою виявлення міжрічної динаміки та ознак деградації ценозів.

Для класифікації сформовано 18-вимірний вектор прогностичних ознак: шість спектральних каналів (B2, B3, B4, B8, B11, B12) літнього і шість – весняного композиту, три вегетаційних індекси (NDVI, EVI, LAI), індекс середньої яскравості (Brightness) та три параметри рельєфу – цифрова модель рельєфу (DEM), крутизна схилів і індекс топографічного положення (TPI), розраховані за даними SRTM (просторова роздільна здатність 30 м; Farr et al., 2007).

Класифікацію земного покриву виконано методом Random Forest (Breiman, 2001; реалізація smileRandomForest платформи Google Earth Engine, 500 дерев) із чотирма базовими класами рослинності: трав'яна рослинність, чагарники, листяний ліс, хвойний ліс. Навчальну вибірку (64 полігони: 18 – трава, 14 – чагарники, 16 – листяний ліс, 16 – хвойний ліс) оцифровано безпосередньо в середовищі Google Earth Engine на основі композитів Sentinel-2 та ортофотопланів Google Satellite / Esri World Imagery з польовою верифікацією. Додатково виокремлено технічний навчальний клас «тінь», спектральна сигнатура якого частково перекривається з хвойним лісом; цей клас використано лише для навчання моделі й видалено з фінальної карти після класифікації. Вибірку розділено у співвідношенні 70/30 на навчальну і незалежну валідаційну підвибірку (seed = 42). Постобробка класифікованого растра включала мажоритарний фільтр (вікно 3×3) для усунення точкового шуму та маскування ділянок з досить низьким відбиттям у ближньому інфрачервоному каналі.

Точність класифікації оцінено на незалежній валідаційній вибірці (n = 578,

30 % полігонів, не залучених до навчання) через матрицю помилок з розрахунком загальної точності (Overall Accuracy), коефіцієнта Каппи, а також точності виробника (Producer's Accuracy) і точності користувача (User's Accuracy) для кожного класу окремо.

Ландшафтну структуру рослинного покриву охарактеризовано шляхом векторизації класифікованого растра в полігоніпатчі (суміжні ділянки одного класу, восьмизв'язна топологія) з подальшим розрахунком – як по кожному класу, так і по кожному з 12 структурних елементів мережі ЗІ (5 ядер 1-го порядку, 3 ядра 2-го порядку, 3 сполучні коридори, 1 спеціалізований вузол) – таких ландшафтних метрик: кількість патчів (Number of Patches), площа найбільшого патча та його частка в загальній площі класу (Largest Patch Index, %), середній розмір патча (Mean Patch Size, га) і густина країв (Edge Density, м/га).

Результуючі растрові й векторні шари (класифікована карта, вегетаційні індекси, DEM, площі та ландшафтні метрики) завантажено у форматах GeoTIFF, ESRI Shapefile і CSV (EPSG:32636, WGS 84 / UTM зона 36N) для подальшого опрацювання у настільній ГІС QGIS. У середовищі QGIS на основі растрової карти класифікації, вегетаційних індексів та ортофотопланів методом ручного оцифрування уточнено синтаксономічну приналежність контурів у межах кожного з чотирьох базових класів RF-карти, оскільки алгоритм Random Forest не розрізняє породний і флористичний склад на рівні синтаксону.

Результати дослідження та обговорення

Класифікацію земного покриву мережі ЗІ м. Чернігова виконано методом Random Forest на основі 18-вимірного вектора прогностичних ознак. Оцінка точності на незалежній валідаційній вибірці (n = 578) продемонструвала високий рівень узгодженості: загальна точність (Overall Accuracy) становила 95,85 %, коефіцієнт Каппи – 0,942, що відповідає «майже досконалий» відповідності класифікатора з польовими даними. Найвища точність виробника (Producer's Accuracy) отримана для трав'яної рослинності (97,9 %) і хвойного лісу (97,2 %), дещо нижча – для

чагарників (94,5 %) через перехідний характер межі «трава – чагарники» на роздільній здатності 10 м (рис. 1).

Несподіваним результатом аналізу важливості прогностичних ознак моделі виявилось те, що найвпливовішою окремою змінною став не спектральний канал чи вегетаційний індекс, а цифрова модель рельєфу (DEM): її внесок у класифікацію перевищив внесок усіх інших 17 ознак, включно з каналами короткохвильового інфрачервоного діапазону (B11, B12) (рис. 2). Другою за важливістю ознакою став ближній інфрачервоний канал весняного знімка (B8), що підтверджує цінність міжсезонного порівняння композитів для розрізнення структури крони. Цей

результат емпірично підтверджує тезу про геоморфологічну детермінованість рослинного покриву мережі ЗІ Чернігова (Морський та ін., 2026): типи рослинності настільки чітко прив'язані до елементів рельєфу, що сама лише топографічна позиція пікселя є кращим предиктором його рослинного покриву, ніж миттєвий спектральний відгук. Просторовий розподіл рельєфу, крутизни схилів та індексу топографічного положення показано на рис. 3.

Векторизація класифікованого растра по всій території міста показала таку структуру рослинного покриву мережі ЗІ (табл. 1); просторовий розподіл класів наведено на рис. 4, а їхнє співвідношення за площею – на рис. 5.

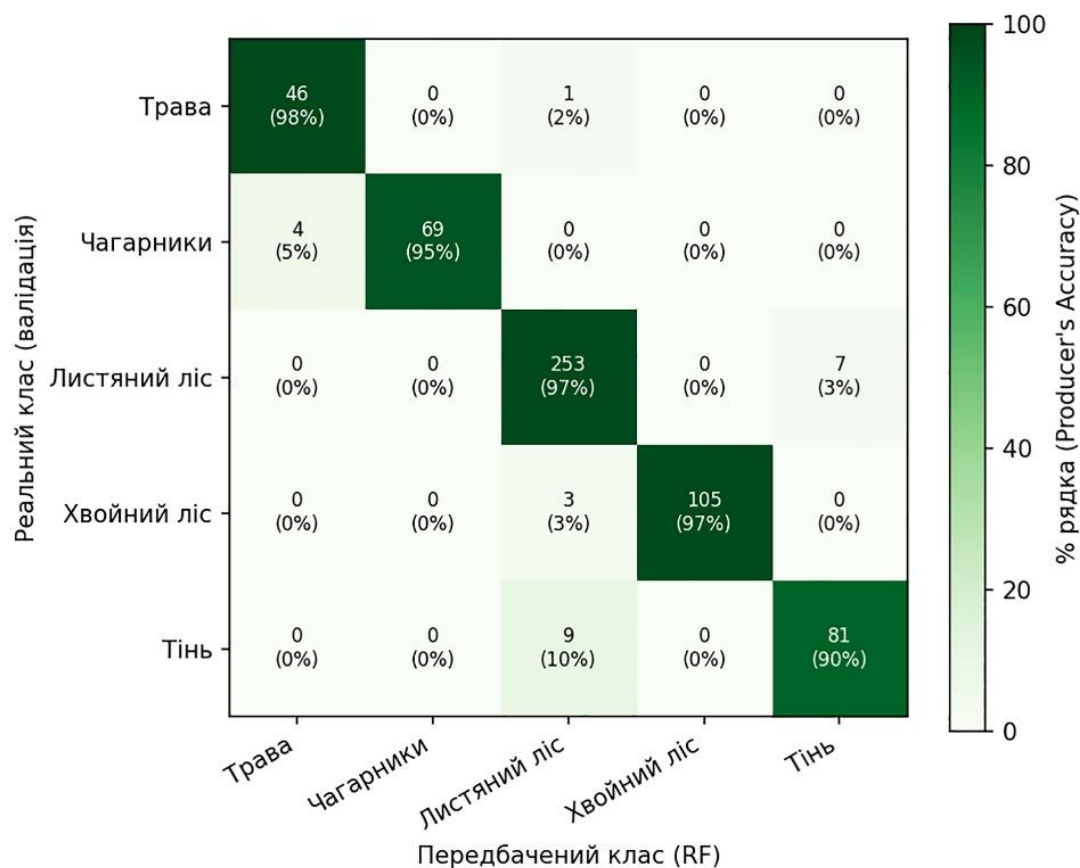


Рис. 1. Матриця помилок класифікації земного покриву (валідаційна вибірка, n = 578)

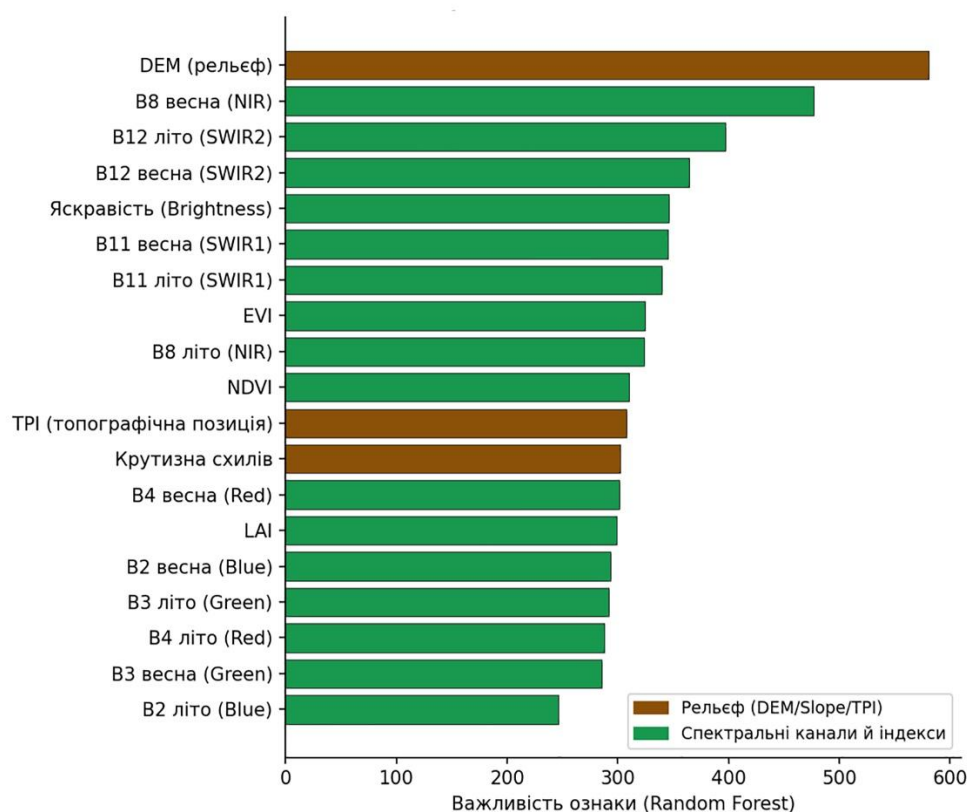


Рис. 2. Важливість прогностичних ознак моделі Random Forest

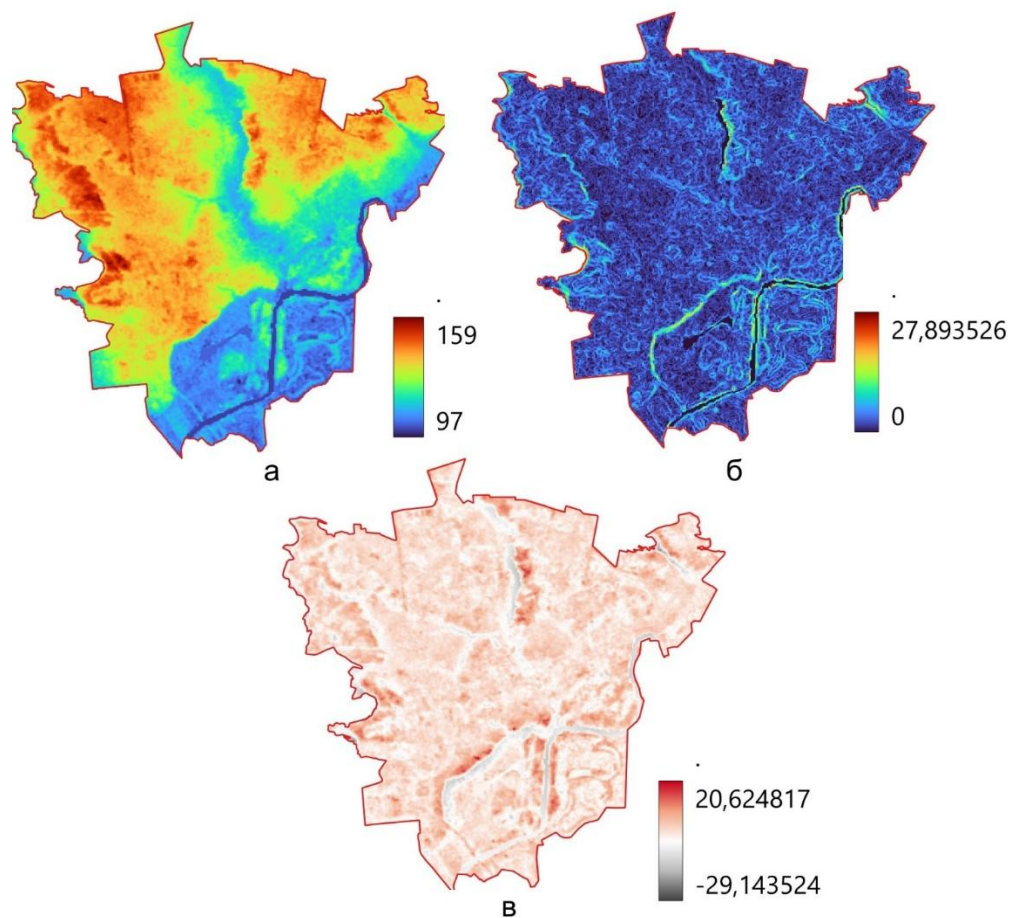


Рис. 3. Геоморфологічні параметри мережі ЗІ м. Чернігова (SRTM): А – цифрова модель рельєфу (DEM); Б – крутизна схилів (Slope); В – індекс топографічного положення (TPI)

Таблиця 1

Площі класів рослинного покриття мережі ЗІ м. Чернігова (2024 р.)

Клас рослинності	Площа, га	% площі	К-ть патчів	LPI, %
Трава	2779,4	38,4	4037	15,9
Чагарники	1211,0	16,7	488	42,1
Листяний ліс	2702,4	37,3	2961	8,0
Хвойний ліс	542,8	7,5	168	34,5
Разом	7235,6	100	7654	–

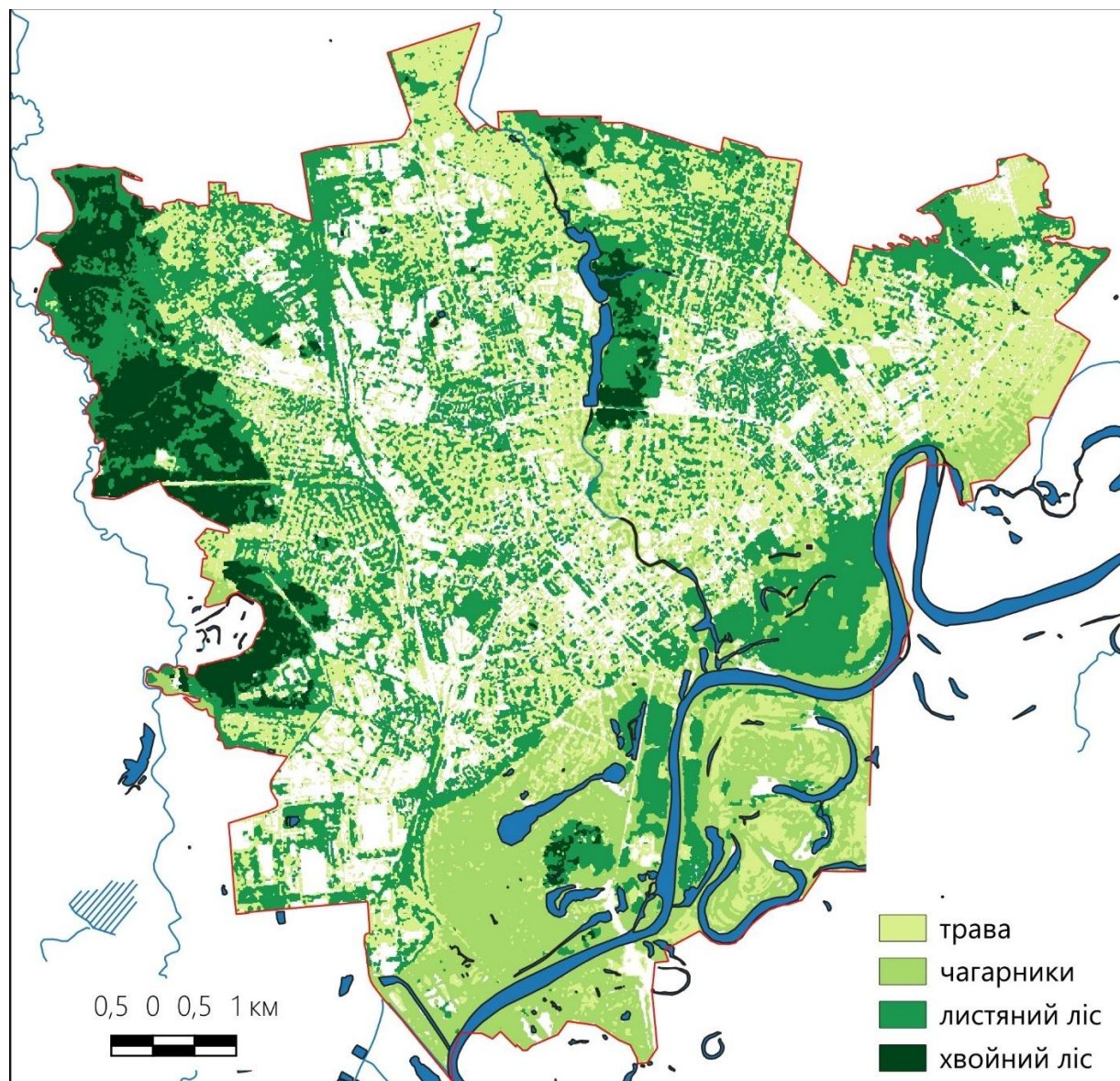


Рис. 4. Карта класифікації рослинного покриття мережі ЗІ м. Чернігова (Random Forest, 2024 р.): трава, чагарники, листяний ліс, хвойний ліс

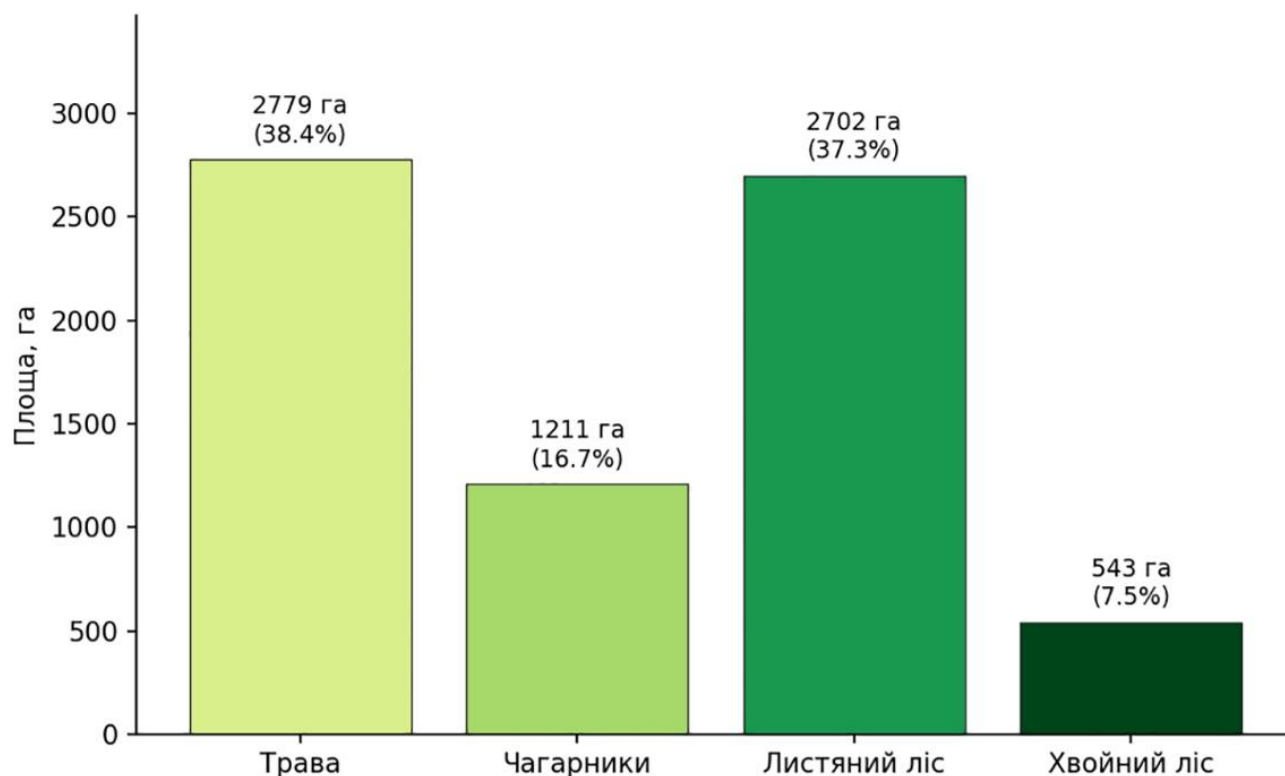


Рис. 5. Площі класів рослинного покриття м. Чернігова

На основі аналізу вегетаційних індексів, класифікованої RF-карти, ортофотопланів та польової верифікації здійснено оцифрування меж рослинних угруповань і виявлено структуру мережі ЗІ м. Чернігова (табл. 2, рис. 6). Просторова конфігурація мережі жорстко визначається геоморфологічним каркасом: ядра першого порядку приурочені до борових терас (Ялівщина, Подусівський ліс), ерозійних форм (Болдині гори, Маліїв яр, Єлецькі гори) та заплавних комплексів (Кордівка), що узгоджується із закономірностями, встановленими для міст з розчленованим рельєфом (Liu et al., 2022). Центральною віссю мережі є р. Стрижень, що утворює безперервний коридор довжиною понад 10 км і з'єднує всі ядра від Ялівщини до Кордівки. Особливе місце в мережі займає кладовище «Яцево» – спеціалізований техногенно-меморіальний, що межує з

природним лісовим масивом з півдня і південного заходу та виконує функцію екологічного конектора між забудованою частиною міста й приміськими лісами (Lukash et al., 2026). За даними цього дослідження, флора кладовища нараховує 412 видів судинних рослин, 59 % з яких є адвентивними, а домінантом трав'яного ярусу виступає інвазійний *Solidago canadensis* L. з проективним покриттям до 98 %. Дані дистанційного зондування незалежно підтверджують цю картину: Яцево демонструє найнижче серед усіх 12 обстежених елементів мережі значення NDVI (0,527) і помірний рівень фрагментації (22 патчі, LPI = 96,3 %, густина країв 237,2 м/га) – проміжний між суцільними лісовими ядрами і сильно фрагментованими вуличними коридорами. Територія розташована на пласкій терасі (137,6 м, схил лише 2,5°) (Lukash et al., 2026).

Таблиця 2

Площі структурних елементів мережі зеленої інфраструктури м. Чернігова

Елемент мережі ЗІ	Назва об'єкта	Площа, га	% від ЗІ
Ядро 1-го порядку	Подусівський ліс	698,41	49,99
Ядро 1-го порядку	Кордівка	273,82	19,60
Ядро 1-го порядку	Ялівщина	121,86	8,72
Спеціалізований вузол	Кладовище «Яцево»	94,95	6,80
Сполучний коридор	Вуличне озеленення (магістралі)	48,59	3,48
Ядро 1-го порядку	Урочище Святе	44,83	3,21
Сполучний коридор	Долина р. Стрижень	42,73	3,06
Сполучний коридор	Центральний парковий антракт	40,89	2,93
Ядро 1-го порядку	Болдині гори / Маліїв яр	14,80	1,06
Ядро 2-го порядку	Березовий гай	9,23	0,66
Ядро 2-го порядку	Мар'їн гай	4,10	0,29
Ядро 2-го порядку	Єлецькі гори	2,92	0,21
Разом		1397,12	100

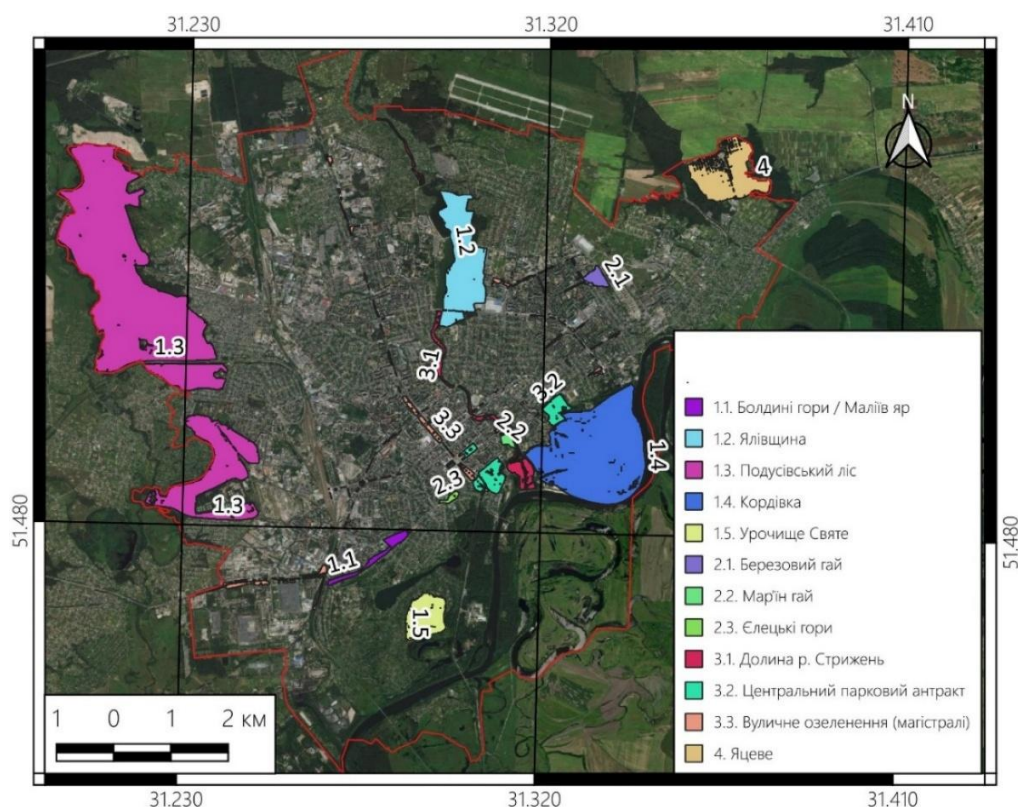


Рис. 6. Картосхема структурних елементів мережі зеленої інфраструктури м. Чернігова (ядра 1-го порядку (1.1. - 1.5.), ядра 2-го порядку (2.1. - 2.3.), сполучні коридори (3.1. - 3.3.), спеціалізований вузол (4.))

Картування рослинного покриву мережі ЗІ виявило шість синтаксономічних типів, що охоплюють шість класів рослинності за Браун-Бланке та два типи угруповань, не класифікованих до рівня класу (табл. 3, рис. 7); розподіл структури покриву в межах кожного ядра відображено на рис. 8. Площі синтаксонів

отримано шляхом атрибуції базових класів автоматизованої RF-карти до конкретних ділянок мережі на основі польової верифікації, оскільки алгоритм класифікації розрізняє лише функціональні типи покриву, а не флористичний склад на рівні синтаксону.

Таблиця 3

Рослинний покрив мережі ЗІ м. Чернігова

Рослинність	Де переважно трапляється	Площа, га	%
<i>Vaccinio-Piceetea</i> Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939	Подусівський ліс, Ялівщина, Урочище Святе	502,5	37,2
<i>Robinietea</i> Jurko ex Hadač et Sofron 1980	По всій мережі ЗІ	405,7	30,0
<i>Salicetea purpureae</i> Moor 1958 + <i>Alnetea glutinosae</i> Br.-Bl. et R.Tx. 1946	Кордівка, заплава Десни	198,6	14,7
<i>Trifolio-Geranietea sanguinei</i> T.Müller 1962 (+ перехідні чагарники)	Ялівщина (схили), інші ядра	82,8	6,1
Синантропна рудерально-декоративна рослинність кладовища (<i>Solidago canadensis</i> + інтродуковані <i>Thuja occidentalis</i> , <i>Juniperus</i> spp.)	Кладовище «Яцево»	81,8	6,1
<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> Tx. 1937	Сполучні коридори, вуличне озеленення	67,6	5,0
<i>Quercetea pubescentis</i> Doing-Kraft ex Scamoni et Passarge 1959	Болдині гори, Маліїв яр	13,2	1,0
Синантропні чагарникові угруповання	Єлецькі гори	0,2	0,01
Разом		1352,4	100

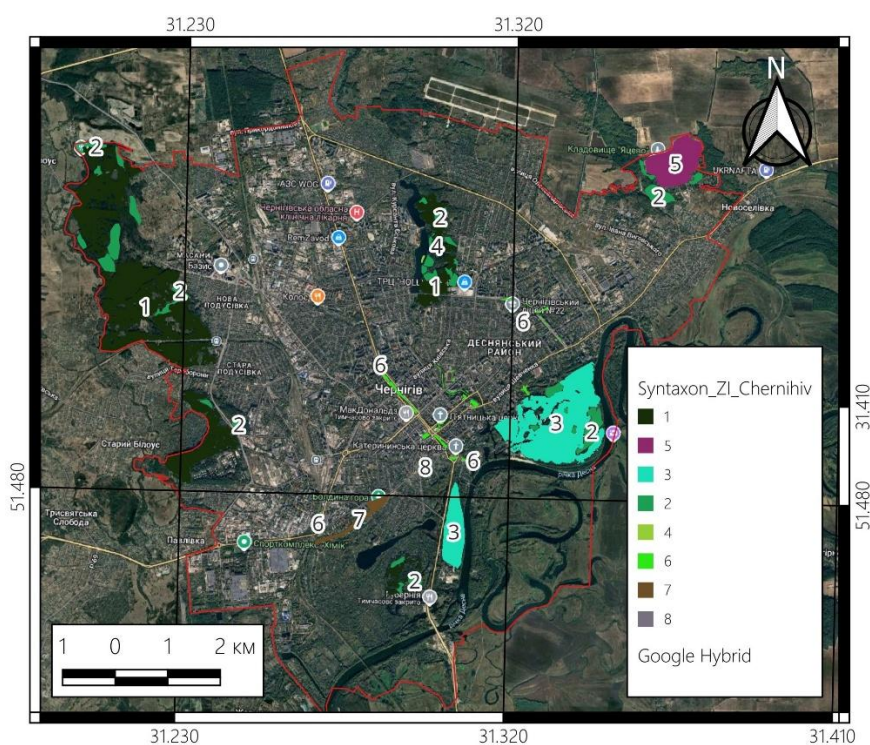


Рис. 7. Картосхема поширення рослинності в межах ядер мережі ЗІ м. Чернігова (1 - *Vaccinio-Piceetea*, 2 – *Robinietea*, 3 – *S. purpureae* + *Al. glutinosae*, 4 - *Trifolio-Geranietea sanguinei*, 5 – синантропна рудерально-декоративна рослинність, 6 - *Molinio-Arrhenatheretea*, 7 - *Quercetea pubescentis*, 8 – синантропні чагарникові угруповання)

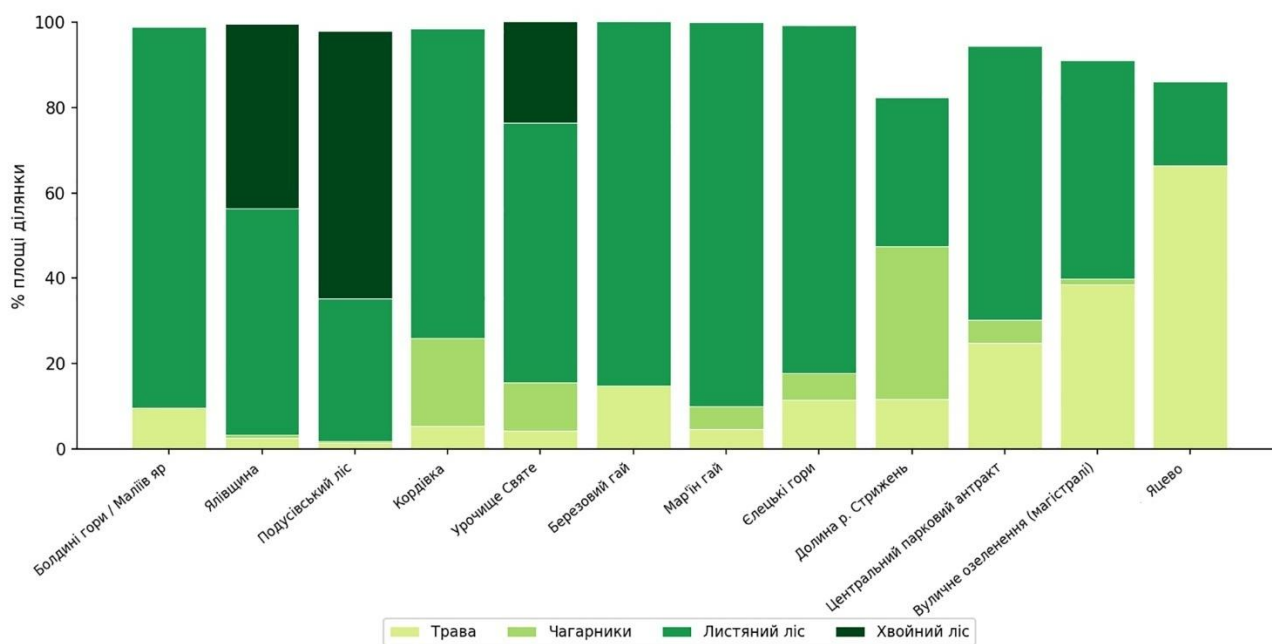


Рис. 8. Структура рослинного покриття за елементами мережі ЗІ

Найбільші за площею ділянки рослинного покриття мережі ЗІ представлені антропогенно трансформованими борами класу *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939, переважно асоціації *Peucedano-Pinetum* W.Matuszkiewicz (1962) 1973, поширеними у Подусівському лісі, урочищі Ялівщина та частково в урочищі Святому (502,5 га, 37,2 % площі мережі – найбільший за площею синтаксон, передусім за рахунок уточненої межі Подусівського лісу). За даними Lukash et al. (2020), у парку домінують трансформовані соснові бори та березові ліси, у яких трапляються як характерні види класу *Vaccinio-Piceetea*, так і види класу *Robinietae*, а в підліску й трав'яному ярусі цих лісових угруповань часті синантропні види. Унаслідок тривалого рекреаційного навантаження трав'яний ярус подекуди деградований, що узгоджується з найнижчими в межах цього синтаксону значеннями NDVI, зафіксованими на периферії Подусівського лісу (середнє NDVI 0,802, мінімальне – значно нижче).

По всій мережі ЗІ – у Подусівці, Ялівщині, на Болдиних горах, уздовж коридорів і навіть у межах заплавної Кордівки – розповсюджені угруповання класу *Robinietae* Jurko ex Hadač et Sofron 1980, сформовані *Robinia pseudoacacia* L. (405,7 га, 30,0 % площі мережі – другий за площею

синтаксон після *Vaccinio-Piceetea*). Це узгоджується з результатами Sádlo et al. (2019), які показали, що заміна корінних лісів плантаціями *Robinia pseudoacacia* спричиняє гомогенізацію лісової рослинності Центральної Європи. Dubińska et al. (2025) зазначають, що дослідження впливу цього виду на угруповання підліску на рівні синтаксонів у міських екосистемах залишаються рідкісними, а Varricchione et al. (2024) показали, що вид активно поширюється навіть у найбільш урбанізованих і фрагментованих ділянках – аналогічну закономірність ми спостерігаємо і в Чернігові: *Robinietae* домінує саме в межах фрагментованих коридорних елементів мережі, тоді як корінні класи зберігаються переважно в геоморфологічно захищених ядрах 1-го порядку.

Унікальним і найбільш природоохоронно цінним елементом мережі ЗІ є термофільна діброва Болдиних гір і Малієвого яру, угруповання якої тяжіють до класу *Quercetea pubescentis* Doing-Kraft ex Scamoni et Passarge 1959 (13,2 га, 1,0 % площі мережі). За даними польового обстеження (Lukash, 2021), деревний ярус (зімкнутість крон 50 %) сформований переважно (30–40 %) *Quercus robur* L. віком 200–400 років; у чагарниковому ярусі домінує раритетний *Prunus mahaleb* L. Трав'яний ярус

вирізняється участю ксероморфних видів (*Stipa capillata* L., *Euphorbia cyparissias* L., *Campanula bononiensis* L.) на тлі співдомінування *Elytrigia intermedia* (Host) Nevski та *E. repens* (L.) Nevski. Активне поширення *Robinia pseudoacacia* в чагарниковому ярусі є прямою загрозою збереженню цього реліктового ценозу (Goncharenko et al., 2020). Флористично ценози Болдиних гір суттєво відрізняються від типових центральноєвропейських угруповань класу (Hegedúsová et al., 2021) і термофільних дібров Українського Полісся (Онищенко, 2006). За рельєфом ця ділянка характеризується найбільшою крутизною схилів ($10,1^\circ$) і найвищим позитивним індексом топографічного положення ($TPI = +4,34$) серед усіх обстежених ядер, що прямо відповідає опису яружно-балкового рельєфу.

На схилах борової тераси Ялівщини зафіксовано невеликі плями угруповань порядку *Origanetalia vulgaris* T.Müller 1962 союзу *Trifolion medii* T.Müller 1962 класу *Trifolio-Geraniea sanguinei* T.Müller 1962, зокрема асоціацій *Vicio cassubicae-Trifolietum alpestris* (R.Tx. 1962) Passarge 1979 та *Trifolio-Agrimonetum* T.Müller 1961 (Lukash et al., 2020). Разом з іншими перехідними чагарниковими угрупованнями мережі вони сумарно становлять 82,8 га (6,1 %) і диференціюються від суміжних борових ценозів як перехідні смуги між лісовими масивами і відкритими схилами.

Урочище Кордівка та заплавна частина р. Десни є структурно найцілісніший елемент мережі ЗІ, що підтверджується найвищими значеннями вегетаційних індексів ($NDVI = 0,832$, $EVI = 0,572$, $LAI = 3,55$) та найнижчою густиною країв ландшафту (51,7 м/га за єдиного суцільного патча, $LPI = 100$ %). Тополево-вербові угруповання класів *Salicetea purpureae* Moog 1958 та *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et R.Tx. ex Westhoff et al. 1946 (198,6 га, 14,7 % площі мережі) утворюють гідроморфне ядро мережі. Застосований нами підхід до моніторингу цієї ділянки методично відповідає підходу Hislop et al. (2025): виділення заплавної зони за пороговим $NDVI$ з подальшим аналізом часових рядів; спільне методичне застереження обох досліджень – просторова роздільна здатність Sentinel-2 (10 м) є обмеженням при роботі з вузькими

прибережними смугами. Pace et al. (2022) підтверджують ефективність мультитемпоральних вегетаційних індексів для встановлення змін у прибережних зонах унаслідок гідрологічних процесів.

Газонні культурфітоценози сполучних коридорів представлені класом *Molinio-Arrhenatheretea* Tx. 1937 (асоціації *Lolio perennis-Cynosuretum cristati* Tx. 1937 та *Lolietum perennis* Gams 1927 (Lukash et al., 2023)). За площею цей синтаксон займає 67,6 га (5,0 % мережі), проте є одним із найбільш вразливих її елементів: вуличне озеленення демонструє одне з найнижчих середніх значень $NDVI$ серед усіх 12 обстежених ділянок (0,632, поступаючись лише кладовищу «Яцево») і водночас екстремальний рівень фрагментації (197 патчів, LPI лише 9,6 %, густина країв 1191,8 м/га). Ці цифри є прямим кількісним підтвердженням чотиристадійного ряду антропоїдигресивних сукцесій під впливом витоптування й посушливих умов (Lukash et al., 2023).

Єлецькі гори у центральній частині міста мають відносно високе значення $NDVI$ (0,786) як для ділянки, офіційно описаної як синантропне чагарникове угруповання (*Caragana arborescens* Lam., *Cotinus coggygria* Scop., *Lycium barbarum* L.). Це уявне протиріччя пояснюється двоярусною структурою рослинності: описані чагарники здебільшого ростуть під зімкнутим наметом високих листяних дерев. Супутниковий знімок Sentinel-2 фіксує відбиття переважно від верхнього ярусу, тому класифікація відносить більшість площі ділянки до класу «листяний ліс», не «бачачи» синантропного підліску, – це принципове обмеження оптичного дистанційного зондування для багоярусної рослинності. Відкриті куртини без деревного намету займають лише 0,2 га ділянки. За рельєфом Єлецькі гори характеризуються другою за величиною крутизною схилів ($8,8^\circ$) і від'ємним TPI ($-0,87$), що узгоджується з описом ерозійного рельєфу в центрі міста; ці угруповання виконують едафозахисну функцію в умовах зростаючої частоти злив (Морський та ін., 2026).

Порівняльна характеристика вегетаційних індексів по кожному елементу мережі наведена в табл. 4 і на рис. 9, а їхній просторовий розподіл – на рис. 10.

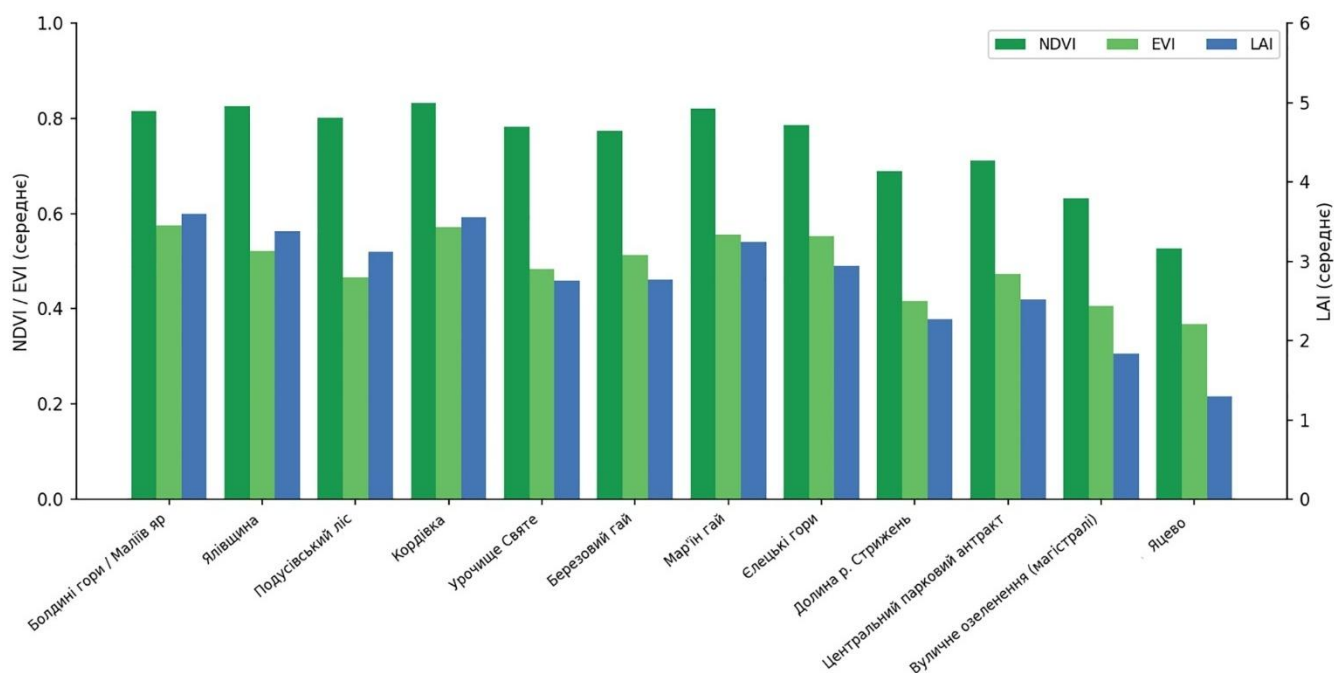


Рис. 9. Середні значення NDVI, EVI, LAI за елементами мережі ЗІ (2024 р.)

Таблиця 4

Значення вегетаційних індексів за елементами мережі ЗІ м. Чернігова (2024 р.)

Елемент мережі ЗІ	NDVI	EVI	LAI
Кордівка	0,832	0,572	3,55
Ялівщина	0,826	0,522	3,38
Болдині гори / Маліїв яр	0,815	0,576	3,59
Мар'їн гай	0,820	0,557	3,24
Подусівський ліс	0,802	0,466	3,12
Єлецькі гори	0,786	0,552	2,94
Урочище Святе	0,783	0,483	2,76
Березовий гай	0,774	0,513	2,77
Центральний парковий антракт	0,712	0,473	2,51
Долина р. Стрижень	0,689	0,416	2,27
Вуличне озеленення	0,632	0,407	1,84
Кладовище "Яцево"	0,527	0,367	1,30

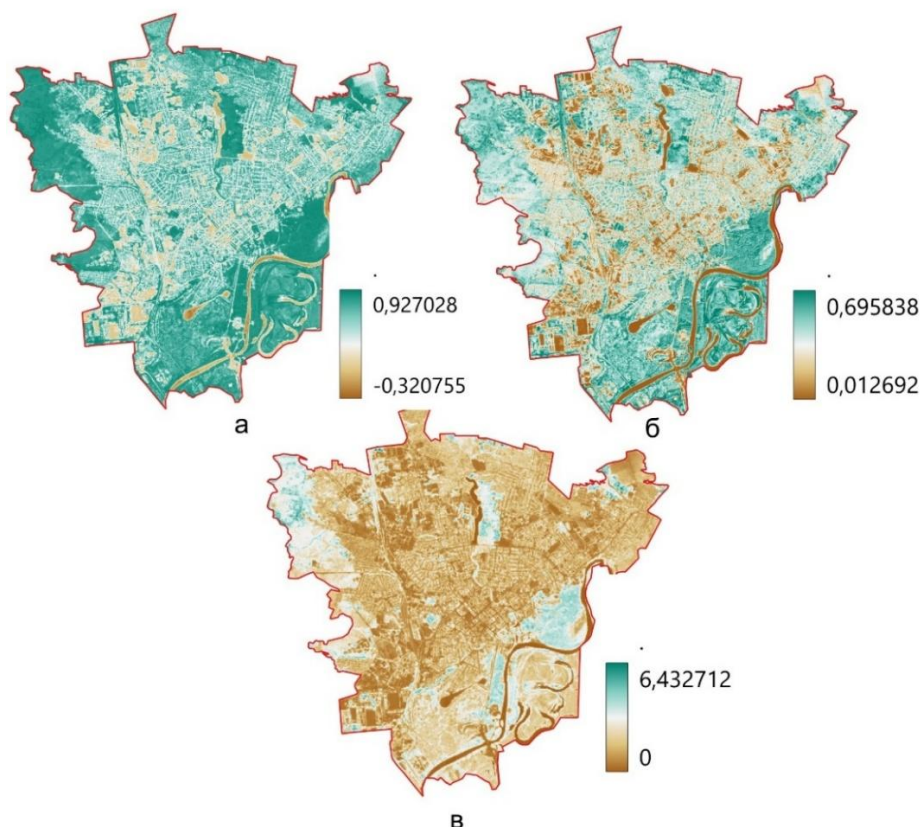


Рис. 10. Растрові карти вегетаційних індексів мережі ЗІ м. Чернігова (літній композит Sentinel-2, 2024 р.): А – NDVI; Б – EVI; В – LAI

Кладовище «Яцево» демонструє найнижчі значення всіх трьох індексів серед 12 обстежених елементів мережі, що кількісно підтверджує його статус найбільш трансформованої ділянки – наслідок як довготривалої синантропізації (домінування *Solidago canadensis*, за Lukash et al., 2026), так і бойових пошкоджень 2022 р.

Порівняння медіанних композитів NDVI 2020 і 2024 рр. для лісових ядер бореального типу (Ялівщина, Подусівський ліс) виявило ознаки посухового стресу, що

узгоджується з даними про прогресуючу аридизацію клімату Чернігова (Адаменко, 2014; Морський та ін., 2026).

Ландшафтні метрики фрагментації, розраховані по кожному з 12 елементів мережі (табл. 5, рис. 11), є найбільш об'єктивним кількісним індикатором ступеня антропогенної трансформації, оскільки на відміну від NDVI не залежать від методичного обмеження, пов'язаного з багатоярусністю рослинності.

Таблиця 5

Ландшафтні метрики фрагментації рослинного покриву за елементами мережі ЗІ

Елемент мережі ЗІ	Edge Density, м/га	К-ть патчів	LPI, %
1	2	3	4
Кордівка	51,7	1	100
Подусівський ліс	61,1	6	73,4
Ялівщина	72,7	1	100
Урочище Святе	83,8	1	100
Березовий гай	194,4	1	100
Кладовище "Яцево"	237,2	22	96,3

Продовження таблиці 5

1	2	3	4
Мар'їн гай	263,7	1	100
Центральний парковий антракт	287,7	5	52,5
Болдині гори / Маліїв яр	362,1	1	100
Єлецькі гори	434,5	1	100
Долина р. Стрижень	598,5	14	39,5
Вуличне озеленення	1191,8	197	9,6

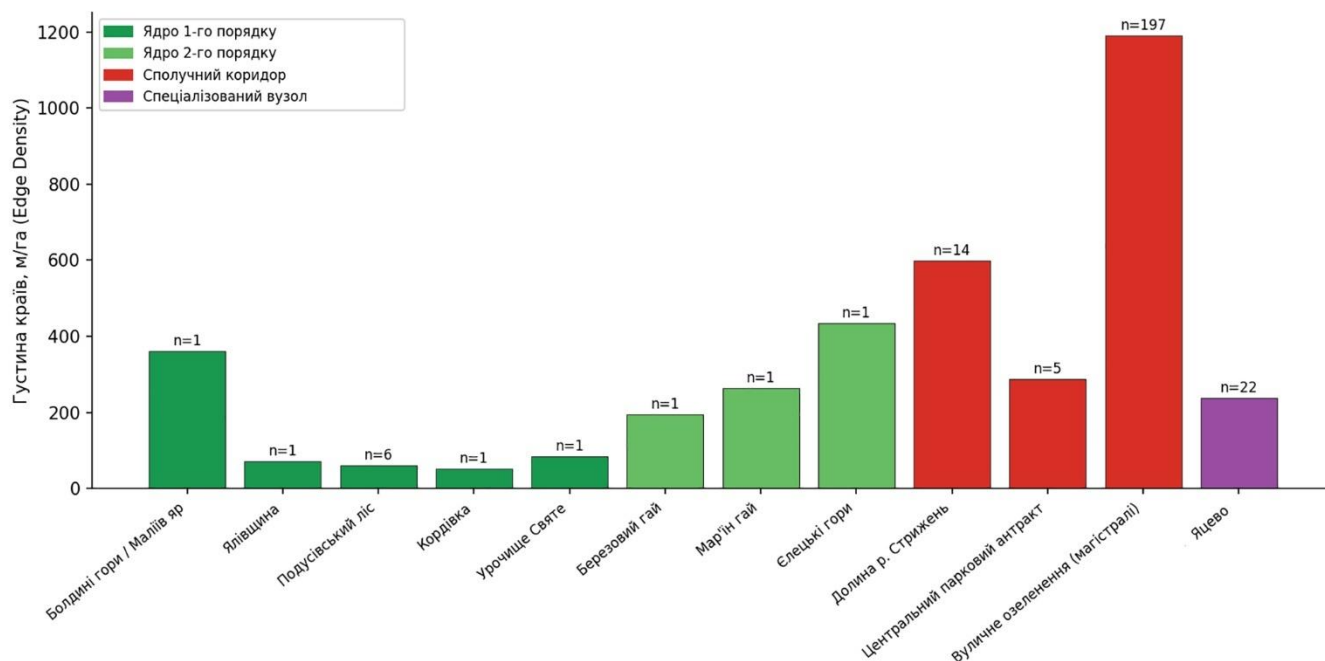


Рис. 11. Густина країв і кількість патчів рослинного покриття за елементами мережі ЗІ

Результати чітко відтворюють очікуваний градієнт трансформації мережі: ядра першого порядку є переважно суцільними масивами (LPI = 100 %), кладовище «Яцево» посідає проміжне положення (22 патчі, LPI = 96,3 %) – помітно фрагментованіший за природні ядра, але значно цілісніший за вуличні коридори, оскільки є єдиним масивом, а не розірваною лінійною смугою. Максимум фрагментації демонструє вуличне озеленення (197 патчів, LPI лише 9,6 %). Це узгоджується з висновком Liu et al. (2022) про те, що ділянки-джерела в горбистих районах мають кращу екологічну основу і вищу зв'язність, тоді як ділянки на рівнинних територіях сильно фрагментовані.

Запропонована модель мережі ЗІ Чернігова відповідає загальноприйнятій концепції, у якій ядра виступають

основними джерелами екосистемних послуг, а коридори забезпечують їх зв'язність (Huang et al., 2024). Систематичний огляд Li, L., & Carter, J. (2025) підтверджує, що зв'язність ЗІ через природні ландшафтні мережі є найефективнішим механізмом реалізації множинних екосистемних функцій. Водночас наш підхід суттєво відрізняється від більшості аналогічних міських досліджень тим, що просторова конфігурація мережі детермінована геоморфологічно, а не виводиться методами оптимізації чи MSPA-аналізу (Wang et al., 2024). Включення до мережі спеціалізованого техногенно-меморіального вузла «Яцево» розширює наявні уявлення про структуру міської ЗІ: як показано у дослідженні Lukash et al. (2026), навіть об'єкти ритуального призначення функціонують як повноцінні (хоч і сильно

трансформовані) вузли екологічної зв'язності між урбанізованими територіями і приміськими лісами, що узгоджується з міжнародною літературою про кладовища як «мовчазні» вузли зеленої інфраструктури (Sallay et al., 2023; Itescu & Jeschke, 2024).

Огляд Neyns & Canters (2022) констатує, що більшість досліджень міської рослинності методами дистанційного зондування обмежуються функціональними типами покриву, не виходячи на нижчі таксономічні рівні; аналогічний висновок робить і ширший огляд Dobrinić et al. (2025). Спроба поєднання фітосоціологічного підходу Браун-Бланке з проектуванням елементів ЗІ (Catalano et al., 2021) відома лише для зелених покривів. Наше дослідження є спробою поєднати повний цикл – від польових геоботанічних описів і синтаксономічної класифікації за Mucina et al. (2016) до автоматизованого картування засобами Google Earth Engine – у межах атрибутивно насиченої картосхеми мережі ЗІ українського міста. Відомий аналог GIS-моніторингу зелених зон в Україні – дослідження Харкова (Morar et al., 2022) – не включає флористичного чи синтаксономічного аналізу (пор. також Cegielska et al., 2022).

Дослідження має методичні обмеження. По-перше, просторова роздільна здатність Sentinel-2 (10 м) обмежує точність картування вузьких лінійних елементів і дрібноконтурних екотонів. По-друге, оптичне дистанційне зондування за визначенням не розрізняє яруси багаторусної рослинності, що продемонстровано на прикладі Єлецьких гір. По-третє, супутниковий шар ґрунтового покриву (роздільна здатність 250 м) виявився малоінформативним для диференціації між дрібними ядрами мережі і потребує заміни точнішими даними великомасштабного ґрунтового обстеження в подальших дослідженнях.

Висновки

Розроблено та апробовано методику автоматизованого GIS- картування рослинного покриву мережі зеленої інфраструктури міста засобами Random Forest у хмарній платформі Google Earth Engine з подальшою синтаксономічною атрибуцією контурів. Точність базової класифікації земного покриву на незалежній валідаційній вибірці

($n = 578$) становила Overall Accuracy 95,85 % при коефіцієнті Каппи 0,942.

Мережа зеленої інфраструктури м. Чернігова охоплює 12 структурних елементів загальною площею 1397,1 га: п'ять ядер першого порядку, три ядра другого порядку, три сполучні коридори та один спеціалізований техногенно-меморіальний вузол – кладовище «Яцево». Просторова конфігурація мережі жорстко детермінована геоморфологічним каркасом міста. Подусівський ліс – найбільший елемент мережі (50 % площі); разом з Кордівкою вони формують майже 70 % площі всієї мережі ЗІ.

У межах мережі виявлено вісім типів рослинності, що охоплюють шість класів за Браун-Бланке та два типи синантропних угруповань, не класифікованих до рівня класу. Найбільшу площу займають соснові бори класу *Vaccinio-Piceetea* (37,2 %, передусім за рахунок Подусівського лісу), другими за площею є трансформовані ліси класу *Robinietea* (30,0 %) і гідроморфні угруповання Кордівки класів *Salicetea purpureae* + *Alnetea glutinosae* (14,7 %); найменшу – реліктова діброва Болдиних гір класу *Quercetea pubescentis* (1,0 %).

Аналіз важливості прогностичних ознак класифікаційної моделі показав, що цифрова модель рельєфу (DEM) є найвпливовішою окремою змінною, випереджаючи всі спектральні канали й вегетаційні індекси, що емпірично підтверджує провідну роль геоморфологічної структури міста у формуванні просторового патерну рослинного покриву.

Ландшафтні метрики фрагментації виявилися найоб'єктивнішим кількісним індикатором трансформації елементів мережі: ядра першого порядку переважно є суцільними масивами (LPI = 100 %), кладовище «Яцево» демонструє помірну фрагментацію (22 патчі, LPI = 96,3 %), тоді як вуличне озеленення – екстремальну (197 патчів, LPI = 9,6 %, густина країв 1191,8 м/га).

Виявлено методичне обмеження оптичного дистанційного зондування для багаторусної рослинності: на прикладі Єлецьких гір показано, що класифікатор коректно розпізнає верхній деревний ярус, але не «бачить» синантропного чагарникового підліску під зімкнутим наметом.

До мережевої моделі ЗІ Чернігова інтегровано спеціалізований техногенно-меморіальний вузол – кладовище «Яцево» (94,95 га). Дані дистанційного зондування незалежно підтверджують висновки польового дослідження (Lukash et al., 2026) щодо високого ступеня синантропізації цієї ділянки: найнижчі серед усіх 12 елементів мережі значення NDVI (0,527), EVI (0,367) і LAI (1,30) відображають домінування інвазійного *Solidago canadensis* L. і наслідки бойових пошкоджень 2022 р.

Порівняльний аналіз часових рядів NDVI (2020–2024 рр.) виявив ознаки

посухового стресу лісових ядер бореального типу, що узгоджується з задокументованою прогресуючою аридизацією клімату регіону.

Отримані результати створюють кількісну основу для розробки пріоритетних заходів з екологічної оптимізації мережі ЗІ Чернігова, насамперед щодо підвищення зв'язності найбільш фрагментованих сполучних коридорів, контролю поширення інвазійної *Robinia pseudoacacia* в межах природоохоронно цінних ядер першого порядку та впровадження ресурсощадних стратегій відновлення техногенно-меморіальних вузлів мережі.

Фінансування / Funding

Дослідження виконано без залучення зовнішнього фінансування / The research was carried out without external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Первинні дані дослідження (скрипти Google Earth Engine, растрові й векторні шари класифікації, таблиці статистики) автори нададуть на запит зацікавлених осіб / The primary research data (Google Earth Engine scripts, raster and vector classification layers, statistical tables) will be provided by the authors upon reasonable request.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується, оскільки дослідження не передбачало роботи з людьми або лабораторними тваринами. / Not applicable, as the study did not involve human participants or laboratory animals.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор Олександр Яковенко є членом редакційної колегії Biota. Human. Technology. Він не брав участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийняття цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Author Oleksandr Yakovenko is the member of the editorial board of Biota. Human. Technology. He was 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

Під час підготовки цього рукопису автори використовували інструмент на основі великої мовної моделі (Claude, Anthropic) для написання й налагодження скриптів обробки супутникових даних у середовищі Google Earth Engine та статистичного опрацювання результатів класифікації. Автори ретельно переглянули та відредагували весь згенерований вміст і несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію статті / During the preparation of this manuscript, the authors used a large language model-based tool (Claude, Anthropic) for writing and debugging Google Earth Engine data-processing scripts and statistical analysis of classification results. The authors have thoroughly reviewed and edited all generated content and take full responsibility for the final published version of the article.

References

Adamenko, T. I. (2014). Agroclimatic zoning of the territory of Ukraine taking into account climate change (in Ukrainian). Cherkasy: RIA BLITs. (in Ukrainian)

Адаменко Т. І. Агрокліматичне зонування території України з урахуванням зміни клімату / за ред. А. М. Цветкової. Черкаси: «РІА» БЛІЦ, 2014.

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

Braun-Blanquet, J. (1964). Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde (3rd ed.). Springer-Verlag.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Capotorti, G., Alós Ortí, M. M., Copiz, R., Fusaro, L., Mollo, B., Salvatori, E., & Zavattero, L. (2019). Biodiversity and ecosystem services in urban green infrastructure planning. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.014>

Catalano, C., Pasta, S., & Guarino, R. (2021). A plant sociological procedure for the ecological design and enhancement of urban green infrastructure. In C. Catalano, M. B. Andreucci, R. Guarino, F. Bretzel, M. Leone, & S. Pasta (Eds.), *Urban services to ecosystems* (Future City, Vol. 17, pp. 31–60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75929-2_3

Cegielska, K., Piotrowski, P., & Kukulska-Kozieł, A. (2022). Urban green spaces: how geospatial information can help identify diversity. A case study from eastern Lesser Poland. *Bulletin of Geography. Socio-economic Series*, 58, 7–29. <https://doi.org/10.12775/bgss-2022-0031>

Dobrińić, D., Miler, M., & Medak, D. (2025). Mapping the green urban: a comprehensive review of materials and learning methods for green infrastructure mapping. *Sensors*, 25(2), 464. <https://doi.org/10.3390/s25020464>

Dubińska, A. M., Dyderski, M. K., & Niemczyk, M. (2025). How does non-native Robinia pseudoacacia L. affect urban forest biodiversity? *Urban Forestry & Urban Greening*, 113, Article 129079. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129079>

EUR-Lex. (n.d.). Document 52013DC0249. Green Infrastructure (GI) – Enhancing Europe's Natural Capital. European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52013DC0249>

Farr, T. G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004.. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), L08403. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>

GMAO. (n.d.). MERRA-2: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2. NASA GMAO. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/gmao-products/merra-2/>

- Goncharenko, I., Semenishchenkov, Yu., Tsakalos, J., & Mucina, L. (2020). Thermophilous oak forests of the steppe and forest-steppe zones of Ukraine and Western Russia. *Biologia*, 75, 337-353. <https://doi.org/10.2478/s11756-019-00413-w>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From Multifunctionality to Multiple Ecosystem Services? A Conceptual Framework for Multifunctionality in Green Infrastructure Planning for Urban Areas. *AMBIO*, 43, 516–529. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0510-2>
- Hegedúšová, K., Žarnovičan, H., Kanka, R., Šuvada, R., Kollár, J., Galváněk, D., & Roleček, J. (2021). Thermophilous oak forests in Slovakia: Vegetation classification and an expert system. *Preslia*, 93(2), 89–123. <https://doi.org/10.23855/preslia.2021.089>
- Hislop, S., Soto-Berelov, M., Jellinek, S., Chee, Y.E. and Jones, S (2025). Monitoring riparian vegetation in urban areas with Sentinel-2 satellite imagery. *Ecological Management & Restoration*, 26, e12624. <https://doi.org/10.1111/emr.12624>
- Huang, H., Fu, D., Ding, G., Yan, C., Xie, X., Gao, Y., & Liu, Q. (2024). Construction and optimization of Green Infrastructure Network in mountainous cities: A case study of Fuzhou, China. *Scientific Reports*, 14, Article 11936. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57567-0>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Itescu, Y., & Jeschke, J. M., 2024, Assessing the conservation value of cemeteries to urban biota around the world. *Conservation Biology*, 38, e14322. <https://doi.org/10.1111/cobi.14322>
- Lafortezza, R., Chen, J., van den Bosch, C. K., & Randrup, T. B. (2018). Nature-based solutions for resilient landscapes and cities. *Environmental Research*, 165, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.038>
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457–465. <https://doi.org/10.1109/36.377946>
- Liu, Y., Huang, T. T., & Zheng, X. (2022). A method of linking functional and structural connectivity analysis in urban green infrastructure network construction. *Urban Ecosystems*, 25(3), 909–925. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01201-2>
- Li, L., & Carter, J. (2025). Exploring the relationship between urban green infrastructure connectivity, size and multifunctionality: a systematic review. *Landscape Ecology*, 40(3), 61. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02069-1>
- Lukash, O., Karpenko, Yu., Sverdlov, V., & Yakovenko, O. (2020). Parki krajobrazowe regionu czernihowskiego (Ukraina Północna). In M. Kunz (Ed.), *Rola i funkcjonowanie parków krajobrazowych w rezerwatach biosfery* (pp. 365–378). Wydawnictwo Naukowe UMK. (in Polish)

Lukash, O. V. (2021). Steppe oak forest with *Prunus mahaleb* L. in the city of Chernihiv. In Modern phytosozological research in Ukraine (Iss. 4, pp. 48–52). Talkom. (in Ukrainian)

Лукаш О. В. Остепнена діброва з *Prunus mahaleb* L. у місті Чернігові // Сучасні фітосозологічні дослідження в Україні: зб. наук. праць. Вип. 4. Київ: Талком, 2021. С. 48–52.

Lukash, O., Hutnyk, Ye., & Morskyi, V. (2023). Succession of vegetation of roadside lawns in the city of Chernihiv. *Biota, Human, Technology*, (3), 41–56. <https://doi.org/10.58407/bht.3.23.5> (in Ukrainian)

Лукаш О., Гутник Є., Морський В. Сукцесії рослинності придорожніх газонів міста Чернігова у зв'язку антропогенним тиском та змінами погодно-кліматичних умов. *Biota, Human, Technology*. 2023. №3. С. 41–56. <https://doi.org/10.58407/bht.3.23.5>

Lukash, O., Morskyi, V., & Strilets, S. (2026). Cemeteries as nodes of urban green infrastructure: assessing ecological risks in war-affected areas of "Yatsevo" necropolis, Chernihiv, Ukraine. *Ecological Questions*, 37(3). <https://doi.org/10.12775/EQ.2026.039>

Morar, C., Lukić, T., Valjarević, A., Niemets, L., Kostrikov, S., Sehida, K., Telebienieva, I., Kliuchko, L., Kobylin, P., & Kravchenko, K. (2022). Spatiotemporal analysis of urban green areas using change detection: A case study of Kharkiv, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 10, Article 823129. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.823129>

Morskyi, V., Aravin, M., Morska, I., & Lukash, O. (2026). Geomorphological and climatic factors of formation and optimization of the green infrastructure network of Chernihiv city. In Biogeosphere and Socium: International Scientific Conference (pp. 426–429). (in Ukrainian)

Морський В., Аравін М., Морська І., Лукаш О. Геоморфологічні та кліматичні чинники формування та оптимізації мережі зеленої інфраструктури міста Чернігова. *Biogeosphere and Socium: International Scientific Conference* (25–27 березня 2026 р., Берегове, Україна). С. 426–429.

Mucina, L., Bültmann, H., Dierßen, K., Theurillat, J.-P., Raus, T., Čarni, A., Šumberová, K., Willner, W., Dengler, J., García, R. G., Chytrý, M., Hájek, M., Di Pietro, R., Iakushenko, D., Pallas, J., Daniëls, F. J. A., Bergmeier, E., Guerra, A. S., Ermakov, N., Valachovič, M., Schaminée, J. H. J., Lysenko, T., Didukh, Y. P., Pignatti, S., Rodwell, J. S., Capelo, J., Weber, H. E., Solomeshch, A., Dimopoulos, P., Aguiar, C., Hennekens, S. M., & Tichý, L. (2016). Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities. *Applied Vegetation Science*, 19(S1): 3–264. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/avsc.12257>

Neyns, R., & Canters, F. (2022). Mapping of Urban Vegetation with High-Resolution Remote Sensing: A Review. *Remote Sensing*, 14(4), 1031. <https://doi.org/10.3390/rs14041031>

Onyshchenko, V. A. (2006). Vegetation classification. In T. L. Andriyenko (Ed.), *Phytodiversity of Ukrainian Polissya and its conservation*. Fitosotsiotsentr. (in Ukrainian; full details to be confirmed)

Онищенко В. А. Класифікація рослинності // Фіторізноманіття Українського Полісся та його охорона / за ред. Т. Л. Андрієнко. Київ: Фітосоціоцентр, 2006.

POWO. (2024). Plants of the World Online. Royal Botanic Gardens, Kew. <http://www.plantsoftheworldonline.org/>

QGIS Development Team. (2024). QGIS Geographic Information System (Version 3.x) [Computer software]. QGIS Association. <https://www.qgis.org>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (Vol. 1, pp. 309–317). NASA SP-351. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>

Sallay, Á., Tar, I. G., Mikházi, Z., Takács, K., Furlan, C., & Krippner, U., 2023, The role of urban cemeteries in ecosystem services and habitat protection. *Plants*, 12(6): 1269. <https://doi.org/10.3390/plants12061269>

Varricchione, M., Laura Carranza, M., D'Angeli, C., Carla de Francesco, M., Innangi, M., Santoianni, L. A., & Stanisci, A. (2024). Exploring the distribution pattern of native and alien forests and their woody species diversity in a small Mediterranean city. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 158(6), 1335–1346. <https://doi.org/10.1080/11263504.2024.2415613>

Verkhovna Rada of Ukraine. (2025). Law of Ukraine "On the Improvement of Settlements" (Document 2807-IV). (in Ukrainian)

Верховна Рада України. Закон України «Про благоустрій населених пунктів» (документ 2807-IV, чинна редакція від 30.08.2025). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2807-15#Text>

Wang, D., Xu, P., An, B. and Guo, Q. (2024) Urban Green Infrastructure: Bridging Biodiversity Conservation and Sustainable Urban Development through Adaptive Management Approach. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12, 1440477. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1440477>

Received: 16.07.2026. **Accepted:** 23.08.2026. **Published:** 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Яковенко О., Морський В. Картування рослинного покриву зеленої інфраструктури м. Чернігова засобами ГІС. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 44-64. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.4>

Cite this article in APA style as:

Yakovenko O., & Morskyi V. (2026). Kartuvannia roslynnoho pokryvu zelenoi infrastruktury m. Chernihova zasobamy HIS [GIS-based mapping of vegetation cover in Chernihiv's green infrastructure]. *Biota. Human. Technology*, (2), 44-64. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.4> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Yakovenko O. [in Ukrainian: **Яковенко О.**] ¹, Cand. Sc. (Biol.), email: ajakov2@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1417-6042

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

Morskyi V. [in Ukrainian: **Морський В.**] ², Postgraduate student, email: zelenbudkp@gmail.com
ORCID: 0009-0000-2465-6731

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

¹ Data Curation; Conceptualization; Methodology; Software; Formal analysis; Investigation; Writing – Original Draft; Visualization.

² Investigation; Software, Writing – Review & Editing; Field data validation.

UDC 582.35/.99:504.4:627.512(282.247.32)

DOI: 10.58407/bht.2.26.5



Copyright (c) 2026 Valerij Novosad, Olha Shcherbakova, Kateryna Novosad

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/).

Валерій Новосад, Ольга Щербаківа, Катерина Новосад

РАРИТЕТНІ ВИДИ СУДИННИХ РОСЛИН
МІЖНАРОДНОЇ, НАЦІОНАЛЬНОЇ ТА РЕГІОНАЛЬНОЇ ОХОРОНИ ФЛОРИ
НИЖНЬОГО ПРИДНІПРОВ'Я В ЗОНІ КАТАСТРОФІЧНОГО ПАВОДКУ,
СПРИЧИНЕНОГО ПІДРИВОМ КАХОВСЬКОЇ ГЕС



Valerij Novosad, Olha Shcherbakova, Kateryna Novosad

RARE VASCULAR PLANT SPECIES OF INTERNATIONAL, NATIONAL AND REGIONAL
CONSERVATION SIGNIFICANCE IN THE FLORA OF THE LOWER DNIPRO REGION
WITHIN THE ZONE OF CATASTROPHIC FLOODING CAUSED BY THE DESTRUCTION
OF THE KAKHOVKA HYDROELECTRIC POWER

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Провести інвентаризацію раритетної компоненти судинних рослин міжнародної, національної та регіональної охорони зони впливу катастрофічного паводку Нижнього Придніпров'я спричиненого підривом Каховської ГЕС.

Методологія. Флористичні дослідження регіону Нижнього Придніпров'я проводилися в період з 2014 по 2021 рр. Об'єктом вивчення була природна флора судинних рослин та її раритетна компонента міжнародної національної та регіональної охорони, популяції якої зазнали збитків, спричинених вчиненням екоцидом. Созологічний аналіз флори здійснювали на основі чинних природоохоронних кадастрів і баз даних національного, регіонального та міжнародних рівнів. Назви таксонів судинних рослин та їхній обсяг прийнято згідно з Plants of the World Online (2026), номенклатурні синоніми наведено за чеклістом Mosyakin & Fedoronchuk (1999).

Наукова новизна. Проведено комплексний созологічний аналіз раритетної компоненти флори зони катастрофічного затоплення регіону Нижнього Придніпров'я. Вперше встановлено таксономічний склад та природоохоронні статуси раритетної компоненти флори зони екологічного лиха. Проведено оцінку представленості созофітів у природоохоронних кадастрах міжнародного, національного та регіонального рівнів, визначено їхні категорії рідкості та созологічну значущість.

Висновки. Встановлено, що флора регіону Нижнього Придніпров'я яка репрезентує єдину вцілілу еталонну ділянку природного русла та дельти Дніпра з збереженим фітобіотичним різноманіттям налічує лише в зоні екоциду 549 видів судинних рослин, з яких 439 – відносяться до аборигенної фракції, а 110 – до адвентивної. Її раритетна компонента міжнародного, національного та регіонального рівнів зони екоциду, викликаного катастрофічним паводком, налічує 53 види судинних рослин, що становить 12,1 % від видового складу аборигенної флори. В межах зони катастрофічного паводку виявлено 199 видів судинних рослин, представлених в офіційних та рекомендаційних міжнародних природоохоронних документах та базах даних, з яких лише 25 аборигенних видів мають офіційний правовий міжнародний статус, що підтверджується національним та регіональним рівнем охорони. Решта 174 видів з категоріями LC та DD у флорі України не є пріоритетними для охорони. Серед созофітів міжнародного рівня 4 види включені до офіційних міжнародних природоохоронних документів, зокрема до Переліку видів, затвердженого Резолюцією № 6 Постійного комітету Бернської конвенції та Додатку II Директиви Ради 92/43/ЄЕС (*Aldrovanda vesiculosa*) та CITES (*Anacamptis palustris*, *Dactylorhiza incarnata*, *Eipactis palustris*). Созофіти національного рівня охорони в зоні затоплення представлені 23 видами, 13 з яких мають категорію вразливі, 6 - неоцінені, 4 – рідкісні, а регіонального рівня охорони нараховують 26 видів рослин. Раритетна компонента представлена переважно полікарпічними трав'янистими рослинами, приуроченими до водних, прибережно-водних, лучних, степових і псамофітних комплексів, що найбільше постраждали внаслідок катастрофічного паводку.

Ключові слова: судинні рослини, флора, раритетна компонента, міжнародний, національний та регіональний рівні охорони, антропогенні чинники, катастрофічний паводок, екоцид, Нижнє Придніпров'я

ABSTRACT

Purpose of the work. To conduct an inventory of the rare phytogene pool of vascular plants of international, national and regional conservation importance within the area affected by the catastrophic flooding of the Lower Dnipro caused by the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant.

Methodology. Floristic surveys of the Lower Dnipro region were carried out during the period from 2014 to 2021. The object of the study was the natural vascular plant flora and its rare component of national, regional and international conservation importance, the populations of which suffered damage as a result of the ecocide. A zoological analysis of the flora was conducted using the current conservation inventories and databases at the national, regional and international levels. The nomenclature and taxonomic circumscription of vascular plant taxa follow Plants of the World Online (2026) and the nomenclatural checklist of Mosyakin & Fedoronchuk (1999).

Scientific novelty. A comprehensive zoological analysis of the rare component of the flora within the catastrophic flood zone of the Lower Dnipro region was carried out. For the first time, the taxonomic composition and conservation status of the rare component of the flora within the ecological disaster zone were established. The representation of rare plant taxa in conservation inventories at the national, regional and international levels was assessed, and their rarity categories and zoological significance were determined.

Conclusions. It was established that the flora of the Lower Dnieper region, which represents the only surviving reference site of the natural channel and the Dnieper delta with preserved phytobiotic diversity, includes 549 species of vascular plants in the ecocide zone alone, of which 439 belong to the aboriginal fraction and 110 to the adventive fraction. Its rare component of the international, national and regional levels of the ecocide zone caused by the catastrophic flood includes 53 species of vascular plants, which is 12.1 % of the species composition of the aboriginal flora. Within the catastrophic flood zone, 199 species of vascular plants were identified, represented in official and recommendatory international nature protection documents and databases, of which only 25 aboriginal species have an official legal international status, which is confirmed by the national and regional level of protection. The remaining 174 species with LC and DD categories in the flora of Ukraine are not a priority for protection. Among the zoophytes of the international level, 4 species are included in official international nature protection documents, in particular, in the List of species approved by Resolution No. 6 of the Standing Committee of the Bern Convention and Annex II to Council Directive 92/43/EEC (*Aldrovanda vesiculosa*) and CITES (*Anacamptis palustris*, *Dactylorhiza incarnata*, *Epipactis palustris*). Zoophytes of the national level of protection in the flood zone are represented by 23 species, 13 of which are in the vulnerable category, 6 - unvalued, 4 - rare, and the regional level of protection includes 26 plant species. The rare component is represented mainly by polycarpic herbaceous plants confined to aquatic, coastal-aquatic, meadow, steppe and psammophyte complexes, which were most affected by the catastrophic flood.

Key words: vascular plants, flora, rare component, international, national and regional conservation, anthropogenic factors, catastrophic flooding, ecocide, Lower Dnipro Region

Вступ

Об'єднані енергосистеми півдня України ще до війни мали значні труднощі в покритті пікових електричних потужностей. Для вирішення проблеми раціонального їхнього покриття необхідно було вводити спеціальні маневрові заходи, одним з яких був проєкт спорудження Каховської ГЕС-2 (м. Нова Каховка) (рис. 1а). Ним передбачалося роботу станції тільки для зняття пікових навантажень в енергомережах, тому вона розглядалася як гідроакумуюча електростанція (ГАЕС). При цьому рівень Дніпра в нижньому б'єфі під час її роботи мав підніматися майже на метр, а при одночасній роботі з Каховською ГЕС-1 до 1,8 м. Нівелювання цього тимчасового підвищення очікувалося за 100 км від греблі за околицями Херсона. Вся ця зона впливу (ЗВ) запроектованої Каховської ГЕС-2 (КГЕС-2)

мала знаходитися у межах Національного природного парку «Нижньодніпровський» – об'єкту Смарагдової мережі, котрий репрезентує дельту Дніпра з типовими природними ландшафтами, багатою флорою і рослинністю і який може розглядатися як еталонна ділянка природної заплави після створення каскаду водосховищ на Дніпрі.

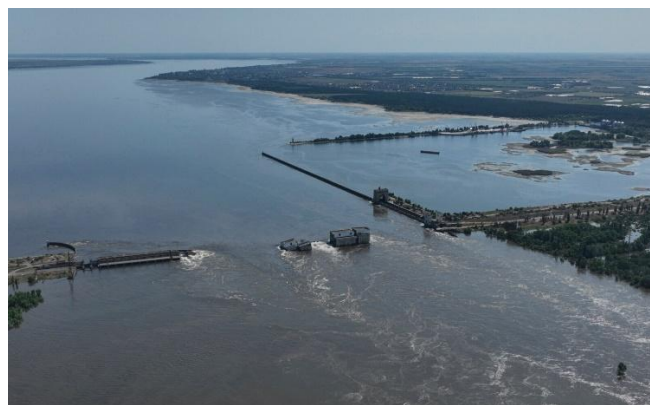
Нижнє Придніпров'я – унікальна природна система, неповторний водно-територіальний комплекс, що вирізняється з поміж інших регіонів надзвичайним біо- та ландшафтним різноманіттям. Саме тут розташована наймолодша за історичним віком суша, що виникла і щорічно змінюється наносами Дніпра. Біотопи дельти Дніпра представлені водно-болотними фітосистемами, що є ефективним природним кондиціонером, за біологічною активністю які можна

порівняти з найпродуктивнішими біомами Землі. Дельти Дніпра і Дунаю є одними з найбільших естуаріїв світу, що відзначаються високою активністю функціональних процесів на екосистемному рівні, мають значні показники біологічної продуктивності та різноманітності (Shelyag-Sosonko et al., 1999). Для збереження цього регіону України 30 серпня 2013 р. за № 547

було видано наказ «Про створення національного природного парку (НПП) «Ниžньодніпровський». Окремі аспекти видового складу флори території Парку та її раритетної компоненти висвітлено в наукових працях (Boiko M., 2005; Boiko P., 2003, 2010; Dzerkal, V. M et al., 2018; Rare plant..., n.d.).



А



Б

Рис. 1. Каховська ГЕС**А – до підриву дамби; Б - після підриву дамби**

А



Б

Рис. 2. Катастрофічний паводок внаслідок підриву дамби Каховської ГЕС.**А, Б – масштабне затоплення населених пунктів і природних флорокомплексів у нижній течії Дніпра**

Враховуючи те, що зона впливу запроєктованої Каховської ГЕС-2 знаходилася в межах національного природного парку з високим фіто- та ценозологічним статусом і який, до того ж, є об'єктом Смарагдової міжнародної мережі, необхідні були особливо детальні, поглиблені та повномасштабні дослідження фіто-, флороти та ценозорізноманіття. Особливо це стосується раритетної фітокомпоненти, види якої мають міжнародний, національний та

регіональний соціологічні статуси. Крім того, особлива увага приділялася процесам синантропізації флори та її комплексів, серед яких чільне місце відводилося фітоінвазіям, що спричиняють глобальні процеси біологічного забруднення. На базі отриманих наукових результатів необхідно було розробити та впровадити ряд заходів та рекомендацій, котрі б суттєво знижували негативний вплив на фітобіоту регіону в цілому і популяції раритетних видів

зокрема, під час будівництва та експлуатації запроєктованого гідроенергооб'єкту (Novosad et al., 2019).

Підри́в російськими окупантами греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. (рис. 1, б) призвів до глобальної екологічної біди, нищівні наслідки якої остаточно ще нез'ясовані. Руйнування греблі, обміління одного з найбільших в Європі Каховського водосховища та спустошлива повінь викликали екологічну катастрофу, яка за ст. 441 КК України розглядається як «Екоцид» (Criminal Code of Ukraine, 2001). Внаслідок катастрофи з водосховища вилилося близько 19 км³ води, що спричинило затоплення понад 600 км² території, переважно Херсонської обл. Середній рівень затоплення складав 5,6 м, для більшості територій понад 8 м, а біля самої греблі – 12 м (рис. 2, а, б) (Preliminary..., 2023; Ukrainian Hydrometeorological Center, 2024). В зоні затоплення опинилися об'єкти природно-заповідного фонду Нижнього Придніпров'я, серед яких найбільших втрат зазнали НПП «Нижньодніпровський» та Чорноморський біосферний заповідник, частково – території НПП «Олешківські піски», НПП «Білобережжя Святослава» та РЛП «Кінбурнська коса».

Нижче Каховської ГЕС в межах природного русла Дніпра на його берегах та островах сформувалися гідро- та гігрофільні фітосистеми стоячих та повільнотекучих водойм, плавнів, заплавних лісів та чагарників, луків які не пристосовані до швидкої течії. Тому катастрофічно постраждало не тільки їхнє фіторізноманіття. В зону затоплення попали степові, лісові, чагарникові, псамофітні та петрофітні ксерофільні флорокомплекси, генезис яких проходить в умовах дефіциту водозабезпечення при повній відсутності згубних паводкових явищ. Саме ці флорокомплекси зазнали найбільших збитків і в першу чергу це стосується їхньої, найбільш вразливої до дії негативних антропогенних чинників – раритетної фітокомпоненти.

Підри́в греблі Каховської ГЕС, та спричинений цим катастрофічний паводок який розглядається як акт екоциду, призвели до масштабної трансформації природних комплексів Нижнього Придніпров'я та поставили під загрозу існування численних популяцій рідкісних видів

рослин. Водночас узагальнені відомості про таксономічний склад і природоохоронний статус раритетної компоненти флори зони катастрофічного затоплення практично відсутні, що визначає актуальність проведеного дослідження.

Метою роботи є інвентаризація раритетної компоненти судинних рослин міжнародного, національного та регіонального рівнів охорони зони катастрофічного паводку.

Матеріали та методи дослідження

Флористичні та фітосозологічні дослідження, у вигляді наукових проєктів установ замовника ПРАТ «Укргідроенерго» (Київ) (2014–2015 рр.) та генерального проєктувальника ПРАТ «Укргідропроєкт» (Харків) (2017–2020 рр.) були запропоновані до виконання відділу ботаніки Національного науково-природничого музею НАН України. Ці дослідження виконувалися також в межах бюджетної (№ III-12-18 «Видове, популяційне, флорокомплексне різноманіття та созологічні аспекти регіональних природних і урбаногенних флор України» (2014–2022 рр.)) та конкурсної (№ II-27-25 «Розроблення критеріїв оцінки біотичного різноманіття та цінності природних об'єктів на окремих заповідних і порушених воєнними діями територіях України для визначення функціональної стійкості екосистем та рівня антропогенної трансформації біоти» (2025–2026 рр.)) тематик.

В ключову частину регіону Нижнього Придніпров'я з найбільшим фіто-, флоро- та ландшафтним різноманіттям, що охоплює 100 км ділянку долини Дніпра від м. Нова Каховка до південних околиць м. Херсон – початку формування дельтово-естуарної частини Дніпра, було проведено 8 тривалих експедиційних виїздів в різні вегетаційні сезони. Польові дослідження охоплювали не лише зону впливу КГЕС-2, а й суміжні території природної флори Нижньодніпровського флористичного району. Отримані наукові матеріали фітосозологічного характеру й стали в подальшому основою для проведення інвентаризації раритетної компоненти судинних рослин міжнародної, національної та регіональної охорони зони екоциду в межах катастрофічного паводку, спричиненого руйнуванням греблі

Каховської ГЕС. Оскільки ці території й зараз перебувають в зоні бойових дій та тимчасової окупації польові дослідження після 2022 р не проводилися.

Оснoву для інвентаризації раритетного фітогенофонда регіону Нижнього Придніпров'я становили результати власних флористичних обстежень (2014–2021 рр.), аналіз літературних джерел (Kosets, 1936; Skrypko, 1969; Zhukinskyi & Klovov, 1987; Krytska, 1988; Krytskaya & Novosad, 2001; Boyko M. & Podhaynyi, 2002; Boiko M. & Boiko P., 2004; Boiko M., 2005; Dubyna et al., 2006; Boiko P., 2010; Umanets & Moysiienko, 2012; Boiko M. et al., 2013, Zakharova & Moysiienko, 2016, 2017; Dzerkal et al., 2018; Moysiienko et al., 2019, 2020; Fedoronchuk, 2022) та гербарних матеріалів KW та KWNM.

Созологічний аналіз проводили на підставі чинних природоохоронних кадастрів: Переліку видів, що потребують спеціальних заходів охорони оселищ Резолюції № 6 Постійного комітету Бернської конвенції (Resolution No. 6 (1998) listing the species requiring specific habitat conservation measures) (Revised Annex I..., 2011); Додатку II Директиви Ради 92/43/ЄЕС від 21 травня 1992 року про збереження природних оселищ та дикої фауни і флори (Habitats Directive) (Council Directive..., 1992); Переліку видів, включених до додатків Конвенції про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори, що перебувають під загрозою зникнення (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES)) (Checklist of CITES..., 2025); Переліку видів рослин та грибів, занесених до Червоної книги України (Lists of plant..., 2021), Переліку видів рослин, що підлягають особливій охороні на території Херсонської області (Red List of Kherson..., 2013). Враховані дані Світового червоного списку МСОП (The IUCN Red List of Threatened Species) (The IUCN..., 2025), а також розроблених на його методологічній основі та заснованих на категоріях і критеріях МСОП регіональні європейські бази даних та інформаційні ресурси: Європейський червоний список судинних рослин (European Red List of Vascular Plants) (Bilz et al., 2011), Бази даних червоних списків судинних рослин Європи (European Vascular Plants Red Lists) (Liu et al., 2024; Lončarević et al., 2024) та Європейський

червоний список дерев (European Red List of Trees) (Rivers et al., 2019), які в Україні не мають юридичної сили та не є нормативно-правовими документами, проте є авторитетними міжнародними науковими джерелами для оцінки ризику зникнення видів рослин та визначення пріоритетів їхньої охорони.

Під час аналізу міжнародного охоронного статусу видів використано категорії Червоного списку МСОП: *під загрозою зникнення* (EN – *Endangered*), *вразливий* (VU – *Vulnerable*), *близький до загрозливого стану* (NT – *Near Threatened*), *під найменшим ризиком* (LC – *Least Concern*) та *даних для оцінки недостатньо* (DD – *Data Deficient*), *даних для оцінки недостатньо (неоцінений)* (NE – *Not Evaluated*).

До переліку созофітів міжнародного рівня зони катастрофічного паводку включено аборигенні види регіону дослідження, які мають підтверджений охоронний статус відповідно до офіційних природоохоронних документів (Переліку видів Резолюції № 6, Директиви Ради 92/43/ЄЕС, CITES), а також види категорій МСОП із підвищеним ризиком зникнення; види категорій LC та DD враховували лише за наявності додаткового підтвердженого охоронного статусу на національному або регіональному рівнях (Червона книга України, регіональний червоний список тощо).

Для кожного виду визначені тип біоморфи (Pk – полікарпик, Mk – монокарпик, Fr – чагарник, Frt – чагарничок, Sfrt – напівчагарничок, Ar – дерево), екоценоморфа (St – степант, Pr – пратант, PrPa – пратопалюдант, Si – сільвант, SiPt – сільвопетрофант, Ps – псамофант, StPt – степопетрофант, Mg – маргант, PsHa – псамогалофант, Pt – петрофант, PrSt – пратостепант, Pa – палюдант, Aq – аквант, Ri – ріпаріоаквант, Sn – синантропофант) (Novosad et al., 2009, 2013; Novosad, & Krytska, 2010;) та вказана категорія рідкості.

Назви таксонів судинних рослин та їхній обсяг прийнято згідно з базою даних Plants of the World Online (Plants of the World Online, 2026), номенклатурні синоніми наведено за чеклістом Mosyakin & Fedoronchuk (1999).

Результати дослідження та обговорення

Території дослідження з точки зору фізико-географічного районування України (Marynych et al., 2007) відносяться до Південнестепової (сухостепової) підзони, Причорноморсько-Приазовського краю, Нижньодніпровська терасово-дельтова низовинної області, Голопристансько-Дніпрянського району.

Загалом, за даними наших польових досліджень, опрацювання літературних та електронних джерел та гербарних колекцій (власних, KWNM та KW) було встановлено, що тут у зоні катастрофічного паводку регіону Нижнього Придніпров'я зростає 549 видів судинних рослин, з яких 439 – відносяться до аборигенної фракції, а 110 видів – до адвентивної. Значна кількість інвазійного елементу свідчить про високий рівень фітобіологічного забруднення.

Раритетна фітокомпонента природної флори зони катастрофічного паводку налічує 53 види судинних рослин котрі є об'єктами міжнародної, державної та регіональної охорони. Вона складає 12,1 % від аборигенної фракції.

Созофіти міжнародного рівня. В межах зони катастрофічного паводку виявлено 199 видів судинних рослин, представлених в міжнародних офіційних природоохоронних документах, а також у рекомендаційних базах даних.

До **Переліку видів, що потребують спеціальних заходів охорони оселищ Резолюції № 6 Постійного комітету Бернської конвенції** (Resolution No. 6, 1998) та **Додатку II Директиви Ради 92/43/ЄЕС про збереження природних оселищ та дикої фауни і флори (Habitats Directive)** (Council Directive..., 1992) включена *Aldrovanda vesiculosa*, яка охороняється Червоною книгою України (табл. 2).

Созофіти, включені до додатків Конвенції **CITES** (Checklist of CITES..., 2025) в зоні затоплення представлені червонокнижними видами орхідей: *Anacamptis palustris*, *Dactylorhiza incarnata* та *Epipactis palustris* (табл. 2).

Серед видів **Світового червоного списку (IUCN Red List)** (The IUCN..., 2025), які потерпають від катастрофічного паводку категорію **EN (Global/Europe)** має лише *Agropyron dasyanthum* (табл. 1), який на

теренах України не має підстав для охорони. Категорія **EN (Global)** – властива лише для созофіта національного статусу охорони – *Aldrovanda vesiculosa* (табл. 2).

Категорію **NT (Global/Europe)** мають два види: *Elatine alsinastrum* (табл. 1) та регіональний созофіт – *Fraxinus excelsior* (табл. 3). Категорію **NT (Europe)** мають: *Salvinia natans* та *Trapa natans* (табл. 1).

У категорії **DD (Global/Europe)** представлені вісім видів (табл. 1), серед яких регіональний созофіт *Prunus tenella* var. *tenella* (табл. 3). Крім цих видів категорію **DD (Europe)** має *Sium sisarum* (табл. 1), а з видів національної – *Aldrovanda vesiculosa* (табл. 2) та регіональної охорони – *Potamogeton sarmaticus* (табл. 3).

Категорію **LC (Global/Europe)** мають 122 види: *Bidens cernua* L., *Butomus umbellatus* L., *Callitriche hermaphroditica* L., *Caltha palustris* L., *Carex acutiformis* Ehrh., *C. riparia* Curtis, *Cicuta virosa* L., *Cyperus fuscus* L., *Eleocharis uniglumis* (Link) Schult., *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmberg, *Gratiola officinalis* L., *Hottonia palustris* L., *Iris pseudacorus* L., *Lathyrus tuberosus* L., *Lythrum salicaria* L., *Mentha aquatica* L., *Oenanthe aquatica* (L.) Poir., *Persicaria amphibia* (L.) Delarbre, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Ranunculus flammula* L., *R. rionii* Lager, *R. sceleratus* L., *Rorippa amphibia* (L.) Besser, *Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla, *S. tabernaemontani* (C.C. Gmel.) Palla, *Stachys palustris* L. та ін., з яких *Epipactis palustris* та *Schoenoplectiella mucronata* – національного рівня охорони (табл. 2), а *Alnus glutinosa*, *Drosera rotundifolia*, *Vitis vinifera* var. *sylvestris* та *Utricularia vulgaris* – регіонального (табл. 3).

Крім вище зазначених видів, лише категорію **LC (Global)** мають ще 46 видів зони затоплення: *Bidens frondosa* L., *Calystegia sepium* (L.) R. Br., *Centaurium pulchellum* (Sw.) Druce, *Ceratophyllum demersum* L., *Eleocharis palustris* (L.) Roem. et Schult., *Epilobium parviflorum* Schreb., *E. hirsutum* L., *Glyceria arundinacea* Kunth, *Mentha longifolia* (L.) Huds., *Persicaria hydropiper* (L.) Delarbre, *Poa palustris* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Scutellaria galericulata* L. та ін. До цієї категорії потрапили види національної охорони: *Anacamptis palustris*, *Nymphoides peltata* та *Stipa lessingiana* (табл. 2) та види регіональної охорони: *Quercus robur*, *Ephedra distachya*, *Nymphaea alba* (табл. 3).

Категорію **LC (Europe)** в зоні катастрофічного паводка мають 9 видів: *Allium guttatum* Steven, *Equisetum pratense* L., *Lolium perenne* L., *Teucrium scordium* L., з яких *Allium saxatile* та *Dactylorhiza incarnata* – мають національний охоронний статус (табл. 2), а *Dryopteris carthusiana*, *Inula helenium* та *Scilla bifolia* – регіональний (табл. 3).

Зазначимо, що більшість видів Світового червоного списку з категорією LC

та DD є звичайними видами для Херсонської області і України, котрі не потребують природоохоронних заходів. Це переважно тривіальні види прибережно-водних місцезростань, основні лісоутворюючі породи, предки культурних рослин. Серед цих видів є чимало інвазійних для України, які спричиняють негативні процеси фітобіологічного забруднення.

Таблиця 1

Види міжнародних природоохоронних переліків зони катастрофічного затоплення*

№ п/п	Вид	Біо-морфа	Еко-цено-морфа	Созологічний статус		
				IUCN, 2025 Global/Europe	ERL, 2011/ERL, 2024	ERLT, 2019
1.	<i>Agropyron dasyanthum</i> Ledeb.	Pk	Ps	EN/EN	EN/-	-
2.	<i>Allium podolicum</i> Blocki ex Racib. et Szafer	Pk	StPt	DD/DD	DD/+	-
3.	<i>Ceratophyllum tanaeticum</i> Sapjegin	Pk	Aq	DD/DD	DD/+	-
4.	<i>Elatine alsinastrum</i> L.	Mk	Aq	NT/NT	NT/+	-
5.	<i>Malus sylvestris</i> (L.) Mill.	Ar	Si	DD/DD	DD/+	DD
6.	<i>Populus nigra</i> L.	Ar	Si	DD/DD	-/+	DD
7.	<i>Salvinia natans</i> (L.) All.	Pk	Aq	LC/NT	LC/+	-
8.	<i>Sium sisarum</i> L.	Pk	Ri	LC/DD	DD/+	-
9.	<i>Trapa natans</i> L.	Mk	Aq	LC/NT	NT/+	-
10.	<i>Trapa natans</i> var. <i>natans</i> (= <i>Trapa macrorhiza</i> Dobrocz.)	Mk	Aq	LC/-	DD/-	-
11.	<i>Ulmus laevis</i> Pall.	Ar	Si	DD/DD	-/+	DD
12.	<i>Ulmus minor</i> Mill.	Ar	Si	DD/DD	-/+	DD
13.	<i>Urtica kioviensis</i> Rogow.	Pk	Sn	DD/DD	DD/+	-

Примітка: *Окрім видів з категорією LC – найменшого ризику; та видів міжнародної охорони, що мають національний та регіональний охоронні статуси та наводяться відповідно у табл. 2 та 3.

Скорочення прийняті в таблиці:

IUCN, 2025 – Світовий червоний список МСОП.

ERL, 2011 – Європейський червоний список судинних рослин.

ERL, 2024 – База даних червоних списків судинних рослин Європи.

ERLT, 2019 – Європейський червоний список дерев.

Позначення типів біоморф, екоценоморф та категорій IUCN по тексту.

До **Європейського червоного списку** (Bilz et al., 2011) з території дослідження включено 99 видів категорії **LC**: *Agrostis stolonifera* L., *Alisma plantago-aquatica* L., *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla, *Carex acuta* L., *C. acutiformis* Ehrh., *C. riparia* Curtis, *Catabrosa aquatica* (L.) P.Beauv., *Equisetum arvense* L., *E. fluviatile* L., *Hippuris vulgaris* L., *Hydrocharis morsus-ranae* L., *Juncus articulatus* L., *J. effusus* L., *Leersia*

oryzoides (L.) Sw., *Lemna gibba* L., *L. minor*, *L. trisulca* L., *Lycopus europaeus* L., *Lysimachia nummularia* L., *L. vulgaris* L., *Myosotis scorpioides* L., *Myriophyllum spicatum* L., *M. verticillatum* L., *Nuphar lutea* (L.) Sm., *Potamogeton lucens* L., *P. natans* L., *P. nodosus* Poir., *P. perfoliatus* L., *Rumex hydrolapathum* Huds., *Sagittaria sagittifolia* L., *Sparganium emersum* Rehmman, *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid., *Stratiotes aloides* L., *Triglochin palustris* L., *Typha*

angustifolia L., *T. latifolia* L., *T. laxmannii* Lepech., *Vallisneria spiralis* L. та ін., з яких в Україні національний статус охорони мають *Dactylorhiza incarnata*, *Epipactis palustris*, *Nymphoides peltata*, *Schoenoplectiella mucronata* (табл. 2), а регіональний – *Nymphaea alba*, *Utricularia vulgaris*, *Vitis vinifera* var. *sylvestris* (табл. 3); 10 видів з категорію **DD** (табл. 1–3); *Trapa natans* та *Elatine alsinastrium* – категорії **NT** (табл. 1); *Agropyron dasyanthum* – категорії **EN** (табл. 1).

До бази даних червоних списків судинних рослин Європи (European vascular plants red lists..., 2024) (Liu et al., 2024; Lončarević et al., 2024) включено більшість видів Світового червоного списку із зони затоплення, окрім: *Agropyron dasyanthum*, *Agrostis maeotica*, *Cleistogenes squarrosa*, *Iris halophila*, *Potamogeton sarmaticus*, *Thymus borysthenticus* Klokov & Des.-Shost., *Tragopogon borysthenticus* Artemczuk, *Trapa macrorhiza*, *Ulmus pumila* L. та ін.

Із 38 видів дерев, що зростають в зоні затоплення, 25 включені до Європейського червоного списку дерев (Rivers et al., 2019). З них 19 видів мають **категорію LC**: *Acer campestre* L., *A. tataricum* L., *A. platanoides* L., *Alnus glutinosa*, *Betula pendula* Roth, *Corylus avellana* L., *Crataegus rhipidophylla* Gand., *Frangula alnus* Mill., *Populus alba* L., *P. tremula* L., *Prunus spinosa* L., *Pyrus communis* L., *Quercus robur*, *Salix pentandra* L., *S. acutifolia* Willd., *S. alba* L., *S. triandra* L., *S. cinerea* L., *Tilia cordata* Mill.; 4 види мають категорію **DD** (табл. 1) та один *Fraxinus excelsior* з категорією **NT** (табл. 3).

В Європейському червоному списку відсутні інвазійні види дерев зони затоплення: *Acer negundo* L., *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Elaeagnus angustifolia* L., *Fraxinus pennsylvanica* L., *Gleditsia triacanthos* L., *Morus alba* L., *M. nigra* L., *Platanus occidentalis* L., *Prunus armeniaca* L., *Rhus typhina* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Ulmus pumila* L. Усі вони мають категорію **LC** в IUCN Red List.

Такими чином, серед видів регіону дослідження, що зазнали впливу катастрофічного паводку, до созофітів міжнародного рівня віднесено лише 25 аборигенних видів, із них 4 види включені до офіційних міжнародних природоохоронних документів, зокрема до Переліку видів, затвердженого Резолюцією № 6 Постійного комітету Бернської конвенції та Додатку II Директиви Ради 92/43/ЄЕС (*Aldrovanda vesiculosa*) та CITES (*Anacamptis palustris*, *Dactylorhiza incarnata*, *Epipactis palustris*). Ще 4 види категорій **EN**, **NT** (*Agropyron*

dasyanthum, *Elatine alsinastrium*, *Salvinia natans*, *Trapa natans*), які не увійшли до зазначених офіційних природоохоронних переліків. Проте, відповідно до міжнародної оцінки ризику зникнення за критеріями МСОП, ці види належать до видів, пріоритетних для охорони. Решта 17 видів категорій **NT**, **LC** та **DD**, які в Україні перебувають під охороною на національному (*Allium savranicum*, *Schoenoplectiella mucronata*, *Nymphoides peltata*, *Stipa lessingiana*) чи регіональному (*Alnus glutinosa*, *Drosera rotundifolia*, *Dryopteris carthusiana*, *Ephedra distachya*, *Fraxinus excelsior*, *Inula helenium*, *Nymphaea alba*, *Prunus tenella*, *Potamogeton sarmaticus*, *Quercus robur*, *Scilla bifolia*, *Utricularia vulgaris*, *Vitis vinifera* var. *sylvestris*) рівнях.

Решта 174 видів з категоріями **LC** та **DD** зони екоциду, які зазначені в проаналізованих природоохоронних рекомендаційних базах даних світового та європейського рівнів і не мають підтвердженого офіційного міжнародного, національного чи регіонального созологічного статусу, не розглядаються в цій публікації раритетними видами.

Серед біоморф видів міжнародних природоохоронних переліків зони затоплення превалюють полікарпіки – 61 %, монокарпиків – 16 %, лігнозних біоморф – 23 %; серед екоценоморф чисельно переважають ріпаріоакванти – 32 %; пратантів – 26 %, аквантів – 14 %, сільвантів – 11 %.

Созофіти національного рівня. В зоні затоплення та на прилеглих до неї територіях виявлено 23 види судинних рослин, що мають національний статус охорони (List of plant..., 2021) (табл. 1).

Категорію **вразливі** мають 13 видів зони затоплення; **неоцінені** – 6 видів, **рідкісні (РК)** – 4 види (табл. 1).

Усі види національної охорони внесені також до бази даних «Червоних списків європейських судинних рослин» (European vascular plants red lists..., 2024) (Liu et al., 2024; Lončarević et al., 2024) з адаптованими для України категоріям IUCN (табл. 1).

Серед біоморф досліджених видів абсолютно переважають полікарпіки – 91,3 %; серед екоценоморф представлені: псамофанти – 5 видів (21,7 %); степанти – 4 види (17,4 %); степопетрофанти та пратопалюданти – по 3 види (13,04 %); акванти, марганти – по 2 види (8,7 %); пратанти, сільванти, сільвопетрофанти та ріпаріоакванти – по 1 виду (4,35 %) (табл. 1).

Таблиця 2

Созофіти національного рівня зони катастрофічного затоплення

№ п/п	Вид	Біо- морф а	Еко- цено- морфа	Созологічний статус		
				List of plant..., 2021	IUCN, 2025 Global/ Europe	ERL, 2011/ERL, 2024
1.	<i>*Aldrovanda vesiculosa</i> L.	Pk	Aq	PK	EN/DD	DD/NT
2.	<i>Allium saxatile</i> M.Bieb. (= <i>Allium savranicum</i> Besser)	Pk	Ps	BP	-/LC	-/VU
3.	<i>**Anacamptis palustris</i> (Jacq.) R.M.Bateman, Pridgeon & M.W.Chase	Pk	PrPa	BP	LC/-	-/VU
4.	<i>Astragalus borysthenticus</i> Klokov (<i>Astragalus onobrychis</i> L. s.l.)	Pk	Ps	PK	-	-/NT
5.	<i>Betula pubescens</i> var. <i>pubescens</i> (= <i>Betula borysthénica</i> Klokov)	Ar	Si	PK	-	-/NT
6.	<i>Centaurea breviceps</i> Iljin	Mk	Ps	BP	-	-/VU
7.	<i>Crocus reticulatus</i> Steven ex Adams	Pk	St	HO	-	-/NE
8.	<i>Cymbaria borysthénica</i> Pall. ex Schltdl.	Pk	StPt	PK	-	-/NT
9.	<i>**Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó	Pk	PrPa	BP	-/LC	LC/VU
10.	<i>**Epipactis palustris</i> (L.) Crantz	Pk	PrPa	BP	LC/LC	LC/VU
11.	<i>Fritillaria ruthénica</i> Wikstr.	Pk	Mg	BP	-	-/VU
12.	<i>Goniolimon graminifolium</i> (Aiton) Boiss.	Pk	Ps	BP	-	-/VU
13.	<i>Gymnospermium odessanum</i> (DC.) Takht.	Pk	SiPt	BP	-	-/VU
14.	<i>Nymphoides peltata</i> (S.G. Gmel.) O. Kuntze	Pk	Aq	BP	LC/-	LC/VU
15.	<i>Ornithogalum boucheanum</i> (Kunth) Asch.	Pk	Mg	HO	-	-/NE
16.	<i>Pulsatilla pratensis</i> (L.) Mill.	Pk	Pr	HO	-	-/NE
17.	<i>Schoenoplectiella mucronata</i> (L.) J.Jung & H.K.Choi	Pk	Ri	BP	LC/LC	LC/VU
18.	<i>Stipa borysthénica</i> Klokov ex Prokudin	Pk	Ps	BP	-	-/VU
19.	<i>Stipa capillata</i> L.	Pk	St	HO	-	-/NE
20.	<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.	Pk	St	HO	LC/-	-/NE
21.	<i>Stipa ucráinica</i> P.A.Smirn.	Pk	St	HO	-	-/NE
22.	<i>Tulipa sylvestris</i> subsp. <i>australis</i> (Link) Pamp. (= <i>Tulipa hypanica</i> Klokov & Zoz)	Pk	StPt	BP	-	-/VU
23.	<i>Tulipa suaveolens</i> Roth (= <i>Tulipa schrenkii</i> Regel)	Pk	StPt	BP	-	-/VU

Примітка:

* Вид внесений до Переліку видів, що потребують спеціальних заходів охорони оселищ Резолюції № 6 та Додатку II Директиви Ради 92/43/ЄЕС про збереження природних оселищ та дикої фауни і флори.

** Види CITES species checklist:

Скорочення прийняті в таблиці:

List of plant..., 2021 – Перелік видів рослин та грибів, що заносяться до Червоної книги України.

Созофіти регіонального рівня. Для виділення регіональних созофітів у зоні екоциду використано Перелік видів рослин, що підлягають особливій охороні на території Херсонської області, затверджений рішенням XXVI сесії Херсонської обласної ради VI скликання № 893

від 13.11.2013 (Red List of Kherson Region..., 2013).

У межах зони катастрофічного затоплення встановлено місцезростання 26 видів судинних рослин регіонального рівня охорони (табл. 3).

Таблиця 3

Созофіти регіонального рівня зони катастрофічного затоплення

№ п/п	Вид	Біо-морфа	Еко-цено-морфа	Созологічний статус		
				IUCN, 2025 Global/Europe	ERL, 2011/ERL, 2024	ERLT, 2019
1.	<i>Agrostis gigantea</i> subsp. <i>maeotica</i> (Klokov) Tzvelev (= <i>Agrostis maeotica</i> Klokov)	Pk	Pr	-	-/-	-
2.	<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.	Ar	Si	LC/LC	-/+	LC
3.	<i>Astragalus contortuplicatus</i> L.	Pk	Ha	-	-/+	-
4.	<i>Bellevia speciosa</i> Woronow ex Grossh.	Pk	St	-	-/+	-
5.	<i>Cleistogenes squarrosa</i> (Trin.) Keng	Pk	Ps	-	-/-	-
6.	<i>Dianthus capitatus</i> subsp. <i>andrzejowskianus</i> Zapał. (= <i>Dianthus andrzejowskianus</i> (Zapał.) Kulcz.)	Pk	St	-	-/-	-
7.	<i>Drosera rotundifolia</i> L.	Pk	Pa	LC/LC	-/+	-
8.	<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P.Fuchs	Pk	Si	-/LC	-/+	-
9.	<i>Ephedra distachya</i> L.	Frt	Pt	LC/-	-/+	-
10.	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Ar	Si	NT/NT	-/+	NT
11.	<i>Hyacinthella leucophaea</i> (K.Koch) Schur	Pk	St	-	-/+	-
12.	<i>Inula helenium</i> L.	Pk	Pr	-/LC	-/+	-
13.	<i>Iris halophila</i> Pall.	Pk	PrSt	-	-/-	-
14.	<i>Jurinea salicifolia</i> Gruner	Pk	StPt	-	-/-	-
15.	<i>Limonium coriarium</i> H.Arnaud (= <i>Limonium platyphyllum</i> Lincz.)	Pk	PsHa	-	-/-	-
16.	<i>Molinia caerulea</i> subsp. <i>caerulea</i> (= <i>Molinia euxina</i> Pobed.)	Pk	PsHa	-	-/+	-
17.	<i>Muscari neglectum</i> Guss. ex Ten. & Sangiov.	Pk	St	-	-/-	-
18.	<i>Nymphaea alba</i> L.	Pk	Aq	LC/-	LC/+	-
19.	<i>Potamogeton sarmaticus</i> Mäemets	Pk	Aq	-/DD	DD/-	-
20.	<i>Prunus tenella</i> var. <i>tenella</i> (= <i>Amygdalus nana</i> L.)	Frt	St	DD/DD	DD/+	-
21.	<i>Quercus robur</i> L.	Ar	Si	LC/-	-/+	LC
22.	<i>Scilla bifolia</i> L.	Pk	Si	-/LC	-/-	-
23.	<i>Utricularia vulgaris</i> L.	Pk	Aq	LC/LC	LC/+	-
24.	<i>Valeriana stolonifera</i> Czern.	Pk	Mg	-	-/+	-
25.	<i>Vinca herbacea</i> Waldst. & Kit.	Pk	St	-	-/-	-
26.	<i>Vitis vinifera</i> var. <i>sylvestris</i> Willd. (= <i>Vitis sylvestris</i> C.C.Gmel.)	Fr	Si	LC/LC	LC/+	-

Серед біоморф досліджених раритетних видів регіональної охорони 71,4 % складають полікарпіки, лігнозні біоморфи – 20,1 %, монокарпіки – 8,5 %; спектр екоценоморф складають: акванти, сільванти, псамофанти та степанти – по 6 видів (17,1 %), пратанти, псамогалофанти та

пратостепанти – по 2 види (5,7 %), галофанти, палюданти, марганти, петрофанти та степопетрофанти – по 1 виду (2,8 %) (табл. 2). Картосхеми поширення окремих созофітів національного та регіонального рівнів в зоні екоциду представлені на рис. 3.

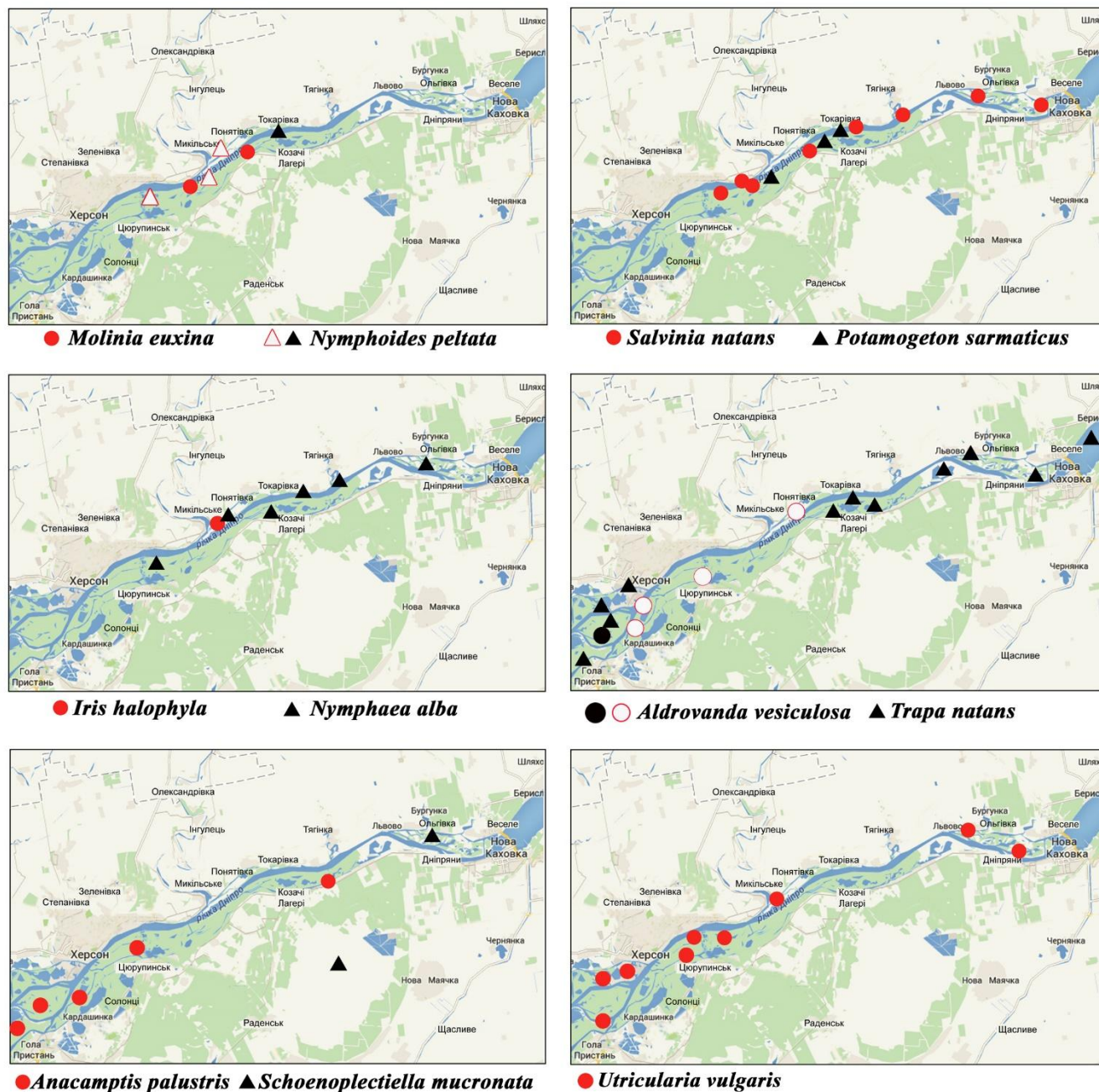


Рис. 3. Картосхеми поширення деяких раритетних видів рослин в зоні катастрофічного паводку спричиненого підривом Каховської ГЕС (прозорі позначки місцезнаходжень наводяться за гербарними та літературними даними)

Скринінг літературних та електронних джерел показав недостатність конкретної інформації стосовно видового складу та кількісних співвідношень раритетної

компоненти судинних рослин зони катастрофічного паводка. Здебільшого наводяться лише узагальнені об'єднані цифрові дані про можливі збитки стосовно

раритетних видів рослин та тварин, та застарілі дані списку раритетних видів державної охорони НПП «Ниžньодніпровський» (Preliminary..., 2023). Нами вперше публікуються розширені і найбільш повні кадастри видів судинних рослин міжнародної, національної та регіональної охорони; надалі будуть проаналізовані та оприлюднені таксономічні втрати флоро-різноманіття зони впливу паводку, наслідки процесів елімінації та деструкції популяцій созофітів.

Такими чином, проведена інвентаризація дала змогу встановити сучасний склад раритетної компоненти флори зони катастрофічного затоплення Нижнього Придніпров'я, представленої видами міжнародного, національного та регіонального рівнів охорони. Біоморфологічна структура дослідженої раритетної компоненти характеризується домінуванням полікарпічних трав'янистих рослин. В екоценоморфному спектрі превалюють псамофанти, акванти, степанти, ріпаріоакванти та пратанти. Такий екоценоморфний розподіл созофітів відображає їхню приуроченість до псамофітних, водних, прибережно-водних, водно-болотних, степових та лучних природних флористичних комплексів Нижнього Придніпров'я, які зазнали найбільшої трансформації внаслідок катастрофічного паводку.

Висновки

Регіон Нижнього Придніпров'я, флора судинних рослин якого містить значну раритетну компоненту міжнародної, національної та регіональної охорони є особливо цінними з наукової, екологічної та фітосозологічної точок зору, з одного боку це свідчить про унікальність флорогенезису, таксономічне та флорокомплексне багатство, різноманіття ландшафтів та екотонів, наявність різновікових ендемічних, субендемічних та реліктових елементів, а з іншого – про вразливість його популяцій, флористичних комплексів та фітосистем, що розвиваються в умовах зростаючої антропопресії, серед найбільш загрозливих чинників якої наразі є мілітарні, що призводять до

екологічних катастроф, які розцінюються як екоциди.

1. Встановлено, що флора регіону Нижнього Придніпров'я, яка репрезентує єдину вцілілу еталонну ділянку природного русла та дельти Дніпра з збереженим фітобіотичним різноманіттям налічує лише в зоні екоциду 549 видів судинних рослин, з яких 439 – відносяться до аборигенної фракції, а 110 – до адвентивної.

2. З'ясовано, що раритетна компонента міжнародного, національного та регіонального рівнів зони екоциду, викликаної катастрофічним паводком, налічує 53 види судинних рослин, що становить 12,1 % від видового складу аборигенної флори.

3. В межах зони катастрофічного паводку виявлено 199 видів судинних рослин, представлених в офіційних та рекомендаційних міжнародних природоохоронних документах та базах даних, з яких лише 25 аборигенних видів мають офіційний правовий міжнародний статус, що підтверджується національним та регіональним рівнем охорони. Решта 174 видів з категоріями LC та DD у флорі України не є пріоритетними для охорони.

4. З'ясовано, що серед созофітів міжнародного рівня 4 види включені до офіційних міжнародних природоохоронних документів, зокрема до Переліку видів, затвердженого Резолюцією № 6 Постійного комітету Бернської конвенції та Додатку II Директиви Ради 92/43/ЄЕС (*Aldrovanda vesiculosa*) та CITES (*Anacamptis palustris*, *Dactylorhiza incarnata*, *Epipactis palustris*).

5. Виявлено, що созофіти національного рівня охорони в зоні затоплення представлені 23 видами, 13 з яких мають категорію вразливі, 6 - неоцінені, 4 – рідкісні, а регіонального рівня охорони нараховують 26 видів рослин.

6. Встановлено, що раритетна компонента представлена переважно полікарпічними трав'янистими рослинами, приуроченими до водних, прибережно-водних, лучних, степових і псамофітних комплексів, що найбільше постраждали внаслідок катастрофічного паводку.

Фінансування / Funding

Дослідження співробітників Національного науково-природничого музею НАН України виконувалися в межах госпдоговірних тематик установ замовника ПРАТ «Укргідроенерго» (Київ) та генерального проєктувальника ПРАТ «Укргідропроєкт» (Харків) (2014–2021 рр.); відповідно робочих планів бюджетної наукової тематики НАН України № III-12-18 «Видове, популяційне, флорокомплексне різноманіття та зоологічні аспекти регіональних природних і урбаногенних флор України» та конкурсної тематики № II-27-25 «Розроблення критеріїв оцінки біотичного різноманіття та цінності природних об'єктів на окремих заповідних і порушених воєнними діями територіях України для визначення функціональної стійкості екосистем та рівня антропогенної трансформації біоти (2025-2026 рр.) / The research, conducted by staff members of the National Museum of Natural History of the National Academy of Sciences of Ukraine, was carried out as part of contract projects commissioned by PJSC “Ukrhydroenergo” (Kyiv) and the general design organization PJSC “Ukrhydroproject” (Kharkiv) (2014–2021); in accordance with the work plans of the NAS of Ukraine’s budget-funded research project No. III-12-18, “Species, Population, and Flora-Complex Diversity and Zoosociological Aspects of the Regional Natural and Urbanized Flora of Ukraine,” and the competitive scientific research project No. II-27-25 “Development of criteria for assessing biotic diversity and the value of natural sites in selected protected and war-affected territories of Ukraine to determine the functional stability of ecosystems and the level of anthropogenic transformation of biota (2025–2026)”.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Дані, що підтверджують результати цього дослідження, доступні у відповідних авторів. Усі флористичні та флорозологічні дані, гербарні та фотоматеріали були отримані та проаналізовані в рамках поточних досліджень і зберігаються у співавторів та гербарних фондах Національного науково-природничого музею НАН України. Фото, які є частиною документальних матеріалів (аерофотозйомка або кадри з дрона), що фіксували наслідки екоциду взяті з відкритих джерел сайтів, що знаходяться у публічному доступі замовників дослідження ПРАТ «Укргідропроєкт» та ПРАТ «Укргідроенерго» з метою використання виконавцями як ілюстрації у заключних звітах та наукових публікаціях / Data supporting the results of this study are available from the corresponding authors. All floristic and phlorosozological data, herbarium specimens, and photographic materials were obtained and analyzed as part of ongoing research and are stored by the co-authors and in the herbarium collections of the National Museum of Natural History of the National Academy of Sciences of Ukraine. The photographs, which are part of the documentary materials (aerial photographs or drone footage), which documented the consequences of the ecocide, were taken from publicly available sources on websites operated by the study’s clients, PJSC “Ukrhydroproekt” and PJSC “Ukrhydroenergo,” for use by the researchers as illustrations in final reports and scientific publications.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується. У дослідженні не брали участі люди чи тварини, які потребують інформованої згоди / Not applicable. The study did not involve human participants or animals requiring informed consent.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори повідомляють про відсутність будь-якого конфлікту інтересів, які могли би вплинути на зміст цієї статті / The authors declare that there are no conflicts of interest that could have influenced the content of this article.

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 цієї статті автори не використовували інструменти ШІ / The authors did not use AI tools when preparing this article.

References

Boiko, M. F. (2005). Rare phytodiversity of the Kherson Region (Ukraine) and its conservation. *Chornomorskyi Botanical Journal*, 1(1), 53–59. (in Ukrainian)

Бойко М. Ф. Раритетне фіторізноманіття Херсонщини (Україна) та його охорона. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2005. Т. 1(1). С. 53–59.

Boiko, M. F., & Boiko, P. M. (2004). Key botanical areas of southern Ukraine. In M. F. Boiko (Ed.), *J. K. Pachoskyi and Modern Botany* (pp. 12–19). Ailant. (in Ukrainian)

Бойко М. Ф., Бойко П. М. Ключові ботанічні території півдня України. Пачоський Й. К. та сучасна ботаніка. під ред. М. Ф. Бойко. Херсон : Айлант, 2004. С. 12–19.

Boiko, M. F., Moysiienko, I. I., & Khodosovtsev, O. Ye. (2013). Red List of the Kherson Region. Kherson. 35. (in Ukrainian)

Бойко М. Ф., Мойсієнко І. І., Ходосовцев О. Є. Червоний список Херсонської області. Херсон: 2013. 35 с.

Boiko, P. M. (2003). Sozological characteristics of the proposed protected areas of the Left Bank of the Lower Dnipro. In *The role of protected areas in biodiversity conservation: Proceedings of the International Scientific Conference* (pp. 37–38). Kaniv. (in Ukrainian)

Бойко П. М. Созологічна характеристика запропонованих природно-заповідних об'єктів Лівобережжя Нижнього Дніпра. Роль природно-заповідних територій у підтриманні біорізноманіття: матеріали Міжнародної наукової конференції. Канів: 2003. С. 37–38.

Boiko, P. M. (2010). The Lower Dnipro ecological corridor of the National Ecological Network of Ukraine. Ailant. (in Ukrainian)

Бойко П. М. Нижньодніпровський екокоридор Національної екомережі України. Херсон: Айлант, 2010. 204 с.

Boiko, M. F., & Podhainyi, M. M. (2002). Red List of the Kherson Region. Ailant. (in Ukrainian)

Бойко М. Ф., Подгайний М. М. Червоний список Херсонської області. Херсон : Айлант, 2002. 32 с.

Bilz M., Kell S.P., Maxted N., Lansdown R.V. 2011. European Red List of Vascular Plants. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 130 pp.. https://www.researchgate.net/publication/287490004_Bilz_M_Kell_SP_Maxted_N_and_Lansdown_RV_2011_European_Red_List_of_Vascular_Plants_Publications_Office_of_the_European_Union_Luxembourg

Checklist of CITES Species. (2025). <https://cites.org/eng/app/appendices.php>

Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora (Habitats Directive). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1761606018493&uri=CELEX%3A31992L0043>

Criminal Code of Ukraine (Law No. 2341-III of April 5, 2001). (2001). (in Ukrainian) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14#Text>

Кримінальний кодекс України : Закон України від 5 квітня 2001 р. № 2341-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14#Text> .

Dzerkal, V. M., Ponomariova, A. A., Naumovych, G. O., & Bondar, Y. G. (2018). Rare component of the flora of the National Nature Park "Nizhnyodniprovsky". Flora in the Red Book of Ukraine: implementation of the Global Strategy for Plant Conservation: materials of the V International Conference, June 25–28, 2018, Kherson, Ukraine. Kherson: Book Publishing House FOP Vyshemyrsky V. S. P. 41–43. (in Ukrainian)

Дзеркаль В. М., Пономарьова А. А., Наумович Г. О., Бондар Ю. Г. Раритетний компонент флори Національного природного парку «Нижньодніпровський». Рослинний світ у Червоній книзі України: впровадження Глобальної стратегії збереження рослин: матеріали V Міжнародної конференції, 25–28 червня 2018 р., Херсон: Україна. Херсон: Книжкове вид-во ФОП Вишемирський В. С., 2018. С. 41–43.

Dubyna, D. V., Dzyuba, T. P., & Tymoshenko, P. A. (2006). Vegetation of the Kakhovka Arena and its changes over 75 years. *Chornomorskyi Botanical Journal*, 2(2), 45–59. (in Ukrainian)

Дубина Д. В., Дзюба Т. П., Тимошенко П. А. Рослинність Каховської арени та її зміни за 75 років. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2006. Т. 2(2). С. 45–59.

European vascular plants red lists (2024). https://training-ipt-bgbif.org/resource?r=vasc_plant_red_list_test&request_locale=ru

Fedoronchuk, M. M. (2022). Analysis of the range dynamics of rare vascular plant species in the flora of Ukraine. 1. *Cymbaria borysthenica* (Orobanchaceae). *Ukrainian Botanical Journal*, 79(6), 404–412. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj79.06.404> (in Ukrainian)

Федорончук М. М. Аналіз динаміки ареалу раритетних видів судинних рослин флори України. 1. *Cymbaria borysthenica* (Orobanchaceae). *Український ботанічний журнал*. 2022. Т. 79(6). С. 404–412. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj79.06.404>

Kosets, M. I. (1936). Vegetation of the Kozachi Laheri Arena of the Lower Dnipro Region. *Journal of the Institute of Botany of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, 17(9), 127–191. (in Ukrainian)

Косець М. І. Рослинність Козачо-Лагерської арени Нижньодніпров'я. *Журнал Інституту ботаніки АН УРСР*. 1936. Т. 17(9). С. 127–191.

Krytska, L. I. (1988). Endemism of the flora of the steppes and limestone outcrops of the Right-Bank Grass Steppe. *Ukrainian Botanical Journal*, 45(4), 15–19. (in Ukrainian)

Крицька Л. І. Ендемізм флори степів та вапнякових відслонень Правобережного Злакового Степу. *Український ботанічний журнал*. 1988. Т. 45(4). С. 15–19.

Krytskaya, L. I., & Novosad, V. V. (2001). Floristic conservation features of the steppe floras of the Western Black Sea Region in relation to optimization of its protected areas. *Proceedings of the National Museum of Natural History*, 1, 147–188. (in Russian)

Крицкая Л. И., Новосад В. В. Флоросоциологические особенности степных флор региона Западного Причерноморья в связи с вопросами оптимизации его природно-заповедного фонда. *Вісник Національного природничого музею*. 2001. Вип. 1. С. 147–188.

List of plant and fungal species included in the Red Book of Ukraine (flora): Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine No. 111 of February 15, 2021. (2021). (in Ukrainian) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0370-21#Text>

Перелік видів рослин та грибів, що заносяться до Червоної книги України (рослинний світ) : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 15.02.2021 № 111. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 23.03.2021 за № 370/35992. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0370-21#Text>

Liu, U., Lončarević, N. & Glasnović, P. (2024). Database of European vascular plants red lists. Springer Nature. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.26982994>

Loncarevic, N., Liu, U., & Glasnović, P. (2024). Database of European vascular plants red lists as a contribution to more coherent plant conservation. *Scientific Data*, 11, Article 1138. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03963-0>

Marynych, O. M., Parkhomenko, H. O., Pashchenko, V. M., Petrenko, O. M., & Shyshchenko, P. H. (2007). Physical and geographical regionalization. Map 1 : 2 500 000. In *National Atlas of Ukraine*. Kyiv: DNPV Kartohrafiia. 228–229. <http://irbis-nbuv.gov.ua/ulib/item/ukr0000016739> (in Ukrainian)

Маринич О.М., Пархоменко Г.О., Пащенко В.М., Петренко О.М., Шищенко П.Г. Фізико-географічне районування: карта - 1 : 2500 000. *Національний Атлас України*. К. : ДНВП «Картографія», 2007 С. 228–229.

Mosyakin, S. L., & Fedoronchuk, M. M. (1999). Vascular plants of Ukraine. A nomenclatural checklist.

Moysiienko, I. I., Khodosovtsev, O. Ye., Pylypenko, I. O., Boiko, M. F., Malchykova, D. S., Klymenko, V. M., Ponomarova, A. A., Darmostuk, V. V., & Zakharova, M. Ya. (2020). Prospective protected areas of the Kherson Region. Kherson: Helvetica. <https://doi.org/10.32782/978-966-992-049-2/1-166> (in Ukrainian).

Мойсієнко І. І., Ходосовцев О. Є., Пилипенко І. О., Бойко М. Ф., Мальчикова Д. С., Клименко В. М., Пономарьова А. А., Дармостук В. В., Захарова М. Я. Перспективні заповідні об'єкти Херсонської області. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 166 с. DOI: <https://doi.org/10.32782/978-966-992-049-2/1-166>

Moysiienko, I. I., Danylyk, I. M., Melnyk, R. P., Sadova, O. F., & Zakharova, M. Ya. (2019). *Schoenoplectiella mucronata* (Cyperaceae) in the flora of Ukraine. *Ukrainian Botanical Journal*, 76(1), 52–59. (in Ukrainian)

Мойсієнко І. І., Данилик І. М., Мельник Р. П., Садова О. Ф., Захарова М. Я. *Schoenoplectiella mucronata* (Cyperaceae) у флорі України. *Український ботанічний журнал*. 2019. Т. 76(1). С. 52–59.

Novosad, V., Scherbakova, O., Novosad, K. 2019. Risks of depletion of phytodiversity of hydropower installation influence zones, introduction of their integrated eco-monitoring and development of effective measures to minimize the negative impact on the surrounding phytosystems. *13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. (website) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903253>

Novosad, V.V., & Krytska, L.I. (2010). Phyto- and flora diversity of the Middle Transdnistria region. Vascular plants 1 Kyiv, *Phyton*, 148. (in Ukrainian).

Новосад В.В., Крицька Л. Фіто- та флорорізноманіття Середнього Придністров'я. Судинні рослини. 1. Київ, Фітон, 2010. 148 с.

Novosad V.V., Krytska L.I., & Lyubinska L.G. (2009). Phytobiota of National Nature Park «Podilski Tovtry» Vascular plants. *Phyton*. (in Ukrainian)

Новосад В.В., Крицька Л.І., Любінська Л.Г. Фітобіота національного природного парку «Подільські Товтри». Судинні рослини. Київ. Фітон. 2009. 292 с.

Novosad V.V., Krytska L.I., & Scherbakova O.F. (2013). Phyto- and flora diversity of Kodymo-Elanetsky Bug region. Annotated Conspectus of Spontaneous Flora. Vascular plants. *Phyton*. (in Ukrainian)

Новосад В.В., Крицька Л.І., Щербаківа О.Ф. Фіто- та флорорізноманіття Кодимо-Єланецького Побужжя. Анатований конспект спонтанної флори. Судинні рослини. Київ. Фітон. 2013. 255 с.

Plants of the World Online (POWO). (2026). Royal Botanic Gardens, Kew. Accessed 23 June, 2026. <https://powo.science.kew.org/>

Preliminary environmental and legal analysis of the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant and its consequences: Analytical report. (2023). Coalition Ukraine. Fifth Morning; NGO Foundation for the Support of Fundamental Research; Resource and Analytical Center Society and Environment. Kyiv. 180. (in Ukrainian)

Попередній екологічний та юридичний аналіз руйнування Каховської ГЕС і його наслідків : аналітичний звіт. Коаліція «Україна. П'ята ранку»; ГО «Фонд підтримки фундаментальних досліджень»; Ресурсно-аналітичний центр «Суспільство і довкілля». Київ, 2023. 180 с. URL: <https://rac.org.ua/wp-content/uploads/2024/06/racse-kahovka-environmental-and-legal-consequences-2024.pdf>

Rare plant species of the Nyzhnodniproviskyi National Nature Park. (n.d.). (in Ukrainian) <http://nppn.org.ua/ridkisni-vidi>

Рідкісні види флори НПП «Нижньодніпровський». (2026). URL: <http://nppn.org.ua/ridkisni-vidi>

Red List of the Kherson Region. (2013). Appendix 1 to Resolution No. 893 of the XXVI Session of the Kherson Regional Council of the VI Convocation, November 13, 2013. (in Ukrainian)

Червоний список Херсонської області : додаток до рішення XXVI сесії Херсонської обласної ради VI скликання від 13.11.2013 № 893. URL: <https://old.khor.gov.ua/893-pro-zatverdzhennya-chervonogo-spisku-hersonskoyi-oblasti-ta-polozhennya-pro-nogo/>

Revised Annex I of Resolution 6 (1998) of the Bern Convention listing the species requiring specific habitat conservation measures (year of revision 2011), available at: <https://eunis.eea.europa.eu/references/2443/species> (accessed 24 July 2026).

Rivers, M.C., Beech, E., Bazos, I., Bogunić, F., Buira, A., Caković, D., Carapeto, A., Carta, A., Cornier, B., Fenu, G., Fernandes, F., Fraga, P., Garcia Murillo, P.J., Lepší, M., Matevski, V., Medina, F.M., Menezes de Sequeira, M., Meyer, N., Mikoláš, V., Montagnani, C., Monteiro-Henriques, T., Naranjo Suárez, J., Orsenigo, S., Petrova, A., Reyes-Betancort, J.A., Rich, T., Salvesen, P.H., Santana López, I., Scholz, S., Sennikov, A., Shuka, L., Silva, L.F., Thomas, P., Troia, A., Villar, J.L., & Allen, D.J. (2019). European Red List of Trees. *Cambridge, UK and Brussels, Belgium: IUCN*. viii. 60 p. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.ERL.1.en>

Shelyag-Sosonko, Yu. R. (Ed.), et al. (1999). Biodiversity of the Danube Biosphere Reserve: Conservation and management. Naukova Dumka; InterEcoCenter. (in Ukrainian)

Шеляг-Сосонко Ю. Р. (ред.) та ін. Біорізноманітність Дунайського біосферного заповідника: збереження та управління. Київ : Наукова думка ; InterEcoCenter, 1999. 704 с.

Skrypko, G. S. (1969). A new locality of *Cymbodasma borysthenica* (Pall.) Klok. et Zoz. in Ukraine. *Scientific Reports of Higher Education. Biological Sciences Series*, 2, 68–69. (in Russian)

Скрипко Г. С. О новом местонахождении на Украине *Cymbodasma borysthenica* (Pall.) Klok. et Zoz. Научные доклады высшей школы. Серия «Биологические науки». 1969. 2. С. 68–69.

The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2025-2. <https://www.iucnredlist.org>.

Umanets, O. Yu., & Moysiyenko, I. I. (2012). Discovery of the southernmost locality of *Drosera rotundifolia* in Ukraine. *Chornomorskyi Botanical Journal*, 8(3), 342–346. (in Ukrainian)

Уманець О. Ю., Мойсієнко І. І. Найпівденніша знахідка *Drosera rotundifolia* в Україні. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2012. Т. 8(3). С. 342–346.

Ukrainian Hydrometeorological Center [News]. Anniversary of the explosion of the Kakhovka hydroelectric power station by the occupiers [Internet]. Ukrainian Hydrometeorological Center; 2024 Jun 6; [cited 2024 Jun 21]. Available: <https://www.meteo.gov.ua/ua/news/Richnicya-pidrivu-okupantami-Kakhovskoi-HES>

Zakharova, M. Ya., & Moysiyenko, I. I. (2017). Species protected under the Habitats Directive in the Lower Dnipro Sands. In *NATURA 2000 as an innovative system for the protection of rare species and habitats in Ukraine: Proceedings of the scientific and practical seminar (Series: Conservation Biology in Ukraine, Issue 1, pp. 47–51)*. Kyiv. (in Ukrainian)

Захарова М. Я., Мойсієнко І. І. Сорофіти оселищної директиви на Нижньодніпровських пісках. *NATURA 2000 як інноваційна система охорони рідкісних видів та оселищ в Україні : матеріали науково-практичного семінару*. Серія «Conservation Biology in Ukraine». Київ, 2017. Вип. 1. С. 47–51.

Zakharova, M. Ya., & Moysiyenko, I. I. (2016). Florocoenotic distribution of rare species in natural forests of the Lower Dnipro Sands. *Chornomorskyi Botanical Journal*, 12(2), 206–213. <https://doi.org/10.14255/2308-9628/16.122/9> (in Ukrainian)

Захарова М. Я., Мойсієнко І. І. Флороценотична приуроченість рідкісних видів природних лісів Нижньодніпровських пісків. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2016. Т. 12(2). С. 206–213. DOI: 10.14255/2308-9628/16.122/9.

Zhukinskyi, V. M., & Klovov, V. M. (1987). On the establishment of the Lower Dnipro Biosphere Reserve. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, 84–92. (in Ukrainian)

Жукінський В. М., Клоков В. М. Про організацію Нижньодніпровського біосферного заповідника. *Вісник АН УРСР*. 1987. С. 84–92.

Received: 30.06.2026. Accepted: 17.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Новосад В., Щербакіова О., Новосад К. Раритетні види судинних рослин міжнародної, національної та регіональної охорони флори Нижнього Придніпров'я в зоні катастрофічного паводку, спричиненого підливом Каховської ГЕС. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 65-82. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.5>

Cite this article in APA style as:

Novosad, V., Shcherbakova, O., & Novosad, K. (2026). Rarytetni vydy sudynnykh roslyn mizhnarodnoi, natsionalnoi ta rehionalnoi okhorony flory Nyzhnogo Prydniprovia v zoni katastrofichnoho pavodku, sprychynenoho pidryvom Kakhovskoi HES [Rare vascular plant species of international, national and regional conservation significance in the flora of the Lower Dnipro region within the zone of catastrophic flooding caused by the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Station]. *Biota. Human. Technology*, (2), 65-82. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.5> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Novosad V. [*in Ukrainian: Новосад В.*] ¹, Candidate of Biological Sciences (Ph. D.), Senior Researcher Associate, Head of the Department of Botany, email: novosad-botan@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9719-8778

Department of botany, National Museum of Natural History of the National Academy of Sciences of Ukraine
15 Bohdana Khmelnytskoho Street, Kyiv, 01054, Ukraine

Shcherbakova O. [*in Ukrainian: Щербакіова О.*] ², Candidate of Biological Sciences, Senior Research Associate of the Department of Botany; Associate Professor of the Department of Pharmaceutical and Biological Chemistry, Pharmacognosy, email: scherbakova_ola@ukr.net

ORCID: 0000-0001-6601-6476

Department of Botany, National Museum of Natural History of the National Academy of Sciences of Ukraine
15 Bohdana Khmelnytskoho Street, Kyiv, 01054, Ukraine

Department of Pharmaceutical and Biological Chemistry, Pharmacognosy, PHEE "Kyiv Medical University"
2 Boryspilska Street, Kyiv, 02099, Ukraine

Novosad K. [*in Ukrainian: Новосад К.*] ³, Candidate of Biological Sciences (Ph. D.), Research of the Department of Botany, Assistant of Department of Biology, email: novosad.kv@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6704-0336

Department of Botany, National Museum of Natural History of the National Academy of Sciences of Ukraine
15 Bohdana Khmelnytskoho Street, Kyiv, 01054, Ukraine

Department of Biology, Bogomolets National Medical University
34, Beresteisky avenue, Kyiv, 03113, Ukraine

¹ Conducting research, conceptualization, literature collection and analysis, abstracts, conclusions, participation in manuscript preparation, editing an article.

² Conducting research, conceptualization, literature collection and analysis, conclusions, participation in manuscript preparation, editing an article.

³ Conducting research, participation in manuscript preparation, editing an article.

UDC 582.26(282.247.324):627.8(477.51)

DOI: 10.58407/bht.2.26.6



Copyright (c) 2026 Oleksandr Lukash, Anastasia Zmeu, Anna Radchenko, Maryna Liubko, Viktoriia Shumska, Ivan Kirvel

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, Анастасія Змеу, Анна Радченко,
Марина Любко, Вікторія Шумська, Іван Кірвель
ПРОСТОРОВО-СЕЗОННА ДИНАМІКА СТРУКТУРИ
ПРИБЕРЕЖНОЇ АЛЬГОФЛОРИ РІЧКИ СНОВ
У ЗОНІ ВПЛИВУ СЕДНІВСЬКОЇ ГЕС: ПІЛОТНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ



Oleksandr Lukash, Anastasia Zmeu, Anna Radchenko,
Maryna Liubko, Viktoriia Shumska, Ivan Kirvel

SPATIAL-SEASONAL DYNAMICS OF
THE RIPARIAN ALGAL FLORA STRUCTURE
IN THE AREA OF THE SEDNIV HPP IMPACT ON THE SNOV RIVER: PILOT STUDY

АНОТАЦІЯ

Метою роботи є встановлення особливостей сезонної зміни родового складу та рясності водоростевих угруповань р. Снов у зоні впливу Седнівської ГЕС.

Методологія. Матеріал збирали у листопаді 2024 р. та березні 2025 р. у б'єфах ГЕС на мілководдях (до 0,5 м) в угрупованнях макрофітів. Зразки формували об'єднанням 6 локальних проб. Камеральну обробку здійснювали світловою мікроскопією. Частоту трапляння таксонів визначали за 4-бальною шкалою.

Наукова новизна. Вперше для малих річок Полісся деталізовано просторово-сезонну перебудову структури альгоценозів за умов регулювання стоку малою ГЕС.

Висновки. Установлено, що руслова гребля ГЕС на річці Снов виступає потужним екологічним та гідродинамічним бар'єром для розвитку мікрофітобентосу, ефект якого найбільш яскраво проявляється в осінній період. Уповільнення течії та підпір води до ГЕС сприяють евтрофікації мілководь, формуванню фітоценозів асоціації *Glucierietum maximae* та масовому розвитку нитчастих зелених (*Zygnema*, *Ulothrix*) і десмідієвих водоростей. Гідродинамічний режим після ГЕС (транзитний потік, елімінація мулу) призводить до збіднення альгофлори вдвічі, руйнування нитчастих матів та залишає життєздатним лише стійке ядро прикріплених діатомей (*Navicula*, *Gomphonema*) в угрупованнях асоціації *Caricetum ripariae*. У ранньовесняний період фактор проточності весняного водопілля та низькі температури нівелюють просторові відмінності, спричинені ГЕС, переводячи фітобентос обох ділянок у пригнічений стан із домінуванням кріофільних діатомових водоростей. Обґрунтовано, що для встановлення точних причинно-наслідкових екологічних закономірностей у зоні впливу ГЕС перспективні дослідження потребують переходу від бальних оцінок до абсолютних кількісних показників (чисельності та біомаси водоростей) із залученням розгорнутого гідрохімічного аналізу (вмісту біогенних елементів та розчиненого кисню). Це дозволить застосувати методи багатовимірного статистичного аналізу для побудови математичних моделей і точного доведення ступеня впливу гідродинамічного та хімічного факторів на альгоценози річки Снов.

Ключові слова: альгофлора, антропогенний вплив, гідротехнічні споруди, просторово-сезонна динаміка, фітоценози

ABSTRACT

Purpose of the work is to establish the features of seasonal transformation of the generic composition and abundance of algal communities of the Snov River in the zone of the Sedniv HPP impact.

Methodology. Material was collected in November 2024 and March 2025 in the HPP tailwaters in shallow waters (up to 0.5 m) within macrophyte communities. Samples were formed by combining 6 local samples. Laboratory processing was performed using light microscopy. The frequency of occurrence of taxa was determined using a 4-point scale.

Scientific novelty. For the first time for small rivers of Polesie, the spatial-seasonal restructuring of the algal flora under flow regulation by a small HPP was detailed.

Conclusions. The channel dam of the HPP on the Snov River acts as a powerful ecological and hydrodynamic barrier for the development of microphytobenthos, the effect of which is most clearly manifested in the autumn period. Slowing down the current and water support to the HPP contribute to the eutrophication of shallow waters, the formation of phytocoenoses of the *Glycerietum maximae* association and the massive development of filamentous green (*Zygnema*, *Ulothrix*) and desmid algae. The hydrodynamic regime after the HPP (transitional flow, elimination of silt) leads to a twofold depletion of the algal flora, destruction of filamentous mats and leaves viable only a stable core of attached diatoms (*Navicula*, *Gomphonema*) in communities of the *Caricetum ripariae* association. In the early spring period, the flow factor of spring floods and low temperatures level the spatial differences caused by the HPP, shifting the phytobenthos of both areas into a depressed state dominated by cryophilic diatoms. It is substantiated that to establish accurate cause-and-effect ecological patterns in the zone of the HPP impact, future studies require transition from point scales to absolute quantitative indicators (algal abundance and biomass) with the involvement of a detailed hydrochemical analysis (nutrients and dissolved oxygen). This will allow the use of multivariate statistical analysis methods to build mathematical models and precise mathematical proof of the degree of hydrodynamic and chemical factors influence on the Snov River algal communities.

Key words: algal flora, anthropogenic impact, hydraulic structures, phytocoenoses, spatial-seasonal dynamics

Вступ

Сучасні дослідження свідчать про суттєве розширення вегетаційних меж водоростей у просторі й часі: від активного підльодного розвитку у бореальних водоймах (Grosbois et al., 2024) та зимових спалахів чисельності ціанобактерій (Soto Cárdenas et al., 2025) до стабільного літньо-осіннього домінування зелених водоростей і ціанопрокаріот у річкових системах (Wang et al., 2017; Zhu et al., 2025). Для багатьох гідроекосистем, зокрема басейну Прип'яті та Полісся загалом, характерним є формування високодиверсифікованих полідомінантних структур фітопланктону та мікрофітобентосу (Sukhodolska & Basaraba, 2023). Хоча температура води традиційно вважається головним чинником сукцесії, її вплив у зарегульованих руслах часто опосередкований та трансформований специфічними гідродинамічними характеристиками.

Будівництво та функціонування гідротехнічних споруд докорінно змінюють екологічний режим річок, трансформуючи швидкість течії, термічний режим, процеси седиментації та цикли біогенних елементів (Zhu et al., 2025). Перегородження русла греблями створює штучну диференціацію умов існування гідробіонтів, що призводить до зміщення сезонних піків біомаси та перебудови структури прибережних обростань вище і нижче за течією (Zębek & Szymańska, 2014). Крім того, наявність водозливних споруд суттєво збільшує час водообміну, внаслідок чого гідрологічний фактор стає провідним фактором розвитку альгофлори, переважаючи за екологічним значенням температуру та світло (Kim et al., 2022). Навіть у випадку екстремальних сценаріїв, таких як демонтаж або руйнування гребель,

раптова зміна гідродинамічного тиску та імпульсне вимивання нутрієнтів здатні спровокувати масштабні хвилеподібні спалахи «цвітіння» води та перебудову конкурентних взаємозв'язків між планктонними й бентосними компонентами (Minicheva et al., 2024). Таким чином, гідродинамічне регулювання стоку виступає провідним чинником просторово-часової організації альгоценозів.

Дослідження малих річок в умовах гідротехнічного регулювання має важливе значення для збереження регіонального біорізноманіття та екологічної стабільності великих річкових басейнів. Малі річки, до яких належить і р. Снов, виконують роль природних екологічних коридорів та репродуктивних зон, проте через низьку водність вони мають мінімальний буферний потенціал до антропогенного навантаження. Функціонування Седнівської ГЕС створює специфічний техногенний «бар'єр», який фрагментує русло річки на дві екологічно відмінні зони: зарегульовану верхню ділянку (руслове водосховище) та нижній б'єф зі зміненим режимом стоку та постійною турбулізацією водних мас. На відміну від великих водосховищ, де процеси екологічної трансформації вивчені детально, на малих річках Полісся вплив ГЕС на сезонну динаміку родового складу прибережних альгоценозів залишається фрагментарним. Зміна швидкості течії безпосередньо впливає на співвідношення прикріплених та донних форм водоростей, що є чутливим індикатором стану екосистеми. Вивчення реакції альгофлори до і після греблі дозволяє оцінити ступінь порушення річкового континууму та розробити заходи з мінімізації негативного впливу малої гідроенергетики на якість води в басейні р. Десна.

Метою роботи є встановлення особливостей сезонної зміни родового складу та рясності планктонних і бентосних водоростевих угруповань р. Снов у зоні впливу Седнівської ГЕС.

Характеристика району дослідження

Дослідження проводилися поблизу Седнівської гідроелектростанції (ГЕС), розташованої на річці Снов (Чернігівська обл.). Зазначений гідровузол є русловою пригребельною ГЕС малої потужності, яка функціонує з 1954 року і суттєво трансформує природний гідрологічний режим річки, створюючи специфічні техногенно змінені екотопи у верхньому та нижньому б'єфах.

Район відбору проб охоплював акваторію пригребельного розширення водосховища та ділянку русла в нижньому б'єфі після водоскиду. Сформоване греблею руслове водосховище має протяжність 13,5 км при середній ширині дзеркала 40 м. Загальна площа водного дзеркала становить 50 га, а повний об'єм акумульованої води досягає 1,5 млн. м³ (Yedynyi Enerhostandart, 2018). Гідродинамічні умови у верхньому б'єфі визначаються значними глибинами, які безпосередньо біля греблі становлять у середньому 3,2 м, сягаючи максимуму 3,5 м. Такі морфометричні показники сприяють суттєвому сповільненню швидкості течії та формуванню зон акумуляції дрібнодисперсних мулистих відкладень і органічної речовини, що безпосередньо впливає на структуру прибережно-водних макрофітів та мікрофітобентосу.

Регулювання стоку на станції здійснюється за добовим характером. Основним

гідротехнічним бар'єром є розбірна щитова гребля довжиною 40 м та висотою 3 м. Робота гідровузла забезпечує стабільний напір води, який у розрахунковому режимі становить 2,0 м, варіюючи від мінімального значення 1,8 м до максимального – 2,2 м. Розрахункова витрата води через турбінні агрегати ГЕС складає 15,4 м³/с, що зумовлює постійну високу турбулізацію та перемішування водних мас у нижньому б'єфі (Yedynyi Enerhostandart, 2018).

Різниця екологічних умов у місцях відбору проб обумовлена постійним перепадом висот водного дзеркала. За нормальних умов експлуатації рівень верхнього б'єфу підтримується на позначці 109,5 м, тоді як у нижньому б'єфі він становить 107,5 м. Під час весняного водопілля рівні можуть синхронно зростати до максимальної паводкової позначки 111,8 м, що призводить до тимчасового нівелювання підпірного ефекту та зміни структури проточних ділянок (Yedynyi Enerhostandart, 2018).

Матеріали та методи дослідження

Збір альгологічного матеріалу здійснювали у два контрастних за гідротермічними умовами сезони: пізньої осені (листопад 2024 р., температура води +9°C) та на початку весняного водопілля (березень 2025 р., температура води +1°C). Проби відбирали з лівого берега р. Снов на двох дослідних ділянках: ділянка 1 (рис. 1) розташовувалася за 300 м вище створу ГЕС (зона підпору водосховища), ділянка 2 (рис. 2) – за 300 м нижче греблі (зона турбулентного транзитного потоку).



Рис. 1. Ділянка 1 у прибережній зоні р. Снов (за 300 м вище створу Седнівської ГЕС). Демонструє застійний характер екотопу та формування щільного заростання в угрупованні асоціації *Glycerietum maximae* (фото О. Лукаша)



Рис. 2. Ділянка 2 у прибережній зоні р. Снов (за 300 м нижче греблі Седнівської ГЕС). Відображає проточний характер нижнього б'єфу та структуру фітоценозу асоціації *Caricetum ripariae* (фото О. Лукаша)

На обох ділянках збір проводили у прибережно-водній смузі на мілководді з фіксованою глибиною до 0,5 м серед угруповань вищої водної рослинності, що належать до асоціацій *Glycerietum maximae* Nowiński 1930 corr. Šumberová, Chytrý et Danihelka in Chytrý 2011 та *Caricetum ripariae* Máthé et Kovács 1959 відповідно.

Враховуючи специфіку екотопу, об'єктом дослідження виступав мікрофітобентос з домішкою епіфітних обростань макрофітів. Відбирали поверхневий шар піщано-мулистих донних відкладень разом із придонним шаром води та змивами з підводних частин рослин. Для забезпечення репрезентативності та нівелювання просторової мікронеоднорідності біотопу, на кожній ділянці безпосередньо під час виїзду відбирали по 6 локальних точкових проб. Надалі їх попарно об'єднували по 3 первинні проби, формуючи у підсумку дві інтегральні об'єднані проби для кожної ділянки в межах одного туру. Фіксацію матеріалу проводили 4 % розчином формаліну безпосередньо на місці збору.

Камеральну обробку та ідентифікацію таксономічного складу альгоугруповань виконували у лабораторії методом світлової мікроскопії. Для детального морфологічного аналізу живих та фіксованих клітин використовували світловий бінокулярний мікроскоп Delta Optical Genetic Pro (Poland) з вбудованим освітлювачем при збільшеннях $\times 200$ та $\times 400$. Візуалізацію та ідентифікацію об'єктів проводили у тимчасових препаратах.

Ідентифікацію таксонів здійснювали переважно до родового рівня за допомогою базових вітчизняних та закордонних визначників прісноводних водоростей (Torachevskyi & Masiuk, 1984; Bourrelly, 1981, 1985, 1988, 1990). Номенклатуру та авторство таксонів уніфіковано згідно з міжнародною базою даних AlgaeBase (Guiry & Guiry, 2026).

Оскільки кількісний підрахунок клітин у лічильних камерах на даному етапі не проводився, для оцінки щільності популяцій водоростей у препаратах було застосовано бальну шкалу рясності (частоти трапляння) мікроводоростей (дивись огляд різних шкал оцінки рясності клітин у Barinova et al., 2019). Візуальну оцінку кількості організмів у полі зору мікроскопа трансформували у таку систему балів: 1 бал («поодинокі») – поодинокі екземпляри (1–2 клітини або нитки) виявляються лише в кількох препаратах; 2 бали («рідко») – таксон реєструється регулярно, але у незначній кількості (поодинокі у деяких полях зору); 3 бали («помірно») – організми трапляються майже в кожному полі зору мікроскопа, формуючи помітну групу супроводу; 4 бали («значно») – представники таксону домінують у препараті, заповнюючи значну частину полів зору.

Результати дослідження та обговорення

У результаті опрацювання альгологічного матеріалу, відібраного у прибережній зоні річки Снов у районі розташування ГЕС протягом двох контрастних гідротермічних періодів, у складі

мікрофітобентосу та прибережно-водних обростань було ідентифіковано 20 таксонів на рівні роду. Виявлені роди належать до 5 відділів, зокрема *Cyanobacteria*, *Bacillariophyta*, *Chlorophyta*, *Streptophyta* та *Chrysophyta*.

Загальна структура альгоценозів, розподіл таксонів за екологічними групами та оцінка їхньої рясності за сезонами і дослідними ділянками (до та після греблі ГЕС) відображені у таблиці 1.

Таблиця 1

Оцінка частоти трапляння таксонів водоростей та ціанобактерій у прибережній зоні р. Снов за сезонами (інтегральний бал за 4-бальною шкалою)

Таксони	Листопад 2024 р. Ділянка 1 (до ГЕС)	Листопад 2024 р. Ділянка 2 (після ГЕС)	Березень 2025 р. Ділянка 1 (до ГЕС)	Березень 2025 р. Ділянка 2 (після ГЕС)
Cyanobacteria				
<i>Microcystis</i> Lemmermann	1	1	0	0
Bacillariophyta				
<i>Cymbella</i> Agardh	1	0	2	0
<i>Diatoma</i> Bory	1	0	1	0
<i>Fragilaria</i> Lyngbye	1	0	1	0
<i>Gomphonema</i> Ehrenberg	1	1	1	1
<i>Navicula</i> Bory	3	2	2	1
<i>Nitzschia</i> Hassall	2	1	2	1
<i>Pinnularia</i> Ehrenberg	2	1	1	1
<i>Synedra</i> Ehrenberg	2	1	2	1
Chlorophyta				
<i>Chlorella</i> Beijerinck	2	2	1	1
<i>Klebsormidium</i> P.C.Silva, Mattox & W.H.Blackwell.	2	0	1	0
<i>Ulothrix</i> Kützing	3	0	1	0
Streptophyta				
<i>Closterium</i> Nitzsch ex Ralfs	3	1	0	1
<i>Cosmarium</i> Corda ex Ralfs	1	0	0	0
<i>Desmidium</i> C.Agardh ex Ralfs	1	0	0	0
<i>Euastrum</i> Ehrenberg ex Ralfs	1	0	0	0
<i>Mougeotia</i> Agardh	1	0	1	0
<i>Spirogyra</i> Link	2	0	1	0
<i>Zygnema</i> Agardh	4	1	1	0
Chrysophyta				
<i>Lagynion</i> Pascher	1	0	1	0
Загальна кількість родів на ділянці	20	9	14	6

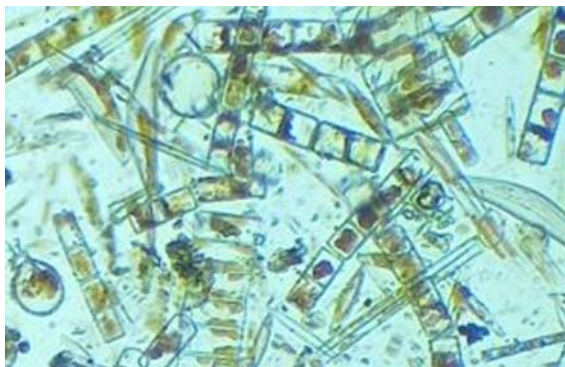
За результатами аналізу даних щодо мікрофітобентосу та прибережних обростань р. Снов у листопаді зафіксовано чітку просторову неоднорідність альгоценозів. На ділянці 1 (до ГЕС) виявлено високе родове різноманіття (рис 3 Б) – 20 таксонів. Абсолютним домінантом виступив рід

Zygnema (4 бали), що утворював масові скупчення. До групи субдомінантів (3 бали) увійшли *Navicula*, *Ulothrix* та *Closterium*. Помірний розвиток (2 бали) відзначено для родів *Nitzschia*, *Pinnularia*, *Synedra*, *Chlorella*, *Klebsormidium* та *Spirogyra*. На ділянці 2 (після ГЕС) спостерігався збіднений

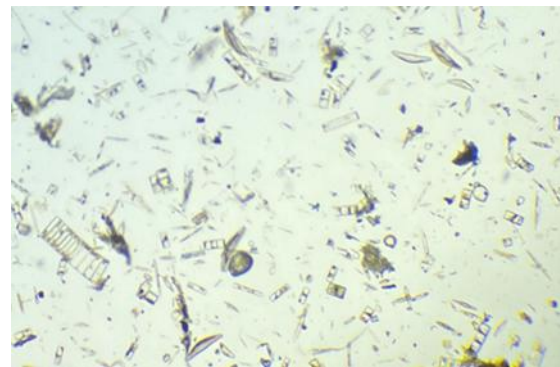
альгологічний склад – виявлено лише 9 родів. Чіткі домінанти тут були відсутні, а відносний розвиток (2 бали) зафіксовано лише для *Navicula* та *Chlorella*. Більшість нитчастих зелених та харових водоростей (*Ulothrix*, *Klebsormidium*, *Spirogyra*, *Mougeotia*) повністю випали зі структури фітоценозу, а рясність *Zygnema* знизилася до поодиноких знахідок (1 бал).

Ранньовесняний комплекс водоростей на обох ділянках характеризувався вираженим кількісним та якісним пригніченням (максимальна рясність не перевищувала 2 балів) – рис. 3 Б. Повністю зникли представники ціанобактерій

(*Microcystis*). На ділянці 1 (до ГЕС) ідентифіковано 14 родів із перевагою холодолюбних діатомей *Cymbella*, *Navicula*, *Nitzschia* та *Synedra* (2 бали). Нитчасті форми перебували на рівні поодиноких знахідок (1 бал), а більшість десмідієвих водоростей не були відмічені. На ділянці 2 (після ГЕС) біорізноманіття скоротилося до мінімуму – 6 родів. Усі виявлені таксони (*Gomphonema*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Pinnularia*, *Synedra*, *Chlorella*) реєструвалися виключно поодинокі. Винятком у структурі цієї ділянки стала поодинокі трапляння представника роду *Closterium* (1 бал).



А



Б

Рис. 3. Мікрофотографії проб мікрофітобентосу та прибережних обростань р. Снов у районах впливу ГЕС (світлова мікроскопія): А – осінній комплекс альгоценозу на ділянці 1 (до ГЕС, листопад 2024 р.), що характеризується високим таксономічним різноманіттям та значною рясністю нитчастих водоростей (фото Ю. Жук); Б – весняний кріофільний комплекс на ділянці 2 (після ГЕС, березень 2025 р.) із вираженим домінуванням пеннатних діатомових водоростей за низької загальної щільності організмів (фото А. Змеу)

Отримані результати свідчать про те, що формування альгоценозів мікрофітобентосу та обростань у прибережній зоні р. Снов підпорядковане комплексному впливу двох чинників: антропогенно зміненому гідродинамічному режиму (наявність руслової греблі ГЕС) та природній сезонній періодичності.

Просторова диференціація структури водоростевих угруповань до і після греблі логічно пов'язана зі зміною біотопічних умов та структурою фітоценозів макрофітів.

Ділянка 1 (до ГЕС) перебуває в зоні гідродинамічного підпору. Уповільнення течії та інтенсивне замулення мілководдя (0,5 м) створили умови для розвитку щільного заростання угрупованнями, що належать до асоціації *Glycerietum maximae*. Високе проекційне покриття *Glyceria maxima* (Hartm.)

Holmb. та наявність *Lemna minor* L. восени (листопад) сформували специфічний застійний мікроклімат із високим вмістом розчиненої органіки та біогенів (азоту й фосфору), що вимиваються з опадів *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. Саме ці умови зумовили осінній спалах водорості *Zygnema* (4 бали) та високу рясність зелених нитчастих водоростей *Ulothrix* (3 бали). Ці таксони мають довгі нитчасті талому, які потребують стабільної підкладки (стебел макрофітів таких як *Glyceria maxima*, *Ceratophyllum submersum* L., *Nuphar lutea* (L.) Sm.) та відсутності сильної течії, що здатна розірвати або змити їхні мати (Graham & Wilcox, 2000). Крім того, застійні умови підпору та накопичення гумусових речовин пояснюють присутність великої кількості десмідієвих водоростей (*Closterium* – 3 бали, *Cosmarium*,

Euastrum, *Desmidium* – по 1 балу), які біологічно приурочені до заторфованих, слабокислих або нейтральних біотопів із високим вмістом органіки (Barinova et al., 2019).

Ділянка 2 (після ГЕС) зазнає кардинально іншого гідродинамічного тиску. Скид води через споруди ГЕС зумовлює постійну турбулентність, коливання рівня та вищий ступінь проточності. Внаслідок цього дрібнодисперсні мулисті фракції змиваються, залишаючи щільніший піщаний субстрат. У таких умовах сформувався значно розрідженіший фітоценоз асоціації *Caricetum ripariae* з домінуванням *Carex acuta* L. (50 %), а плаваючі рослини *Lemna minor* повністю елімінувалися течією. Подібний «гідродинамічний шок» виявився руйнівним для більшості водоростей: восени різноманіття родів знизилось з 20 до 9. Крихкі нитчасті форми (*Ulothrix*, *Spirogyra*) та десмідієві водорості не здатні утримуватися у транзитному потоці і повністю вимиваються. На цій ділянці виживає лише екологічно стійке ядро прикріплених (перифітонних) діатомей (*Navicula*, *Gomphonema*, *Synedra*), які мають міцний кремнієвий панцир і здатні щільно фіксуватися на підводних частинах осоки або частинок піску, а також ультрапланктонна дрібна зелена водорість *Chlorella*, стійка до механічного перемішування (Torachevskyi & Masiuk, 1984; Graham & Wilcox, 2000; Barinova et al., 2019).

Сезонний фактор у березні 2025 року кардинально переналаштував структуру фітобентосу, нівелювавши вплив підпору ГЕС. Весняне водопілля принесло великі маси талої води, збільшивши проточність на обох ділянках. Низька температура стала лімітуючим чинником для теплолюбних ціанобактерій (*Microcystis* повністю зник) та уповільнила вегетацію зелених нитчанок (їхня рясність впала до 1 або 0 балів).

Натомість першість перейшла до кріофільних (холодолюбних) діатомей (*Cymbella*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra*), які першими починають активний фотосинтез за низьких температур (Torachevskyi & Masiuk, 1984; Graham & Wilcox, 2000). Зміна сапробіологічних характеристик родів чітко вказує на зміну трофічного статусу річки. Зокрема, роди *Navicula*, *Nitzschia* та *Synedra* містять багато видів-індикаторів α - та β -мезосапробних зон (Barinova et al., 2019). Їхня

стабільна присутність на обох ділянках вказує на помірне органічне забруднення річки Снов. Спад рясності цих родів після ГЕС (з 2 балів до 1 балу у березні) свідчить скоріше не про покращення якості води, а про фізичне вимивання клітин швидкою весняною течією у нижньому б'єфі. Цікавим маркером є поодинокі поява десмідієвої водорості *Closterium* (1 бал) на ділянці після ГЕС у березні, тоді як до ГЕС її не виявлено. Біологічно це пояснюється транзитним характером паводку: весняна вода вимиває десмідієві водорості з боліт та стариць у верхній течії річки Снов, і вони транзитом проходять через створ ГЕС, тимчасово затримуючись у прибережній зоні нижнього б'єфу.

Ураховуючи отримані результати, слід зазначити, що використання напівкількісної бальної оцінки рясності родів за умов відсутності повного спектра інструментальних гідрохімічних показників накладає певні обмеження на глибину інтерпретації причинно-наслідкових зв'язків. Для уникнення умовностей у висновках та встановлення строгих, математично доведених екологічних закономірностей у функціонуванні екосистеми річки Снов, подальші дослідження мають базуватися на комплексному поєднанні абсолютних кількісних величин та багатовимірного статистичного моделювання.

По-перше, важливим є перехід від бальних оцінок до точного кількісного підрахунку чисельності клітин (кл/мл) або (млн кл/л) та розрахунку біомаси (мг/дм³) водоростей із застосуванням спеціалізованих лічильних камер (наприклад, камер Нажотта, Горяєва чи Седжвіка-Рафтера), що є методологічним стандартом у сучасній гідробіології (Barinova et al., 2019). По-друге, паралельно з альгологічним збором необхідно виконувати детальний фізико-хімічний аналіз води безпосередньо в точках відбору проб. Особливу увагу слід приділити пулу біогенних елементів – концентраціям нітратів, амонію, фосфатів, а також рівням розчиненого кисню, перманганатної та біохімічної окиснюваності, які безпосередньо лімітують розвиток окремих екологічних груп мікроводоростей.

Наявність таких розгорнутих матриць кількісних (абсолютна біомаса родів або видів) та факторальних (гідрохімічні та

гідрологічні параметри) даних дозволить застосувати методи багатовимірної статистики. Зокрема, використання аналізу головних компонент та канонічного кореляційного аналізу є загально визнаним світовим підходом для виявлення прихованих екологічних градієнтів (Ter Braak, 1986). Це дозволить побудувати точні математичні моделі та чітко розмежувати, які саме чинники – антропогенні (швидкість течії та рівневий режим у нижньому і верхньому б'єфах ГЕС) чи гідрохімічні (температура води, рівень біогенного навантаження) – є головними рушійними силами структурно-функціональних перебудов прибережних альгоценозів.

Висновки

Установлено, що руслова гребля ГЕС на річці Снов виступає потужним екологічним та гідродинамічним бар'єром для розвитку мікрофітобентосу, ефект якого найбільш яскраво проявляється в осінній період.

Уповільнення течії та підпір води до ГЕС сприяють евтрофікації мілководь, формуванню фітоценозів асоціації *Glycerietum maximae* та масовому розвитку нитчастих зелених (*Zygnema*, *Ulothrix*) і десмідієвих

водоростей. Гідродинамічний режим після ГЕС (транзитний потік, елімінація мулу) призводить до збіднення альгофлори вдвічі, руйнування нитчастих матів та залишає життєздатним лише стійке ядро прикріплених діатомей (*Navicula*, *Gomphonema*) в угрупованнях асоціації *Caricetum ripariae*. У ранньовесняний період фактор проточності весняного водопілля та низькі температури нівелюють просторові відмінності, спричинені ГЕС, переводячи фітобентос обох ділянок у пригнічений стан із домінуванням кріофільних діатомових водоростей.

Для встановлення точних причинно-наслідкових екологічних закономірностей у зоні впливу ГЕС перспективні дослідження потребують переходу від бальних оцінок до абсолютних кількісних показників (чисельності та біомаси водоростей) із залученням розгорнутого гідрохімічного аналізу (вмісту біогенних елементів та розчиненого кисню). Це дозволить застосувати методи багатовимірної статистичного аналізу для побудови математичних моделей і точного математичного доведення ступеня впливу гідродинамічного та хімічного факторів на альгоценози річки Снов.

Подяки / Acknowledgements

Автори висловлюють подяку Юлії Жук (природничо-математичний факультет Національного університету імені Т.Г. Шевченка «Чернігівський колегіум») за допомогу (фотографування) під час камеральної обробки зібраних проб / The authors express their gratitude to Yuliia Zhuk (Faculty of the Natural Sciences and Mathematics of the T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium") for her assistance (photography) during the laboratory processing of the collected samples.

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 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

- Barinova, S. S., Bilous, O. P., & Tsarenko, P. M. (2019). *Algal indication of water bodies in Ukraine: Methods and perspectives*. University of Haifa Publishing House. https://www.researchgate.net/profile/Sophia-Barinova/publication/332441691_Algoindikacia_vodnyh_obektov_Ukrainy_metody_i_perspektivy/links/5cb6dbe592851c8d22f0c65d/Algoindikacia-vodnyh-obektov-Ukrainy-metody-i-perspektivy.pdf
- Bourrelly, P. (1981). *Les Algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome II: Les Algues jaunes et brunes. Chrysophycées, Phéophycées, Xanthophycées et Diatomées*. Société Nouvelle des Editions Boubée.
- Bourrelly, P. (1985). *Les Algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome III: Les Algues bleues et rouges. Les Eugléniens, Péridiniens et Cryptomonadines*. Société Nouvelle des Editions Boubée.
- Bourrelly, P. (1988). *Les Algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome I: Les Algues vertes*. Société Nouvelle des Editions Boubée.
- Bourrelly, P. (1990). *Les Algues d'eau douce. Compléments Tome I: Les Algues vertes*. Société Nouvelle des Editions Boubée.
- Graham, L. E., & Wilcox, L. W. (2000). *Algae*. Prentice Hall. <https://www.scribd.com/document/415005995/Linda-E-Graham-Lee-Warren-Wilcox-Algae-pdf>
- Grosbois, G., Anjum Mou, T., & Girona, M. M. (2024). Cyanobacteria in winter: Seasonal dynamics of harmful algal blooms and their driving factors in boreal lakes. *Heliyon*, 10(24), e40687. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40687>
- Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (2026). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Retrieved July 11, 2026, from <https://www.algaebase.org/>
- Kim, J., Seo, D., & Jones, J. R. (2022). Harmful algal bloom dynamics in a tidal river influenced by hydraulic control structures. *Ecological Modelling*, 467, Article 109931. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109931>
- Minicheva, G. G., Garkusha, O. P., Kalashnik, K. S., Marinets, G. V., & Sokolov, Y. V. (2024). Reaction of planktonic and benthic algae in the Black Sea to the consequences of the destruction of the Kakhovska Reservoir dam on the Dnipro River (Ukraine). *Algologia*, 34(2), 104–129. <https://doi.org/10.15407/alg34.02.104>
- Soto Cárdenas, C., Gereá, M., Queimaliños, C., & Jara, F. G. (2025). Seasonal dynamics of winter-spring algal blooms in the temporary wetlands of Andean Patagonia, Argentina. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 59(5), 1202–1219. <https://doi.org/10.1080/00288330.2025.2506697>
- Ter Braak, C. J. (1986). Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67(5), 1167–1179. <https://doi.org/10.2307/1938672>

Topachevskyi, A. V., & Masiuk, N. P. (1984). *Freshwater algae of the Ukrainian SSR*. Vyshcha Shkola. (in Ukrainian)

Топачевський А. В., Масюк Н. П. Прісноводні водорості Української РСР. Київ: Вища школа, 1984. 336 с

Sukhodolska, I., & Basaraba, I. (2023). Seasonal dynamics of algal flora of Lake Zasvitske (Rivne region, Ukraine). *Algologia*, 33(2), 83–97. <https://doi.org/10.15407/alg33.02.083>

Wang, T., Zhang, H., Zhao, L., & Huang, H. (2017). Responses of a phytoplankton community to seasonal and environmental changes in Lake Nansihu, China. *Marine and Freshwater Research*, 68(10), 1877–1886. <https://doi.org/10.1071/MF16331>

Yang, Z., Wei, C., Liu, D., Lin, Q., Huang, Y., Wang, C., Ji, D., Ma, J., & Yang, H. (2022). The influence of hydraulic characteristics on algal bloom in Three Gorges Reservoir, China: A combination of cultural experiments and field monitoring. *Water Research*, 211, 118030. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.118030>

Yedynyi Enerhostandart. (2018, November 7). *Sedniv Hydroelectric Power Plant*. Retrieved July 11, 2026, from <https://oes.com.ua/station/sednivska-ges/> (in Ukrainian)

Седнівська ГЕС // Єдиний енергостандарт: офіційний сайт товариства. 2018. URL: <https://oes.com.ua/station/sednivska-ges/> (дата звернення: 11.07.2026).

Zębek, E. & Szymańska, U. (2014). Gastropods and periphytic algae relationships in the vicinity of a small hydroelectric plant on the Pasłęka River in northeast Poland. *Fisheries & Aquatic Life*, 22(1), 69-80. <https://doi.org/10.2478/aopf-2014-0007>

Zhu, J., Liu, X., Wang, Y., Chen, L., & Li, H. (2025). Effect of hydraulic projects on the phytoplankton community structure in the mainstream of the Ganjiang River. *Water*, 17(21), 3126. <https://doi.org/10.3390/w1721312>

Received: 13.07.2026. Accepted: 19.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Лукаш О., Змеу А., Радченко А., Любка М., Шумська В., Кірвель І. Просторово-сезонна динаміка структури прибережної альгофлори річки Снов у зоні впливу Седнівської ГЕС: пілотне дослідження. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 83-93. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.6>

Cite this article in APA style as:

Lukash, O., Zmeu, A., Radchenko, A., Liubko, M., Shumska, V., & Kirvel, I. (2026). Prostorovo-sezonna dynamika struktury pryberezhnoi alhoflory richky Snov u zoni vplyvu Sednivskoi HES: pilotne doslidzhennia [Spatial-seasonal dynamics of the riparian algal flora structure in the area of the Sedniv HPP impact on the Snov River: pilot study]. *Biota. Human. Technology*, (2), 83-93. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.6> (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

Zmeu A. [in Ukrainian: **Змеу А.**] ², Student, email: zmeunastya@gmail.com
ORCID: 0009-0003-5572-8066

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

Radchenko A. [in Ukrainian: **Радченко А.**] ³, Student, email: radchenkoanna369@gmail.com

ORCID: 0009-0002-4679-6094

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

Liubko M. [in Ukrainian: **Любко М.**] ⁴, Student, email: luibkomarina12@gmail.com

ORCID: 0009-0007-4285-2702

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

Shumska V. [in Ukrainian: **Шумська В.**] ⁵, Student, email: viktoriausmskaa2@icloud.com

ORCID: 0009-0002-2943-0269

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

Kirvel I. [in Ukrainian: **Кірвель І.**] ⁶, Dr. of Geogr. Sc., Prof., email: ivan.kirvel@upsl.edu.pl

ORCID: 0000-0002-8996-6789

Institute of Geography, Pomeranian University in Słupsk
27 Partyzantow Street, Słupsk, 76-200, Poland

¹ Study design, data collection, manuscript preparation.

² Data collection, manuscript preparation.

³ Data collection, manuscript preparation.

⁴ Data collection, manuscript preparation.

⁵ Data collection, manuscript preparation.

⁶ Study design, manuscript preparation.



ZOOBIOTA

ЗООБИОТА



UDC 595.762(477.87):591.9

DOI: 10.58407/bht.2.26.7



Copyright (c) 2026 Dorina Csoma, Leonard Illar, Stepan Kolozsvari

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/).

Дорина Чома, Леонард Іллар, Степан Коложварі
ОСОБЛИВОСТІ УГРУПОВАНЬ ТУРУНІВ (*COLEOPTERA: CARABIDAE*)
РІЗНИХ ТИПІВ ОСЕЛИЩ В ОКОЛИЦЯХ СЕЛА ВЕЛИКА ДОБРОНЬ
(ЗАКАРПАТСЬКА НИЗОВИНА)



Dorina Csoma, Leonard Illar, Stepan Kolozsvari

FEATURES OF GROUND BEETLE ASSEMBLAGES (*COLEOPTERA: CARABIDAE*)
IN DIFFERENT HABITAT TYPES IN THE VICINITY OF VELYKA DOBRON VILLAGE
(TRANSCARPATHIAN LOWLAND)

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідити видовий склад і структуру угруповань турунів (*Coleoptera: Carabidae*) в околицях села Велика Добронь (Закарпатська низовина) та порівняти фауну п'яти типів оселищ: лісу, луки, орного поля, саду та прибережної зони меліоративного каналу.

Методологія. Польові дослідження проводили у 2023–2025 роках методом ґрунтового пасткування з використанням пасток Барбера. Зібраний матеріал визначали до рівня виду та аналізували за показниками видового багатства, чисельності, індексу Шеннона, індексу домінування, рівномірності Бузаса–Гібсона та Chao-1. Для описового порівняння угруповань застосовували кореспондентний аналіз (CA), SIMPER-аналіз і кластерний аналіз на основі індексу подібності Морісіті.

Наукова новизна. Уперше проведено порівняльне дослідження угруповань турунів різних типів оселищ в околицях села Велика Добронь із застосуванням багатовимірних методів аналізу. Отримані результати доповнюють відомості про фауну Carabidae Закарпатської низовини та уточнюють локальні особливості розподілу найчисельніших видів у мозаїчному агроландшафті.

Висновки. У досліджених оселищах виявлено 203 особини турунів, що належали до 19 видів і 13 родів. Найвище видове багатство та чисельність зафіксовано у садовому оселищі (14 видів, 90 особин), тоді як найменше видове багатство було характерне для лісового оселища (3 види, 19 особин). Найвище значення індексу Шеннона встановлено для лучного оселища ($H' = 2,008$), а найвищий індекс домінування – для прибережної зони меліоративного каналу ($D = 0,5072$). Найбільшу подібність за індексом Морісіті виявлено між лучним і польовим оселищами (0,928), а найнижчу – між лісом і прибережною зоною каналу (0,017). Отримані результати свідчать про відмінності у видовому складі, чисельності та структурних показниках угруповань турунів між дослідженими оселищами.

Ключові слова: Carabidae, біоіндикатори, ґрунтові пастки, різноманіття оселищ, Закарпатська низовина

ABSTRACT

Purpose of the work. The aim of the study was to investigate the species composition and assemblage structure of ground beetles (*Coleoptera: Carabidae*) in the vicinity of Velyka Dobron village (Transcarpathian Lowland, Ukraine) and to compare the fauna of five habitat types: forest, meadow, arable field, orchard, and the riparian zone of a melioration canal.

Methodology. Field investigations were conducted in 2023–2025 using pitfall trapping with Barber traps. Collected specimens were identified to species level and analysed using species richness, abundance, the Shannon index, dominance index, Buzas–Gibson's evenness, and Chao-1. Correspondence Analysis (CA), SIMPER analysis, and cluster analysis based on the Morisita similarity index were used for descriptive comparison of the assemblages.

Scientific novelty. This is the first comparative study of ground beetle assemblages in different habitat types in the vicinity of Velyka Dobron using multivariate analytical methods. The results supplement current knowledge of the Carabidae fauna of the Transcarpathian Lowland and clarify local patterns in the distribution of the most abundant species within a mosaic agricultural landscape.

Conclusions. A total of 203 ground beetle individuals belonging to 19 species and 13 genera were recorded in the investigated habitats. The highest species richness and abundance were found in the orchard habitat (14 species, 90 individuals), whereas the lowest species richness was recorded in the forest habitat (3 species, 19 individuals). The highest Shannon index value was observed in the meadow habitat ($H' = 2.008$), while the highest dominance index was recorded in the riparian zone of the melioration canal ($D = 0.5072$). The greatest Morisita similarity was found between the meadow and arable field habitats (0.928), whereas the lowest similarity was recorded between the forest habitat and the riparian zone of the canal (0.017). These results indicate differences in species composition, abundance, and structural parameters of ground beetle assemblages among the investigated habitats.

Key words: Carabidae, bioindicators, pitfall traps, habitat diversity, Transcarpathian Lowland

Вступ

Туруни (*Coleoptera: Carabidae*) належать до однієї з найбагатших за видовим складом родин ряду твердокрилих і є важливим компонентом наземних екосистем помірного поясу. Більшість представників родини веде хижацький спосіб життя та бере участь у регуляції чисельності інших безхребетних, хоча серед них трапляються також фітофаги й сапрофаги (Lövei & Sunderland, 1996). Завдяки чутливості до змін мікроклімату, структури рослинності, вологості ґрунту та рівня антропогенної трансформації оселищ туруни широко використовуються як біоіндикатори екологічного стану наземних екосистем і змін біорізноманіття (Rainio & Niemelä, 2003).

Структура угруповань турунів значною мірою залежить від типу оселища, ступеня його природності та просторової гетерогенності ландшафту. Природні й напівприродні оселища зазвичай характеризуються вищою часткою стенотопних та спеціалізованих видів, тоді як антропогенно трансформовані території переважно заселяються евритопними видами (Thiele, 1977; Turin et al., 2003; Rainio & Niemelä, 2003). У мозаїчних агроландшафтах поєднання природних, напівприродних і господарсько змінених біотопів створює широкий спектр мікрооселищ, що може підтримувати високе локальне різноманіття турунів (Turin et al., 2003; Putchkov, 2018).

Дослідження фауни турунів на території України та суміжних регіонів Карпатського басейну мають тривалу історію. За узагальненими даними Пучкова, у фауні України відомо майже 750 видів турунів із 117 родів, що свідчить про високе таксономічне багатство *Carabidae* на території країни (Putchkov, 2011). Карпатський регіон також характеризується значним видовим багатством турунів, оскільки для нього наведено приблизно 450 видів *Carabidae* (Putchkov, 2011). Така різноманітність пов'язана з великою площею країни,

неоднорідністю природних умов окремих географічних регіонів, а також поєднанням рівнинних, передгірних і гірських ландшафтів (Putchkov, 2011; Rizun, 2003).

Детальні фауністичні узагальнення для окремих таксономічних груп також підтверджують особливе значення Карпатського регіону та Закарпаття для дослідження турунів. Зокрема, Пучков і Різун, аналізуючи трибу *Trechini* фауни України, навели дані про 29 видів із 10 родів і трьох підтриб, поширених у 13 географічних областях і провінціях основних природних зон України (Putchkov & Rizun, 2015). Найбільше таксономічне багатство цієї групи зафіксовано в Карпатах, де зареєстровано 25 видів, зокрема всі представники родів *Duvaliopsis* і *Duvalius* та більшість видів роду *Trechus* (Putchkov & Rizun, 2015). Серед них *Duvalius transcarpathicus*, *D. roubali*, *D. corpulentus*, *D. ruthenus ruthenus* і *Trechus pseudomantanellus* є ендеміками Українських Карпат (Putchkov & Rizun, 2015).

Регіональні та суміжні фауністичні дослідження свідчать, що карабіди вивчалися у широкому спектрі оселищ, зокрема у лісових, лучних, прибережних, заплавних, агроцено-тичних і трансформованих біотопах. Для Українських Карпат узагальнено дані про турунів переважно лісових, лучних, прибережних і гірських оселищ, які відрізняються за рівнем зволоження, висотою над рівнем моря та ступенем природності біотопів (Rizun, 2003; Putchkov, 2011). Для трансформованих екосистем України наведено дані про угруповання *Carabidae* в урбанізованих територіях, парках, садах, агроценозах, лісосмугах і напівприродних ділянках, де часто зростає частка широко поширених евритопних видів (Putchkov, 2018; Putchkov et al., 2019). У суміжних територіях Карпатського басейну та Північно-Східної Угорщини карабід досліджували у лісових, лучних, лісоузлих, заплавних і сільськогосподарських оселищах, що підтверджує доцільність порівняння угруповань

у мозаїчних ландшафтах із різними типами біотопів (Ködöböcz, 2007). Для фауністичного й таксономічного контексту видів роду *Carabus* у Карпатському басейні також важливим є узагальнення Retezár and Szél (2022).

Наявні дослідження показують, що окремі види та групи турунів мають виражену біотопічну приуроченість. Представники *Carabidae* трапляються у лісових, лучних, заплавних, прибережних, агроценотичних, садових і міських оселищах, однак склад угруповань і співвідношення домінантних видів можуть змінюватися залежно від типу біотопу (Thiele, 1977; Turin et al., 2003; Putchkov, 2018). Для антропогенних ландшафтів України характерним є відносне збіднення видового складу та переважання широко поширених полі- або евритопних видів, зокрема представників родів *Amara*, *Bembidion*, *Harpalus*, *Poecilus* і *Pterostichus* (Putchkov, 2018). Натомість природні й напівприродні лісові, лучні та прибережні оселища можуть підтримувати більш різноманітні або спеціалізовані комплекси турунів (Thiele, 1977; Turin et al., 2003; Rizun, 2003).

Отже, реакція угруповань турунів на зміну умов оселищ проявляється не лише у зміні загальної чисельності, а й у зміні видового складу, структури домінування, частки полі- та стенотопних видів, а також показників різноманіття й рівномірності. У цьому контексті порівняння угруповань турунів у лісових, лучних, агроценотичних, садових і прибережних оселищах є доцільним для оцінки локальної фауністичної неоднорідності мозаїчних ландшафтів Закарпатської низовини.

Метою цього дослідження було вивчення видового складу та структури угруповань турунів в околицях села Велика Добронь, а також порівняння фауни п'яти різних типів оселищ: лісу, луки, орного поля, саду та прибережної зони меліоративного каналу. Очікувалося, що угруповання турунів у досліджених типах оселищ відрізнятимуться за видовим складом, чисельністю та показниками різноманіття, що може бути пов'язано з відмінностями у загальних умовах оселищ.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження проводили з жовтня 2023 року по травень 2025 року на території Закарпатської низовини, в околицях села Велика Добронь (рис. 1). Дослідження угруповань турунів здійснювали у п'яти типах оселищ: лісі,

луці, орному полі, саду та прибережній зоні меліоративного каналу. Координати місць відбору проб у системі WGS84 були такими: лісове оселище – 48°26'26.2"N, 22°23'39.2"E; лучне оселище – 48°26'13.0"N, 22°23'38.0"E; орне поле – 48°25'56.1"N, 22°23'18.3"E; садове оселище – 48°25'51.4"N, 22°23'09.1"E; прибережна зона меліоративного каналу – 48°25'53.8"N, 22°23'14.0"E.

Лісове оселище було представлене природним деревостаном, у якому зімкнутий деревний ярус формували переважно *Quercus robur*, *Carpinus betulus* та *Fraxinus excelsior*. Трав'яний покрив характеризувався високим видовим різноманіттям і значним проективним покриттям, серед домінуючих видів траплялися *Urtica dioica*, *Carex sylvatica*, *Galium verum*, *Plantago major* та *Taraxacum officinale*. Уздовж меліоративного каналу були поширені м'яко-листяні заплавні угруповання з домінуванням *Populus alba* та *Salix alba*. Лучне оселище являло собою напівприродні вологі луки та сінокоси. Сад характеризувався мозаїчною структурою та помірним антропогенним впливом, тоді як орні землі перебували під інтенсивним сільсько-господарським використанням із регулярними агротехнічними заходами (оранка, сімба).

Збір матеріалу здійснювали методом ґрунтового пасткування з використанням пасток Барбера. У кожному типі оселища встановлювали по 5 пасток, розташованих трансектним методом на відстані приблизно 2 м одна від одної. Така схема розміщення забезпечувала повторюваність відбору проб у межах кожного оселища та охоплення характерних мікрооселищних умов досліджуваних ділянок. Пастки являли собою пластикові ємності діаметром 8 см, заповнені 20 %-м розчином харчового оцету, який використовували як консервувальну рідину. Для зниження поверхневого натягу рідини до розчину додавали кілька крапель рідкого мила. Над пастками встановлювали захисні накриття, які запобігали потраплянню атмосферних опадів і зменшували ймовірність випадкового потрапляння дрібних хребетних тварин.

Відбір проб проводили періодично, відповідно до сезонної активності турунів, із тижневим інтервалом перевірки пасток. Зібраних особин зберігали у 70 %-у етанолі. Сорткування матеріалу та визначення особин до рівня виду проводили з використанням стереомікроскопа МБС-10. Таксономічну ідентифікацію зібраних турунів здійснювали

переважно на основі спеціалізованих визначників і фауністичних зведень Hůrka (1996) та Půtkov (2011a, 2011b), а для уточнення таксономії представників роду *Carabus* також враховували Retezár & Szél (2022). У подальших аналізах використовували дані щодо чисельності окремих видів.

Для характеристики структури угруповань визначали кількість видів (S) і чисельність особин (N), а також розраховували індекс різноманіття Шеннона (H'), індекс домінування (D), показник рівномірності Бузаса–Гібсона (E) та оцінку потенційного видового багатства Chao-1. Розрахунки виконували у програмному пакеті PAST 4.05 за модулем Diversity indices (Hammer et al., 2001).

Індекс Шеннона розраховували за формулою: $H' = -\sum (n_i / N) \ln (n_i / N)$, де n_i – чисельність особин i -го виду, N – загальна чисельність особин у вибірці відповідного оселища.

Індекс домінування визначали за формулою: $D = \sum (n_i / N)^2$.

Показник рівномірності Бузаса–Гібсона розраховували за формулою:

$E = \exp(H') / S$, де S – кількість видів у відповідному оселищі.

Потенційне видове багатство оцінювали за скоригованою формулою Chao-1: $\text{Chao-1} = \text{Sobs} + F_1(F_1 - 1) / [2(F_2 + 1)]$, де Sobs – фактично виявлена кількість видів, F_1 – кількість видів, представлених одним екземпляром, а F_2 – кількість видів, представлених двома екземплярами.

Для візуалізації відмінностей у видовому складі між дослідженими оселищами застосовували кореспондентний аналіз (Correspondence Analysis, CA). Вибір цього методу був зумовлений характером вихідних даних: аналіз ґрунтувався на матриці чисельності видів. Кореспондентний аналіз є придатним для аналізу таблиць чисельності та дає змогу одночасно відобразити типи оселищ і види в одному ординаційному просторі. У цьому дослідженні CA використовували як описовий метод візуалізації основних відмінностей у видовому складі між оселищами, а не як статистичний тест значущості цих відмінностей.

З метою оцінки внеску окремих видів у відмінності між угрупованнями проводили SIMPER-аналіз (Similarity Percentage), запропонований для розкладання середньої міжгрупової дисимілярності на внески

окремих таксонів (Clarke, 1993). Аналіз виконували на основі дисимілярності Брея–Кертиса, яка широко застосовується для порівняння екологічних угруповань за даними чисельності видів (Bray & Curtis, 1957). Отримані результати інтерпретували як описову оцінку внеску видів у міжоселищні відмінності, а не як статистичне виділення індикаторних видів.

Для оцінки подібності між оселищами використовували парно-груповий кластерний аналіз на основі індексу подібності Морісіті, який є одним із показників фауністичної подібності угруповань і враховує співвідношення чисельності видів у порівнюваних вибірках (Morisita, 1959). Кластерний аналіз застосовували для описового виявлення закономірностей подібності між дослідженими угрупованнями.

Статистичну обробку даних, розрахунок індексів різноманіття, SIMPER-аналіз, ординаційний і кластерний аналізи виконували за допомогою програмного пакета PAST (Paleontological Statistics, Hammer et al., 2001).

Результати дослідження та обговорення

Усього в ході дослідження було зібрано 203 особини турунів, які належали до 19 видів і 13 родів (рис. 2). Видовий склад та чисельність особин у п'яти досліджених оселищах наведено в таблиці 1. За описовими показниками досліджені оселища відрізнялися за видовим багатством, чисельністю особин і структурою домінування. Найвище видове багатство та найбільшу чисельність особин виявлено у садовому оселищі, де зареєстровано 14 видів і 90 особин. Лучне та польове оселища характеризувалися нижчими, порівняно із садовим оселищем, значеннями видового багатства – відповідно 10 і 8 видів. У лісовому оселищі виявлено 3 види та 19 особин, тоді як у прибережній зоні меліоративного каналу зареєстровано 5 видів і 25 особин.

Найчисельнішими видами в загальній вибірці були *Nebria brevicollis* (Fabricius, 1792) (52 особини), *Harpalus affinis* (Schrank, 1781) (35 особин), *Pterostichus melanarius* (Illiger, 1798) (34 особини) та *Abax parallelepipedus* (Piller & Mitterpacher, 1783) (28 особин). Лісове оселище характеризувалося переважанням *Carabus cancellatus*

Illiger, 1798 і *P. melanarius*, тоді як у відкритих оселищах *H. affinis* характеризувався високою чисельністю. Для садового оселища характерною була висока чисельність *N. brevicollis*, а для прибережної зони каналу – *A. parallelepipedus*.

Значення показників структури угруповань відрізнялися між дослідженими оселищами на рівні описової статистики (табл. 2). Найвище значення індексу Шеннона було зафіксовано у лучному оселищі ($H' = 2,008$). Це значення не слід інтерпретувати лише як ознаку найбільш «збалансованої» структури угруповання, оскільки індекс Шеннона залежить як від видового багатства, так і від рівномірності розподілу особин між видами. У цьому випадку високе значення H' пов'язане насамперед із відносно високим видовим багатством лучного оселища (10 видів), а також із порівняно рівномірним розподілом особин між видами за показником Бузаса–Гібсона ($E = 0,7447$). Відносно високі значення індексу Шеннона спостерігалися також у садовому оселищі ($H' = 1,839$) та на орному полі ($H' = 1,714$), тоді як лісове оселище ($H' = 0,9097$) і прибережна зона меліоративного каналу ($H' = 0,9704$) характеризувалися нижчими значеннями цього індексу.

Найвищі значення індексу домінування (D) виявлено у прибережній зоні меліоративного каналу ($D = 0,5072$) та в лісовому оселищі ($D = 0,4681$), що вказує на більший внесок окремих чисельних видів у структуру цих угруповань. Найнижче значення домінування спостерігалось у лучному оселищі ($D = 0,1771$). Найвищий показник рівномірності Бузаса–Гібсона виявлено у лісовому оселищі ($E = 0,8279$), тоді як найнижчий – у садовому оселищі ($E = 0,4494$).

Оцінка Chao-1 була використана як описовий показник потенційного видового багатства та можливої неповноти вибірки в окремих оселищах. Найвище значення Chao-1 встановлено для садового оселища (24,5), тоді як фактично виявлена кількість видів у цьому оселищі становила 14. Це може свідчити про ймовірну наявність додаткових рідкісних видів, які не були виявлені під час проведеного відбору проб. У польовому оселищі значення Chao-1 також перевищувало фактично виявлену кількість

видів (11 проти 8), а у прибережній зоні меліоративного каналу – 8 проти 5. Натомість у лісовому та лучному оселищах значення Chao-1 були близькими до фактично виявленого видового багатства.

Отримані результати вказують на те, що повнота вибірки могла відрізнятися між дослідженими оселищами, особливо у садовому оселищі, на орному полі та у прибережній зоні меліоративного каналу. Оскільки наявні дані були агреговані на рівні типів оселищ, а не структуровані за окремими повторними вибірками, пастками або датами відбору проб, криві накопичення видів у межах цього дослідження не будувалися. Тому порівняння видового багатства та індексів різноманіття між оселищами слід інтерпретувати обережно, з урахуванням можливої різної повноти вибірки.

За результатами кореспондентного аналізу (CA), ординаційна діаграма якого наведена на рисунку 3, перша вісь пояснювала 50,53 % загальної дисперсії, а друга – 27,44 %; сумарно дві осі описували 77,97 % варіації видового складу. Ординаційна діаграма візуально відображала відокремлене положення лісового оселища відносно інших типів оселищ. Лучне та польове оселища розташовувалися близько одне до одного, що вказує на їхню візуальну подібність у межах ординаційного простору. Садове оселище займало проміжне положення, тоді як прибережна зона меліоративного каналу була розташована окремо від більшості інших оселищ.

На ординаційній діаграмі *C. cancellatus* і *Carabus granulatus* Linnaeus, 1758 розташовувалися ближче до лісового оселища, тоді як *H. affinis* та *Amara aenea* (De Geer, 1774) були ближчими до відкритих оселищ. *N. brevicollis* і *P. melanarius* розташовувалися ближче до садового оселища, а *A. parallelepipedus* – до прибережної зони меліоративного каналу. Таке розташування видів в ординаційному просторі відображає описові відмінності у видовому складі та чисельності між оселищами, але не є статистичним підтвердженням їхньої індикаторної ролі.

SIMPER-аналіз на основі дисимілярності Брея–Кертиса показав, що найбільший внесок в описові міжоселищні відмінності за чисельністю видів мали

H. affinis і *C. cancellatus* (по 25,0 %). Помітний внесок також мали *A. aenea* (10,42 %), *N. brevicollis* (8,33 %), *Drypta dentata* (Rossi, 1790) та *C. granulatus* (по 6,25 %). Ці результати слід інтерпретувати як описову оцінку внеску окремих видів у дисимілярність між угрупованнями, а не як статистичне виділення індикаторних або характерних таксонів.

Згідно з індексом подібності Морісіті, найвищу схожість виявлено між лучним і польовим оселищами (0,928). Високий рівень подібності спостерігався також між полем і садом (0,721), тоді як лука та сад характеризувалися помірною схожістю (0,548). Лісове оселище чітко відокремлювалося від інших типів оселищ, особливо від прибережної зони каналу, для якої було зафіксовано найнижче значення індексу подібності (0,017).

Дендрограма кластерного аналізу підтвердила результати ординації: лучне та польове оселища утворювали найбільш тісний кластер, до якого згодом приєднувалося садове оселище, тоді як ліс залишався найбільш відокремленим типом оселища (рис. 4).

Таким чином, отримані результати загалом підтвердили початкове передба-

чення про відмінності угруповань турунів між дослідженими типами оселищ. Відмінності проявлялися у видовому складі, чисельності, структурі домінування, значеннях індексу Шеннона, показниках подібності Морісіті та положенні оселищ в ординаційному просторі. Найвищу подібність за індексом Морісіті виявлено між лучним і польовим оселищами (0,928), тоді як найнижчу подібність зафіксовано між лісовим оселищем і прибережною зоною меліоративного каналу (0,017). Ординаційний і кластерний аналізи також відобразили відмінності між дослідженими оселищами, зокрема відокремлене положення лісового оселища та близькість лучного й польового оселищ. Водночас отримані дані слід розглядати як описове підтвердження відмінностей між угрупованнями, а не як пряме доведення причинного впливу окремих екологічних факторів, оскільки такі чинники, як структура рослинного покриву, вологість ґрунту, мікрокліматичні умови та інтенсивність антропогенного навантаження, у межах цього дослідження кількісно не оцінювалися.

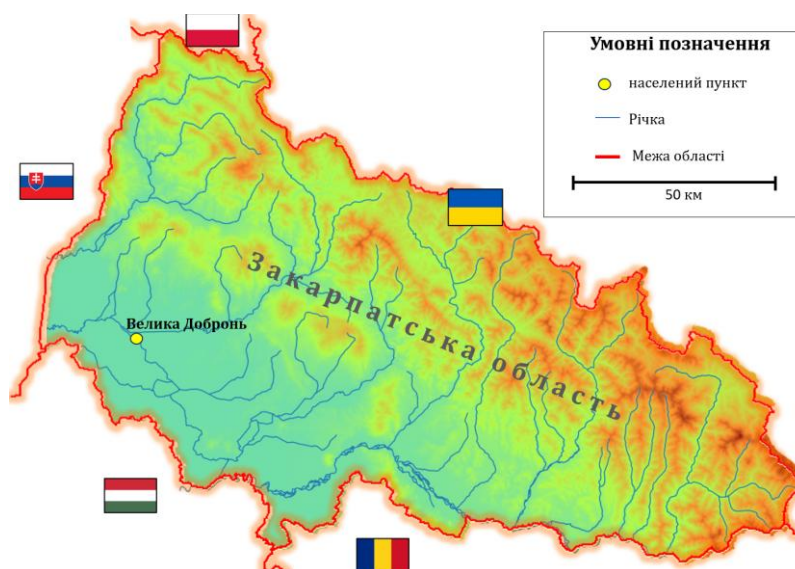


Рис. 1. Розташування досліджених місць відбору проб в околицях села Велика Добронь.

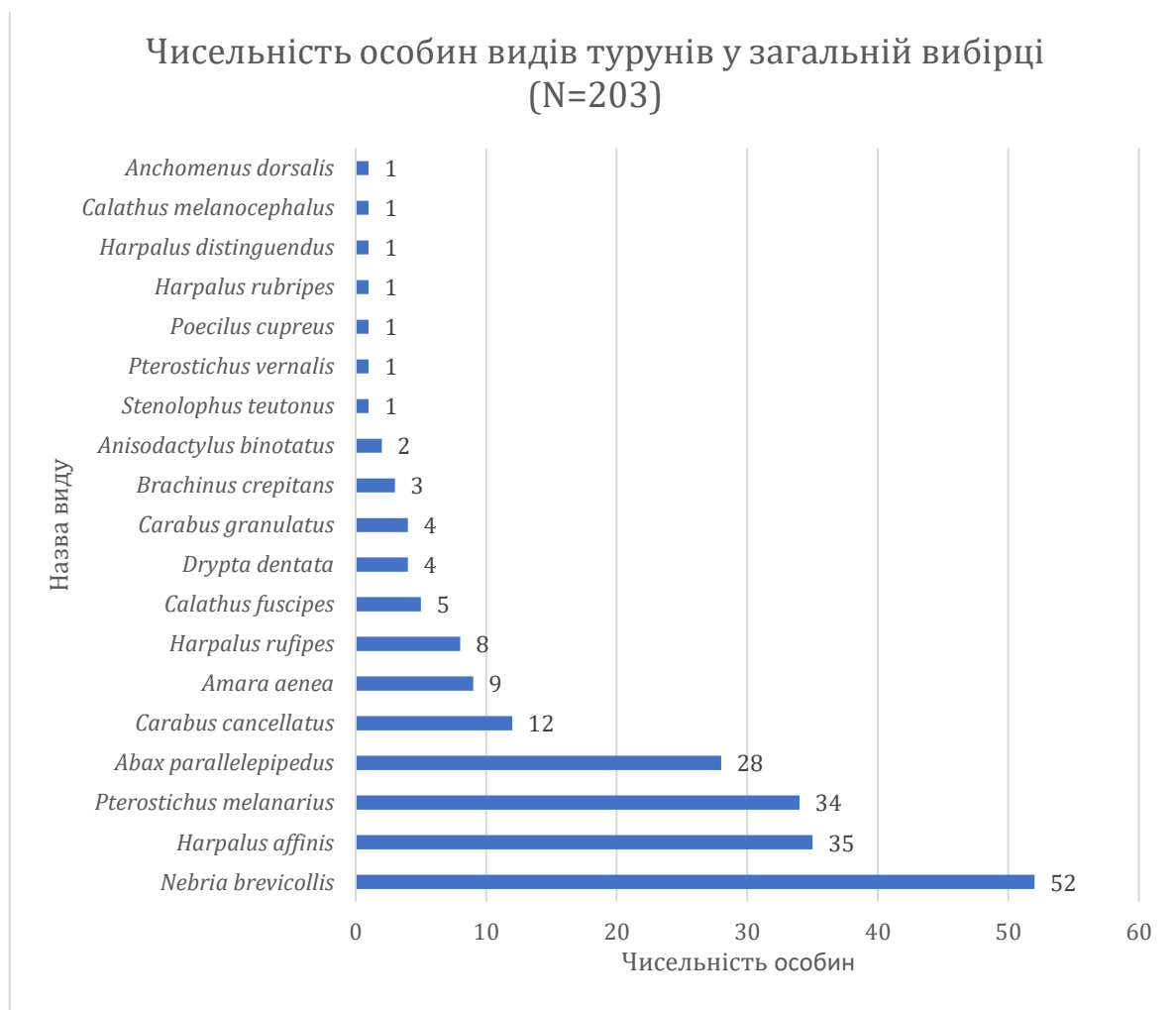


Рис. 2. Чисельність особин видів турунів у загальній вибірці (N = 203)

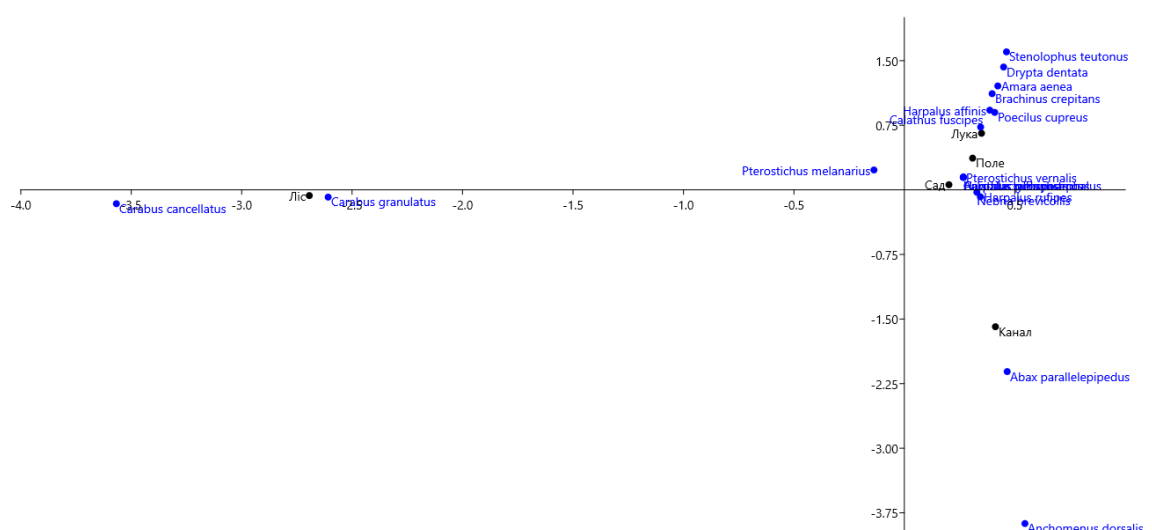


Рис. 3. Ординаційна діаграма кореспондентного аналізу (СА) угруповань турунів та досліджених оселищ в околицях села Велика Добронь

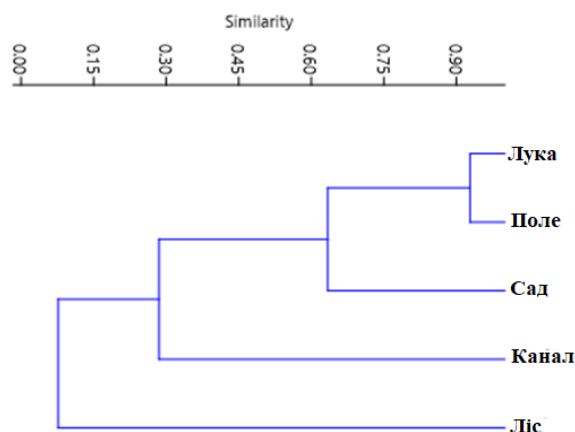


Рис. 4. Дендрограма кластерного аналізу (paired group, індекс подібності Морісіті, Sorehen. corr. = 0,9766) угруповань турунів досліджених оселищ

Таблиця 1

Чисельність особин видів турунів у п'яти досліджених оселищах

Вид турунів	Ліс	Лука	Поле	Сад	Канал
<i>Abax parallelepipedus</i> (Piller & Mitterpacher, 1783)	0	2	3	6	17
<i>Amara aenea</i> (De Geer, 1774)	0	5	3	1	0
<i>Anchomenus dorsalis</i> (Pontoppidan, 1763)	0	0	0	0	1
<i>Anisodactylus binotatus</i> (Fabricius, 1787)	0	0	0	2	0
<i>Brachinus crepitans</i> (Linnaeus, 1758)	0	2	0	1	0
<i>Calathus fuscipes</i> (Goeze, 1777)	0	2	0	3	0
<i>Calathus melanocephalus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0	1	0
<i>Carabus cancellatus</i> Illiger, 1798	12	0	0	0	0
<i>Carabus granulatus</i> Linnaeus, 1758	3	0	0	1	0
<i>Drypta dentata</i> (Rossi, 1790)	0	3	1	0	0
<i>Harpalus affinis</i> (Schrank, 1781)	0	12	13	10	0
<i>Harpalus distinguendus</i> (Duftschmid, 1812)	0	0	0	1	0
<i>Harpalus rubripes</i> (Duftschmid, 1812)	0	0	0	1	0
<i>Harpalus rufipes</i> (De Geer, 1774)	0	1	1	5	1
<i>Nebria brevicollis</i> (Fabricius, 1792)	0	4	7	36	5
<i>Poecilus cupreus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	1	0	0
<i>Pterostichus melanarius</i> (Illiger, 1798)	4	3	5	21	1
<i>Pterostichus vernalis</i> (Panzer, 1796)	0	0	0	1	0
<i>Stenolophus teutonius</i> (Schrank, 1781)	0	1	0	0	0

Таблиця 2

Основні параметри структури угруповань турунів досліджених оселищ

Показник	Ліс	Лука	Поле	Сад	Канал
Кількість видів	3	10	8	14	5
Чисельність особин	19	35	34	90	25
Домінування (D)	0,4681	0,1771	0,2284	0,2368	0,5072
Індекс Шеннона (H')	0,9097	2,008	1,714	1,839	0,9704
Рівномірність Бузаса-Гібсона (E)	0,8279	0,7447	0,6942	0,4494	0,5278
Chao-1	3	10,25	11	24,5	8

Висновки

У результаті дослідження угруповань турунів в околицях села Велика Добронь було зібрано 203 особини, що належали до 19 видів і 13 родів. Найбільшу кількість видів і особин виявлено у садовому оселищі, де зареєстровано 14 видів і 90 особин. Найменше видове багатство зафіксовано у лісовому оселищі, у якому виявлено 3 види і 19 особин. У лучному оселищі виявлено 10 видів і 35 особин, на орному полі 8 видів і 34 особини, а у прибережній зоні меліоративного каналу 5 видів і 25 особин.

Найчисельнішими видами у загальній вибірці були *N. brevicollis* (52 особини), *Harpalus affinis* (35 особин), *P. melanarius* (34 особини) та *A. parallelepipedus* (28 особин). У лісовому оселищі найвищу чисельність мав *C. cancellatus* (12 особин). У лучному та польовому оселищах найчисельнішим був *H. affinis*, відповідно 12 і 13 особин. У садовому оселищі переважав *N. brevicollis* (36 особин), а у прибережній зоні меліоративного каналу найбільшу чисельність мав *A. parallelepipedus* (17 особин).

Показники структури угруповань відрізнялися між дослідженими оселищами на рівні описових значень. Найвище значення індексу Шеннона встановлено для лучного оселища ($H' = 2,008$), тоді як найнижчі значення були характерні для лісового оселища ($H' = 0,9097$) та

прибережної зони меліоративного каналу ($H' = 0,9704$). Найвищий індекс домінування зафіксовано у прибережній зоні меліоративного каналу ($D = 0,5072$), а найнижчий у лучному оселищі ($D = 0,1771$). Найвище потенційне видове багатство за Chao-1 встановлено для садового оселища (24,5), що може свідчити про можливу наявність невиявлених рідкісних видів у цьому оселищі.

За індексом подібності Морісіті найбільшу подібність виявлено між лучним і польовим оселищами (0,928). Високе значення подібності також встановлено між польовим і садовим оселищами (0,721), тоді як найнижчу подібність зафіксовано між лісовим оселищем і прибережною зоною меліоративного каналу (0,017). Кластерний аналіз також відобразив близькість лучного та польового оселищ, до яких приєднувалося садове оселище. Лісове оселище займало найбільш відокремлене положення.

Отримані результати свідчать про те, що досліджені типи оселищ в околицях села Велика Добронь відрізнялися за видовим складом, чисельністю, структурою домінування та показниками подібності угруповань турунів. Водночас можливі причини цих відмінностей, зокрема роль рослинного покриву, мікрооселищних умов і антропогенного навантаження, потребують подальшого дослідження із залученням відповідних кількісних екологічних показників.

Фінансування / Funding

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

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Дані, що підтверджують результати дослідження, доступні в авторів за обґрунтованим запитом / The data supporting the findings of this 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

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

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 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 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, study 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

- Bray, J. R., & Curtis, J. T. (1957). An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 27(4), 325–349. <https://doi.org/10.2307/1942268>
- Clarke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18(1), 117–143. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>
- Forsythe, T. G. (1983). *Biology of the ground beetle*. Springer.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1–9.
- Hůrka, K. (1996). *Carabidae of the Czech and Slovak Republics*. Kabourek.
- Ködöböcz, V. (2007). *Az Északkeleti-Alföld futóbogár-faunája (Coleoptera: Carabidae) és állatföldrajzi kapcsolatai*. PhD dissertation, University of Debrecen, Debrecen.
- Löbl, I., & Smetana, A. (Eds.). (2003). *Catalogue of Palaearctic Coleoptera. Volume 1: Archostemata–Myxophaga–Adephaga*. Apollo Books.
- Lövei, G. L., & Sunderland, K. D. (1996). Ecology and behavior of ground beetles (*Coleoptera: Carabidae*). *Annual Review of Entomology*, 41, 231–256. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.41.010196.001311>
- Luff, M. L. (2007). *The Carabidae (ground beetles) of Britain and Ireland*. Royal Entomological Society.
- Morisita, M. (1959). Measuring of interspecific association and similarity between communities. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology)*, 3, 65–80.
- Putchkov, A. V. (2011a). Ground beetles of the tribe *Carabini* (*Coleoptera, Carabidae*) of the fauna of Ukraine. *Vestnik Zoologii*, 45(3), 209–232.
- Putchkov, A. V. (2011b). Ground beetles of the Ukraine (*Coleoptera, Carabidae*). *ZooKeys*, 100, 503–515. <https://doi.org/10.3897/zookeys.100.1545>
- Putchkov, A. V. (2018). Fauna and ecology of ground beetles (*Coleoptera: Carabidae*) in transformed ecosystems of Ukraine. *Baltic Journal of Coleopterology*, 18(1), 15–28.
- Putchkov, A. V., Brygadyrenko, V. V., & Markina, T. Y. (2019). Ground beetles of the tribe *Carabini* (*Coleoptera, Carabidae*) in the main megapolises of Ukraine. *Vestnik Zoologii*, 53(1), 3–12. <https://doi.org/10.2478/vzoo-2019-0001>

Пучков, А. В., & Різун, В. Б. (2015). Жужелицы трибы *Trechini* (Coleoptera, Carabidae) фауны Украины. *Український ентомологічний журнал*, 1–2(10), 14–32.

Rainio, J., & Niemelä, J. (2003). Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. *Biodiversity & Conservation*, 12(3), 487–506. <https://doi.org/10.1023/A:1022412617568>

Retezár, I., & Szél, G. (2022). *The genus Carabus in the Carpathian Basin (Coleoptera, Carabidae): Systematics, faunistics and iconography*. Second, revised edition. ArtEnto.

Rizun, V. B. (2003). *Ground beetles of the Ukrainian Carpathians*. State Museum of Natural History, NAS of Ukraine.

Rizun, V. B. (2012). Biodiversity and ecological peculiarities of *Carabidae* (Coleoptera) in forest ecosystems of the Ukrainian Carpathians. *Proceedings of the State Natural History Museum*, 28, 143–154.

Thiele, H. U. (1977). *Carabid beetles in their environments*. Springer.

Turin, H., Penev, L., & Casale, A. (2003). *The genus Carabus in Europe: A synthesis*. Pensoft Publishers.

Received: 31.05.2026. Accepted: 14.07.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Чома Д., Іллар Л., Коложварі С. Особливості групування турунів (Coleoptera: Carabidae) різних типів оселіщ в околицях села Велика Добронь (Закарпатська низовина). *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 95-105. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.7>

Cite this article in APA style as:

Csoma, D., Illar, L., & Kolozsvari, S. (2026). Osoblyvosti uhrupovan turuniv (Coleoptera: Carabidae) riznykh typiv oselyshch v okolytsiakh sela Velyka Dobron (Zakarpatska nyzovyna) [Features of ground beetle assemblages (Coleoptera: Carabidae) in different habitat types in the vicinity of Velyka Dobron village (Transcarpathian Lowland)]. *Biota. Human. Technology*, (2), 95-105. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.7> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Csoma D. [in Ukrainian: **Чома Д.**]¹, BSc student, email: csoma.dorina.b22bi@kmf.org.ua
ORCID: 0009-0009-5212-5896

Department of Biology and Chemistry, Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University
6 Kossuth Square, Berehovo, 90200, Ukraine

Illar L. [in Ukrainian: **Іллар Л.**]², Senior lecturer, email: illar.lenard@kmf.org.ua
ORCID: [0000-0003-2391-2523](https://orcid.org/0000-0003-2391-2523)

Department of Biology and Chemistry, Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University
6 Kossuth Square, Berehovo, 90200, Ukraine

Kolozsvari S. [in Ukrainian: **Коложварі С.**]³, Associate professor, email: kolozsvari.istvan@kmf.org.ua
ORCID: 0000-0002-4527-7762

Department of Biology and Chemistry, Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University
6 Kossuth Square, Berehovo, 90200, Ukraine

¹ Field inventory, specimen collection, and data curation.

² Conceptualization, methodology, and supervision.

³ Data analysis and critical revision of the manuscript.

UDC 597.851(282.247.324)

DOI: 10.58407/bht.2.26.8



Copyright (c) 2026 Oxana Tkachenko, Anna Lymar

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/).

Оксана Ткаченко, Анна Лимар

МОРФОЛОГІЯ ЖАБ РОДУ *PELOPHYLAX* УЗБЕРЕЖЖЯ Р. ДЕСНА, М. ЧЕРНІГІВ



Oxana Tkachenko, Anna Lymar

MORPHOLOGY OF FROGS OF THE GENUS *PELOPHYLAX* ALONG THE BANKS OF THE DESNA RIVER, CHERNIHIV

АНОТАЦІЯ

Руйнування природних оселищ внаслідок війни, а також прогресуюча урбанізація являють собою гостру проблему збереження, а у подальшому відновлення природних екосистем. Однією з найбільш уразливих груп тварин, які реагують на зміни навколишнього середовища, виокремлюють амфібій. Однією з причин зменшення популяцій земноводних є зростаюче антропогенне навантаження на природу. У міських умовах спостерігається зміна структури популяцій земноводних, відзначається збільшення частоти виникнення захворювань, відхилень у розвитку та будові.

Мета роботи. Метою даної роботи є аналіз морфологічних особливостей, визначення видової приналежності, особливостей статевого диморфізму та виявлення можливих захворювань і вад розвитку жаб роду *Pelophylax* прибережної смуги р. Десна в м. Чернігів.

Методологія. Жаб роду *Pelophylax* відловлювали сачком або руками. Спійманих тварин збирали в полотняний мішок, який періодично змочувався, щоб їх шкіра не пересихала і не перегрівалась. Опис морфологічних особливостей, таких як забарвлення, малюнок спини та черевця, морфометричні проміри проводились прижиттєво, після чого тварин випускали в місце їх вилову. Заміри робили за допомогою електронного штангенциркуля з точністю до сотих міліметра. Статистичний аналіз виконано з використанням статистичного пакету Statistica для Windows з урахуванням малої вибірки. Також фіксували наявність уражень різної етіології та вад розвитку.

Наукова новизна. У роботі вперше проведено комплексне дослідження морфометричних показників, уражень різної етіології та порушень розвитку зелених жаб роду *Pelophylax* прибережної смуги р. Десна в межах міста Чернігів.

Висновки. За морфологічними показниками зелені жаби роду *Pelophylax* прибережної смуги урочища Кордівка (м. Чернігів) належать, попередньо, до виду жаба озерна *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771). У особин досліджуваної популяції виявлені механічні пошкодження у вигляді подряпин та розривів шкіри, що може бути наслідком нападу хижаків. Така вада як ектромелія, вірогідно, є наслідком зараження метациркаріями трематод. Виразки на шкірі кінцівок, можливо, викликані ураженням грибом *Batrachochytrium dendrobatidis*. Оцифрування та збереження маршруту обліку у форматі KML забезпечує можливість проведення повторних обстежень на тій самій ділянці. Доступність геопросторового представлення маршруту дає змогу продовжувати дослідження не лише авторам цієї роботи, а й іншим дослідникам.

Ключові слова: *Pelophylax*, забарвлення, морфометрія, вади розвитку, захворювання

ABSTRACT

The destruction of natural habitats as a result of war, as well as advancing urbanisation, pose a pressing challenge for the conservation and, ultimately, the restoration of natural ecosystems. Amphibians are identified as one of the most vulnerable groups of animals in terms of their response to environmental changes. One of the reasons for the decline in amphibian populations is the increasing human impact on the natural environment. In urban areas, changes in the structure of amphibian populations have been observed, along with an increase in the incidence of diseases and abnormalities in development and morphology.

Purpose of the work. The aim of this study is to analyse morphological characteristics, determine species affiliation, examine features of sexual dimorphism, and identify possible diseases and developmental abnormalities in frogs of the genus *Pelophylax* found in the riparian zone of the Desna River.

Methodology. Frogs of the genus *Pelophylax* were caught using a landing net or by hand. The captured animals were placed in a linen bag, which was periodically moistened to prevent their skin from drying out or overheating. Descriptions of morphological characteristics, such as colouration and the pattern on the back and belly, as well as morphometric measurements, were carried out whilst the animals were still alive, after which they were released back into the area where they had been caught. Measurements were taken using an electronic vernier caliper, accurate to the nearest hundredth of a millimetre. Statistical analysis was carried out using the Statistica software package for Windows, taking into account the small sample size. The presence of lesions of various aetiologies and developmental abnormalities was also recorded.

Scientific novelty. This study is the first to conduct a comprehensive investigation of the morphometric characteristics, lesions of various aetiologies and developmental abnormalities in green frogs of the genus *Pelophylax* inhabiting the riparian zone of the Desna River within the city of Chernihiv.

Conclusions. Based on morphological characteristics, the green frogs of the genus *Pelophylax* found in the coastal strip of the Kordivka area in Chernihiv are provisionally classified as belonging to the species *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771). Mechanical injuries in the form of scratches and skin lacerations have been observed in individuals from the study population; these may be the result of predator attacks. A condition such as ectromelia is likely to be the result of infection with trematode metacercariae. Ulcers on the skin of the limbs may be caused by infection with the fungus *Batrachochytrium dendrobatidis*. Digitising and saving the survey route in KML format makes it possible to carry out repeat surveys in the same area. The availability of a geospatial representation of the route enables not only the authors of this study but also other researchers to continue the research.

Key words: *Pelophylax*, colouration, morphometry, developmental abnormalities, diseases

Вступ

Руйнування природних оселищ внаслідок війни, а також прогресуюча урбанізація являють собою гостру проблему збереження, а у подальшому відновлення природних екосистем. Ці процеси призводять до скорочення недоторканих людиною територій, ініціюють зниження якості природного середовища (Nekrasova, 2013) не тільки всередині населених пунктів, а й лісосмуг, лісів, територій біля водойм та самих водойм.

Однією з найбільш уразливих груп тварин, які реагують на зміни навколишнього середовища, виокремлюють амфібій. Вони займають різні екологічні ніші в наземно-повітряному та водному середовищах. Розподіл земноводних за біотопами є важливим біоіндикатором під час моніторингу навколишнього середовища та його біотичних компонентів (Lukash & Dan'ko, 2018; Pysanets, 2007), оскільки вони відіграють ключову роль у підтримці стабільності природних систем, розташованих на приміських територіях.

У міських умовах спостерігається збільшення частоти виникнення захворювань і відхилень у будові, таких як полідактилія, олігодактилія, синдактилія, клінодактилія, нерухомі кінцівки, геміmelія, брахіmelія, таумелія, поліmelія, ектромелія, анофтальмія, редукція деяких компонентів ока, його депігментація та вади інших органів (Meteyer, 2000).

Серед природних факторів, що викликають відхилення, відзначають такі внутрішні чинники як мутації та взаємодію генів. Зовнішніми чинниками можуть бути вплив слизу риб, дія хижаків, температурні коливання, підвищений рівень ультрафіолетового випромінювання. Крім того, зараження метациркаріями трематод призводить до аномальних регенерацій кінцівок і порушень морфогенезу хребта (Henle et al., 2017). Встановлено, що вплив широко поширеного у всьому світі гриба *Batrachochytrium dendrobatidis* спричиняє виразки шкіри та ураження систем внутрішніх органів, чим значно зменшує чисельність амфібій. В межах України інфікованих тварин було виявлено в західних та північно-центральных регіонах (Jakobik et al., 2024).

Додатково до факторів, що викликають аномальні відхилення у амфібій, включають хімічне забруднення пестицидами, нафтою (Meteyer, 2000), стічними водами (зокрема тими, які впливають на ендокринну систему амфібій), зміну клімату, збільшення кислотних опадів, хвороби та біотопічну ізоляцію.

Метою нашого дослідження є аналіз морфологічних особливостей зелених жаб роду *Pelophylax* прибережної смуги р. Десна в місті Чернігів, встановлення їх видової приналежності, особливостей статевого диморфізму, виявлення можливих захворювань і вад розвитку та їх потенційних причин.

Матеріали та методи дослідження

Характеристика біотопу

Дослідження проводилось в прибережній смузі урочища Кордівка, розташованого на південній околиці міста Чернігів.

Маршрут, на якому проводився збір матеріалу, проходив вздовж правого берега річки Десна і становив 2,72 км (рис. 1).

За класифікацією Національного каталогу біотопів України це оселище відноситься до групи В4 Прибережні біотопи, В4.1.4 Прибережні угруповання

невисоких гелофітів на мулистих субстратах. Воно являє собою вузьку перезволожену мулисто-піщану смугу, що затоплюється під час весняної повені, з болотною та прибережно-водною рослинністю (Didukh, 2018). Вищі судинні рослини представлені тут такими видами як *Alisma plantago-aquatica*, *Butomus umbellatus*, *Oenanthe aquatica*, *Sagittaria sagittifolia*, *Sparganium emersum*. До домінантів трав'яного ярусу належать *Alisma plantago-aquatica*, *Butomus umbellatus*, *Oenanthe aquatica*, *Rorippa amphibia*, *Sagittaria sagittifolia* (Kuzemko, 2018).

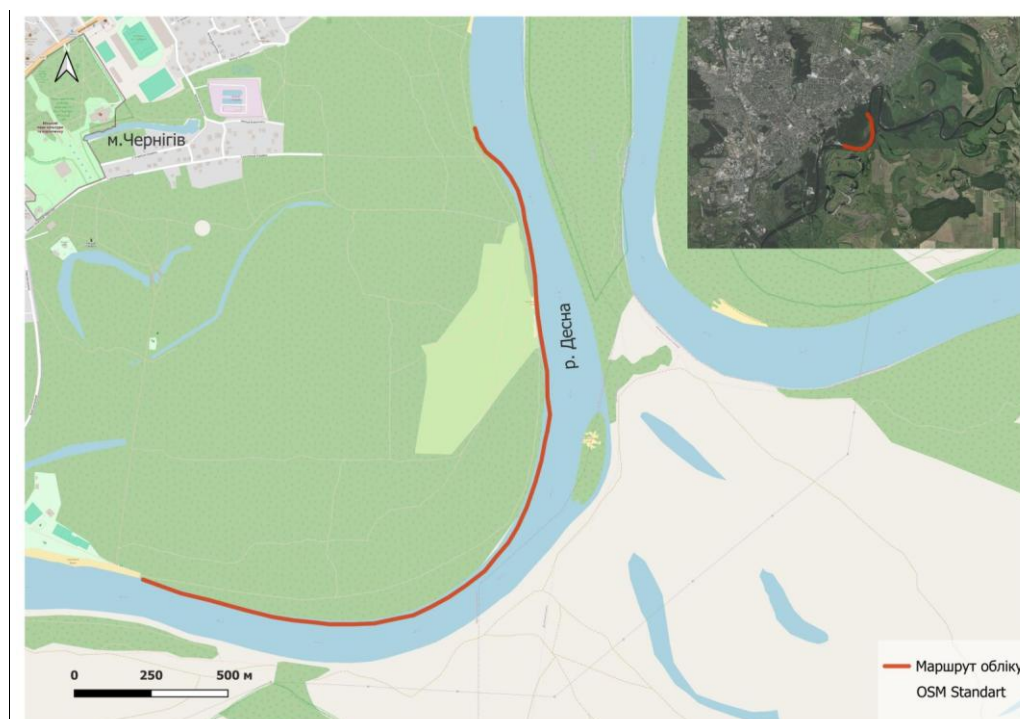


Рис. 1. Маршрут обліку. Правий берег р. Десна, урочище Кордівка, м. Чернігів, Україна

Матеріал

Матеріал зібрано під час польових досліджень, які відбувалися упродовж весни, літа та осені 2023 року. Всього було спіймано та використано для дослідження 11 особин зелених жаб роду *Pelophylax* (♂ - n=3, ♀ - n=8).

Методи дослідження

Жаб роду *Pelophylax* відловлювали сачком або руками. Спійманих тварин розміщували у полотняному мішку, який періодично змочувався, щоб їх шкіра не пересихала. Опис морфологічних особливостей, таких як забарвлення, малюнок верхньої і нижньої частини тулуба, а також

зняття промірів проводились прижиттєво, після чого тварину випускали в місце її вилову.

Для опису забарвлення були використані такі показники як колір спинної та черевної сторін тулуба, наявність спинної поздовжньої смуги, спинно-бічних складок, наявність плям на спинній стороні, малюнок черевної сторони (Stakh, Khamar, 2014), а також колір резонаторів та шлюбних мозолів у самців (Pysanets, 2007).

Для опису морфологічних ознак були використані стандартні для безхвостих амфібій заміри (табл.1) (Pysanets, 2007). Усі

заміри робили за допомогою електронного штангенциркуля з точністю до сотих міліметра.

Статистичний аналіз виконано з використанням статистичного пакету Statistica для Windows з урахуванням малої вибірки. Для аналізу розмірних параметрів використовували такі статистичні показники як середнє арифметичне (M), ліміти (min і max варіанти), стандартну похибку (m), середнє квадратичне відхилення (σ).

Аномалії розвитку кінцівок, таких як ектромелія (відсутність частини кінцівки), визначалися на основі класифікації аномалій безхвостих амфібій (Kurtyak, 2010). Виразки шкіри визначалися можливістю зараження тварин грибом *B. dendrobatidis* (Jakobik et al., 2024). Лабораторних досліджень щодо визначення причин захворювання або їх збудників, не проводилося. Оцінювали ці ознаки візуально без відбору зразків і подальшого аналізу. Також враховувалися травматичні пошкодження від хижаків або гострих предметів.

Візуалізацію та оцифрування маршруту обліку здійснювали за допомогою геоінформаційного програмного забезпечення QGIS із використанням супутникової картооснови ESRI Satellite. Загальна протяжність маршруту становила 2,72 км. Геопросторове представлення маршруту збережено у форматі KML.

Результати дослідження та обговорення

Особливості забарвлення

При дослідженні особливостей забарвлення і малюнку спинної та черевної сторін тіла зелених жаб південного узбережжя урочища Кордівка з'ясовано, що у забарвленні спинної частини тулуба переважають коричневі відтінки, рідше зустрічаються зеленуваті (рис. 2). Кількість особин з коричневим забарвленням спинної сторони тулуба становила 82 % від усієї кількості досліджуваних особин. Відповідно кількість особин із зеленуватим відтінком забарвлення становила 18 %. Такі відмінності у забарвленні зазвичай характерні для жаби озерної *P. ridibundus* (Pysanets, 2007).



А



Б

Рис. 2. Варіанти забарвлення спинної сторони тулуба жаб роду *Pelophylax* з території урочища Кордівка (р. Десна, Чернігів). А – коричневе забарвлення (82 %); Б – зеленувате забарвлення (18 %)

Однією з особливостей візерунку спини зелених жаб досліджуваної популяції є наявність світлої поздовжньої спинної смуги (рис. 3). Така смуга була наявна у 67 % спійманих самців та у 50 % самиць. Всього кількість особин зі смугою становила 55 % від усіх спійманих. Дорзомедіальна смуга є характерною особливістю візерунку спинної сторони тулуба жаби озерної (Pysanets,

2007), але наявна також у самців і самиць ставкової *Pelophylax lessonae* та їстівної *Pelophylax esculentus* жаб (Suriadna, 2005; Stakh, Khamar, 2014).

Окрім поздовжньої світлої смуги у візерунку спини всіх особин були присутні округлі темні плями здебільшого великого, а також середнього та дрібного розміру (рис. 4).



Рис. 3. Світла спинна смуга *Pelophylax ridibundus* урочища Кордівка (р. Десна, Чернігів)



А



Б

Рис. 4. Розташування та колір плям на спинній поверхні тіла *P. ridibundus* урочища Кордівка (р. Десна, Чернігів)

За наявності спинної смуги такі плями розташовуються, в основному, уздовж неї. У особин без спинної смуги плями розташовуються хаотично. Плями темного бурого кольору зустрічалися у 100 % самців та у 88 % самиць; у 12 % самиць плями були зеленого кольору. Відомо, що наявність таких плям є характерною особливістю візерунку спини жаби озерної (Pysanets, 2007). В меншій мірі такі плями

зустрічаються у ставкової та їстівної жаб, причому для ставкової жаби характерні дрібні плями (Suriadna, 2005).

Спинно-бічні складки (рис. 5) були наявні у 67 % самців та у 88 % самиць. Всього кількість особин із спинно-бічними складками становила 82 %. Серед трьох видів жаб роду *Pelophylax*, що мешкають на Чернігівщині, ця ознака притаманна *P. ridibundus* (Pysanets, 2007).

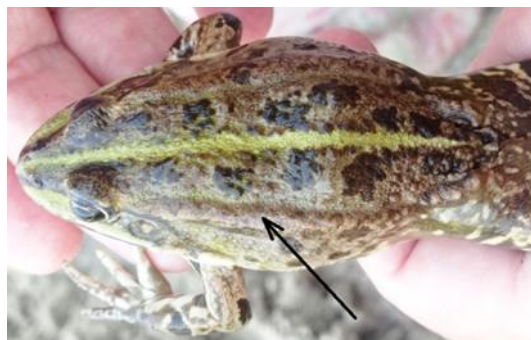


Рис. 5. Спинно-бічна складка *P. ridibundus* урочища Кордівка (р. Десна, Чернігів)

Мармурове забарвлення черева та горла наявне у 100 % досліджуваних тварин. Але характер плям, що

забезпечують таке забарвлення, відрізняється у різних особин (рис. 6).



А



Б

Рис. 6. Забарвлення черева та горла. А – маленькі світлі плями; Б – темні великі плями *P. ridibundus* урочища Кордівка (р. Десна, Чернігів)

Світлі невеликі плями характерні для 33 % самців та для 38 % самиць. Загалом, мармурове забарвлення з темних великих плям присутнє у 64 % досліджуваних особин. Таке забарвлення черевної сторони тіла характерно для озерної жаби, тоді як у ставкової жаби черево та горло не мають плямистості, а у їстівної вона дуже незначна (Suriadna, 2005; Pysanets, 2007).

Серед виловлених тварин 3 особини були самцями. Вони мали темно-сірі резонатори та темно-сірі шлюбні мозолі на першому пальці передніх кінцівок, що є ознакою *P. ridibundus*. У самців *P. lessonae* резонатори білого кольору, а шлюбні мозолі розташовані на двох-трьох внутрішніх пальцях передніх кінцівок. Самці *P. esculentus* мають резонатори брудно-білого кольору та темно-брунатні шлюбні мозолі на перших пальцях передніх кінцівок (Pysanets, 2007).

Морфометричні показники

Аналіз морфометричних показників показав, що самці досліджуваної популяції мають в середньому більш широку голову та більшу довжину додаткової гомілки.

Самиці мають в середньому довше тіло, більшу відстань між ніздрями та від ніздрі до переднього краю ока, більшу довжину барабанної перетинки, 1-го

пальця передньої кінцівки, стегна та гомілки, ніж самці тієї ж популяції.

Такі параметри як середня довжина голови (L.c.), відстань від ніздрі до кінця морди (D.r-n.), ширина морди (Lt.r.), довжина ока (L.o.), найбільша ширина верхньої повіки (Lt.p.), найменша відстань між внутрішніми краями верхніх повік (Sp.ip.), найменша відстань від переднього краю барабанної перетинки до заднього краю ока (D.tim.-o.), довжина передньої стопи (L.m.), ширина кисті в основі 1-го пальця (Lt.m.), довжина 1-го пальця задньої кінцівки (D.h.), довжина 4-го пальця задньої кінцівки (D.q.), найбільша довжина п'яtkового горбика в його основі (L.t.ci.), найбільша висота п'яtkового горбика (A.t.ci.) у самців і самиць майже не відрізняються. Але максимальні показники цих параметрів у більшості випадків належить самицям (табл. 1). За результатами промірів видно, що в середньому самиці мають більші розміри, ніж самці.

Розміри голови та тулуба особин досліджуваної популяції більші у порівнянні зі ставковою та їстівною жабами, а висота внутрішнього п'яtkового горбика менша, ніж у цих двох видів (Suriadna, 2005).

Таблиця 1

Морфологічні параметри амфібій роду *Pelophylax* досліджуваної популяції (р. Десна, Чернігів)

Параметри	♂ (n=3)		♀ (n=8)	
	$\frac{M \pm m}{\text{min-max}}$	σ	$\frac{M \pm m}{\text{min-max}}$	σ
1	2	3	4	5
L. - довжина тіла (від кінця морди до переднього краю клоакального овору)	$\frac{72,3 \pm 6,2}{62,7-84}$	10,8	$\frac{74,9 \pm 5,8}{59,7-101,2}$	16,3
L.c. - довжина голови (від кінця морди до заднього кута щелепи)	$\frac{29,5 \pm 2,6}{26-34,6}$	4,5	$\frac{29,8 \pm 2,2}{23,5-38,5}$	6,1
Lt.c. - максимальна ширина голови в основі нижніх щелеп (на рівні кутів рота)	$\frac{28,8 \pm 3,7}{23,5-35,8}$	6,4	$\frac{28,2 \pm 2,3}{22,7-39,7}$	6,5
D.r.-o. - довжина морди (від кінця морди до переднього краю ока)	$\frac{11,0 \pm 0,9}{9,3-12,5}$	1,6	$\frac{11,8 \pm 0,7}{9,8-15,5}$	2,1
D.r.-n. - відстань від ніздрі до кінця морди	$\frac{5,7 \pm 1,0}{3,7-7,1}$	1,8	$\frac{5,9 \pm 0,4}{4,4-8,3}$	1,3
Lt.r. - ширина морди (відстань між внутрішніми краями носових смуг біля передніх країв ока)	$\frac{8,8 \pm 1,1}{6,8-10,6}$	1,9	$\frac{8,5 \pm 0,5}{6,5-10,8}$	1,4
L.o. - довжина ока	$\frac{8,1 \pm 1,1}{6,10-9,71}$	1,8	$\frac{8,0 \pm 0,3}{6,4-9,3}$	0,9
Sp.in. - відстань між ніздрями	$\frac{4,6 \pm 0,7}{3,2-5,4}$	1,2	$\frac{5,1 \pm 0,2}{3,9-6,3}$	0,7
D.n.-o. - відстань від ніздрі до переднього краю ока	$\frac{5,07 \pm 0,19}{4,81-5,44}$	0,3	$\frac{5,3 \pm 0,4}{3,7-7,1}$	1,2
Lt.p. - найбільша ширина верхньої повіки	$\frac{5,3 \pm 0,6}{4,3-6,3}$	1,0	$\frac{5,3 \pm 0,4}{4,3-6,9}$	0,9
Sp.ip. - найменша відстань між внутрішніми краями верхніх повік	$\frac{3,4 \pm 0,3}{2,9-4,0}$	0,6	$\frac{3,5 \pm 0,4}{2,8-5,8}$	1,0
L.tim. - найбільша довжина барабанної перетинки	$\frac{5,3 \pm 0,4}{4,8-6,1}$	0,7	$\frac{6,1 \pm 0,3}{5,2-7,7}$	0,8
D.tim.-o. - найменша відстань від переднього краю барабанної перетинки до заднього краю ока	$\frac{3,2 \pm 0,5}{2,6-4,2}$	0,9	$\frac{3,2 \pm 0,5}{2,3-5,7}$	1,4
L.m. - довжина передньої лапки (від основи першого пальця до кінця найдовшого пальця)	$\frac{16,7 \pm 0,5}{15,9-17,7}$	0,9	$\frac{16,8 \pm 1,2}{13,1-24,2}$	3,4
Lt.m. - ширина кисті в основі 1-го пальця	$\frac{7,7 \pm 0,4}{7,1-8,4}$	0,7	$\frac{7,4 \pm 0,8}{5,3-11,7}$	2,2
D.p. - довжина 1-го пальця	$\frac{11,5 \pm 0,8}{9,9-12,7}$	1,4	$\frac{12,1 \pm 0,9}{8,9-16,5}$	2,8
F. - довжина стегна	$\frac{35,1 \pm 3,8}{29,1-42,0}$	6,5	$\frac{38,9 \pm 3,2}{30,5-53,5}$	8,9
T. - довжина гомілки	$\frac{33,4 \pm 7,8}{18,5-44,8}$	13,5	$\frac{40,4 \pm 2,9}{32,8-54,8}$	8,4

Продовження Таблиці 1

1	2	3	4	5
L.c.s. - довжина додаткової гомілки	$\frac{28,9 \pm 3,7}{21,4-32,9}$	6,5	$\frac{21,3 \pm 1,7}{16,9-28,6}$	4,8
D.h. - довжина 1-го пальця задньої кінцівки	$\frac{9,9 \pm 1,4}{8,2-12,8}$	2,5	$\frac{10,9 \pm 0,7}{8,4-14,2}$	1,9
D.q - довжина 4-го пальця задньої кінцівки	$\frac{31,9 \pm 1,9}{29,7-35,8}$	3,3	$\frac{31,3 \pm 2,0}{23,6-40,9}$	5,7
L.t.ci. - найбільша довжина п'яtkового горбика в його основі	$\frac{3,9 \pm 0,2}{3,6-4,3}$	0,3	$\frac{4,1 \pm 0,23}{3,24-5,37}$	0,8
A.t.ci. - найбільша висота п'яtkового горбика	$\frac{1,6 \pm 0,3}{1,0-2,1}$	0,5	$\frac{1,5 \pm 0,1}{1,1-2,1}$	0,4

Видова приналежність жаб роду *Pelophylax* досліджуваної популяції

Комплекс зелених жаб (*Pelophylax esculentus complex*), поширений в Україні та Європі, є унікальним гібридогенним комплексом. До нього входять два батьківські види – озерна *Pelophylax ridibundus* та ставкова *Pelophylax lessonae* жаби. В результаті їх схрещування утворився природний гібрид – жаба істівна *Pelophylax esculentus*. Ці види важко ідентифікувати за морфологією, оскільки вони мають високу мінливість забарвлення та розмірів, можуть утворювати змішані популяції. Для точності ідентифікації зазвичай використовують генетичний аналіз.

В цій роботі ми не робили генетичного аналізу. Тому припустити, хто з цих видів мешкає на даній території, можемо за використаними морфологічними ознаками.

Зелені жаби роду *Pelophylax* досліджуваної території мають середні та великі розміри тіла (самці: L = 62,7-84 мм; самиці: L = 59,7-101,2 мм) та низький внутрішній п'яtkовий горбик. У більшості особин у забарвленні спинної частини тулуба переважають коричневі відтінки, рідше зустрічаються зеленуваті. Більш ніж у половини спійманих тварин у візерунку спини була наявна поперемінна світла смуга та у всіх особин - округлі темні плями здебільшого великого, а також середнього та дрібного розміру. Спинно-бічні складки були притаманні більшій частині спійманих особин. Всі досліджені тварини мають мармурове забарвлення черева та горла. Самці мають темно-сірі резонатори та темно-сірі шлюбні мозолі.

Таким чином, за показниками морфометричних параметрів, забарвлення тіла, малюнку спини, черева та горла, за кольором резонаторів та шлюбних мозолів у самців, представники досліджуваної популяції, більш за все, належать до виду жаба озерна *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771).

Порушення розвитку та захворювання

Під час зняття промірів жаб були виявлені особини, які мали вади.

Однією з таких вад були механічні пошкодження – подряпини та розриви шкіри – які могли бути спричинені як нападом на тварину хижаків, так і порізom об розбите скло або інші гострі предмети (бляшанки, скло, металеві дроти та інше сміття). Серед усіх вилвлених тварин з такою вагою була помічена одна особина (9,1 %) (рис. 7).

У однієї особини (9,1 %) була виявлена ектромелія – відсутність частини кінцівки (в даному випадку – лівої задньої кінцівки) (рис. 8). Така аномалія спостерігалася раніше на території України в озерних жаб у Запорізькій області (Mykutytnets, Suriadna, 2008), джерелянки жовточеревої *B. variegata* в Закарпатській області (Marushchak, Muravynets, 2018). Така аномалія може викликатися дією трематод, церкарії яких могли бути проковтнуті пуголовками жаб (Henle et al., 2017). Крім цього, встановлено, що кількість аномалій статистично значущо корелює з антропогенним впливом (Tytar et al., 2018).

Така вада, як виразки на шкірі кінцівок, була присутня у 25 % самиць, а у самців не зустрічалася (рис. 9).



Рис. 7. Механічне пошкодження шкіри та травма щелепи *P. ridibundus* урочища Кордівка (р. Десна, Чернігів)



Рис. 8. Ектромелія – відсутність частини кінцівки *P. ridibundus* урочища Кордівка (р. Десна, Чернігів)



А



Б

Рис. 9. Виразки на шкірі кінцівок *P. ridibundus*. А – урочище Кордівка, р. Десна, Чернігів, 2008 рік; Б – урочище Кордівка, р. Десна, Чернігів, 2023 рік

Уперше на досліджуваній території тварини з такими виразками були зафіксовані ще у 2008 році. Спеціальних досліджень тоді не проводилося, але було помічено, що уражені тварини були виснаженими та у них були відсутні спинно-мозкові рефлексії. Можливою причиною такого ураження може бути дія гриба *Batrachochytrium dendrobatidis* (Jakobik et al., 2024).

Стандартизація та геопросторова фіксація маршрутів є важливою складовою розвитку довготривалого моніторингу біорізноманіття. Для окремих груп, зокрема птахів і денних метеликів, підходи до організації систематичних спостережень і стандартизованих обліків уже активно розвиваються, тоді як для земноводних в Україні формування подібної системи перебуває на початковому етапі. У цьому контексті створення та збереження геопросторово прив'язаних маршрутів уже під час локальних досліджень може стати практичним початком формування мережі стандартизованих маршрутів моніторингу земноводних. Особливого значення такий підхід набуває в сучасних умовах, коли через воєнні дії польові дослідження можуть бути нерегулярними, окремі території – тимчасово недоступними, а продовження спостережень у майбутньому здійснюватиметься іншими дослідниками.

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.

Висновки

Зелені жаби роду *Pelophylax* прибережної зони урочища Кордівка м. Чернігів, з високою вірогідністю, належать до виду жаба озерна *P. ridibundus*.

У 9,1 % особин досліджуваної популяції виявлені механічні пошкодження у вигляді подряпин та розривів шкіри, що може бути наслідками нападу хижаків, або пораненням об гострі предмети.

Ектромелія виявлена також у 9,1 % особин, що може бути спричинено ураженням трематодами.

Виразки на шкірі кінцівок зустрічалася у 25 % самиць, але не зустрічалася у самців. Такі виразки, ймовірно, можуть бути викликані дією гриба *B. dendrobatidis*.

Оцифрування та збереження маршруту обліку у форматі KML забезпечує його точну просторову прив'язку та можливість проведення повторних обстежень на тій самій ділянці. Доступність геопросторового представлення маршруту дає змогу продовжувати дослідження не лише авторам цієї роботи, а й іншим дослідникам, зберігаючи просторову зіставність отриманих даних. Це особливо важливо за умов можливих перерв у польових роботах, обмеженої доступності територій та інших ризиків, пов'язаних із військовими діями.

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

Classification of vegetation and biotopes of Ukraine: the Third Ukrainian Scientific-theoretical Conference proceedings (Kyiv, 19–21th of April, 2018) / Eds. Ya.P. Didukh, D.V. Dubyna. Kyiv, 2018. https://www.botany.kiev.ua/doc/conf_geobot_2020_zb.pdf (in Ukrainian)

Класифікація рослинності та біотопів України: матеріали третьої науково-теоретичної конференції (Київ, 19–21 квітня 2018 р.) / За редакцією Я.П. Дідуха, Д.В. Дубини. Київ, 2018. 188 с.

Henle, K., Dubois, A., & Vershinin, V. (2017). Commented glossary, terminology and synonymies of anomalies in natural populations of amphibians. *Mertensiella*, 25, 9-48. https://www.researchgate.net/publication/319873165_Mertensiella_Studies_on_Anomalies_in_Natural_Populations_of_Amphibians_Untersuchungen_zu_Anomalien_in_natuerlichen_Populationen_von_Amphibien_Commented_glossary_terminology_and_synonymies_of_anomalies

Jakóbk, J., Drohvalenko, M., Fernandez Melendez, E., Кєра, Е., Klynova, O., Fedorova, A., Korshunov, O., Marushchak, O., Nekrasova, O., Suriadna, N., Smirnov, N., Tkachenko, O., Tupikov, A., Dufresnes, Ch., Zinenko, O., & Pabijan M. (2024). Countrywide screening supports model-based predictions of the distribution of *Batrachochytrium dendrobatidis* in Ukraine. *Diseases of aquatic organisms*, 159, 15–27. <https://doi.org/10.3354/dao>

Kurtyak, F. (2010). Anomalies of development of faintnesses in unisex hybrid populations *Pelophylax klepton esculenta* (Linnaeus, 1758) (Amphibia, Anura, Ranidae) in the Transcarpathians Lowland. *Sci. Bull. Uzhgorod Univ. (Ser. Biol.)*, 28, 132-134. https://www.researchgate.net/publication/283566569_Fedir_Kurtyak_Anomalies_of_Pelophylax_klepton_esculenta_Linnaeus_1758_Amphibia_Anura_Ranidae_from_the_territories_of_Transcarpathia_Scientific_Bulletin_of_the_Uzhgorod_University_Series_Biology_-_2010 (in Ukrainian)

Куртяк Ф.Ф. Аномалії розвитку *Pelophylax klepton esculenta* (Linnaeus, 1758) (Amphibia, Anura, Ranidae) з теренів Закарпаття. *Науковий вісник Ужгородського університету Серія Біологія*. 2010. Вип. 28. С. 132–134

Lukash, O., & Dan'ko, H. (2018). Geobotanical characteristic vegetation of the floristic complex on artificial deposits of sands at the southeast end of the Chernihiv. *Problems of ecology and the evolution of ecosystems in a changing environment: Collection. of science works* (Chernihiv, Desnianske, October 11–12, 2018). Chernihiv: Desna-Polihrat. P. 89-94. https://www.ienas.org/site/assets/files/3734/the_problems_of_ecology_and_evolution_of_ecosystems (in Ukrainian)

Лукаш О., Данько Г. Геоботанічна характеристика рослинності штучного піщаного наміву на південно-східній околиці м. Чернігова (район «Лісковиця»). *Проблеми екології та еволюції екосистем в умовах трансформованого середовища*: Збірн. матеріалів наукових праць II Міжнародної науково-практичної конференції (Чернігів, Деснянське, 11–12 жовтня 2018 р.). Чернігів: Десна-Поліграф. 2018. С. 89-94.

Marushchak, O., & Muravynets, O. (2018). Morphological abnormalities in tailless amphibians (Amphibia, Anura) in Ukraine. *Geo&Bio*, 16, 76–82. <https://doi.org/10.15407/gb.2018.16.076>
Meteyer, C.U. (2000). Field guide to malformations of frogs and toads: with radiographic interpretations. *Biological science report*, 1081-292X, USGS/BRD/BSR-2000-0005. <https://catalogue.nla.gov.au/catalog/3849961>

Mykitynets, G., & Suriadna, N. (2008) Anomalies and morphological features of the lake frog (*Pelophylax ridibundus*) in the area of the Zaporozhia Region. *Journal of Zaporizhzhia National University. Biological Sciences*, 1, 170–175. <https://files.znu.edu.ua/files/Fakhovivydannya/vznu/biologichni/vestnikbiol2008v1.pdf> (in Ukrainian)

Микитинець Г. І., Суриадна Н. М. Аномалії та морфологічна специфіка озерних жаб (*Pelophylax ridibundus*) у межах Запорізької області. *Вісник Запорізького національного університету. Біологічні науки*. 2008. № 1. С. 170–175.

National Habitat Catalogue of Ukraine / Eds. A.A. Kuzemko, Y.P. Didukha, V.A. Onyshchenko and Y. Sheffer. Y.Y. Klymenko Sole Trader, 2018. https://www.researchgate.net/publication/331936278_NATIONAL_HABITAT_CATALOGUE_OF_UKRAINE_high_resolution (in Ukrainian)

Національний каталог біотопів України. За ред. А.А. Куземко, Я.П. Дідуха, В.А. Онищенко, Я. Шеффера. Київ: ФОП Клименко Ю.Я., 2018. 442 с.

Nekrasova, O.D. (2013). Herpetofauna of the Pryingul Regional Landscape Park. *Ecology of wetlands and peatlands (articles of scientific): Collection. of science works*. Kyiv. https://www.researchgate.net/publication/290430449_GERPETOFAUNA_PRIINGULSKOGO_REGIONALNOGO_LANDSAFTNOGO_PARKU (in Ukrainian)

Некрасова О.Д. Герпетофауна Приінгульського регіонального ландшафтного парку. *Екологія водно-болотних угідь і торфовищ: Збірник наукових статей*. Київ: ДІА, 2013. С. 200-205.

Pysanets, Y. (2007). The Amphibians of Ukraine: A guide to the amphibians of Ukraine and neighbouring countries. Rayevsky scientific publishers. https://museumkiev.org/upload/zoo/Amphibia_in_Ukraine_ukr.pdf (in Ukrainian)

Писанець Є.М. Земноводні України: посібник для визначення амфібій України та суміжних країн. Київ: Вид-во Раєвського, 2007. 192 с.

Stakh, V., & Khamar I. (2014). Morphological Changeability of Green Frogs (*Pelophylax*) in the Basins of Lviv Region and Shatsk National Natural Park. *The Nature of Western Polissya and Adjacent Areas. CHAPTER II. Biology*, 11, 296–301. <https://evnuir.vnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/bdc07e73-4871-4183-ab0d-3e26480fdd6a/content> (in Ukrainian)

Стах В.О., Хамар І.С. Морфологічна мінливість зелених жаб (*Pelophylax*) водойм Львівської області та Шацького національного природного парку. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій. РОЗДІЛ II. Біологія*. 2014. № 11, С. 296-301.

Suryadna, N. (2005). Green frogs of Ukrainian fauna: morphological variability, karyology and peculiarities of biology. Abstract of a thesis for the award of the degree of Candidate of Biological Sciences / N.M. Suryadna. Kyiv. 20 pp. https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_zool/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=ZOOL&P21DBN=ZOOL&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullw&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=3&S21P02=0&S21P03=K=&S21STR=variability (in Ukrainian)

Суриадна Н.М. Зелені жаби фауни України: морфологічна мінливість, каріологія та особливості біології: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук / Н.М.Суриадна. Київ, 2005. 20 с.

Tytar, V. M., Nekrasova, O. D., & Marushchak, A. Y. (2018). Ecological and Geographical GIS-Analysis of Anomalies in Amphibians of Ukraine. *KnE Life Sciences*, 4(3), 42–48. <https://doi.org/10.18502/cls.v4i3.2101>

Received: 29.06.2026. Accepted: 12.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Ткаченко О., Лимар А. Морфологічні особливості жаб роду *Pelophylax* прибережної смуги р. Десна. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 106-118. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.8>

Cite this article in APA style as:

Tkachenko, O., & Lyman, A. (2026). Morfologichni osoblyvosti zhab rodu *Pelophylax* pryberezhnoi smuhy r. Desna [Morphological characteristics of frogs of the genus *Pelophylax* in the riverbank zone of the Desna River]. *Biota. Human. Technology*. (2), 106-118. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.8> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Tkachenko O. [in Ukrainian: **Ткаченко О.**] ¹, Cand. Sc. (Biol.), email: oksana62tkachenko@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9333-9748 ResearcherID: AAC-9173-2021
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Lyman A. [in Ukrainian: **Лимар А.**] ², Senior Laboratory Assistant, email: koltasheva01an25@gmail.com
ORCID: 0009-0000-5596-3152
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, manuscript preparation.



MICROBIOTA

МІКРОБІОТА



UDC 620.193.8:547.831:669.14

DOI: 10.58407/bht.2.26.9



Copyright (c) 2026 Nataliia Demchenko, 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/).

Наталія Демченко, Світлана Ткаченко

АНТИМІКРОБНА ТА АНТИКОРОЗІЙНА АКТИВНОСТІ ЧЕТВЕРТИННИХ СОЛЕЙ ХІНОЛІНІЮ ТА ІМІДАЗО[1,2-а]ХІНОЛІНІЮ



Nataliia Demchenko, Svitlana Tkachenko

ANTIMICROBIAL AND ANTICORROSIVE ACTIVITIES OF QUATERNARY QUINOLINIUM AND IMIDAZO[1,2-a] QUINOLINIUM SALTS

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідити антимікробну та антикорозійну активності четвертинних солей хінолінію та імідазо[1,2-а]хінолінію за умов мікробної корозії сталі, індукованої сульфатвідновлювальними бактеріями *Desulfovibrio* sp.

Методологія. Проведено експериментальне вивчення антимікробної та антикорозійної активностей четвертинних солей хінолінію та імідазо[1,2-а]хінолінію загальноприйнятими мікробіологічними та корозійними методами. Визначено біоцидну активність похідних бромідів хінолінію та імідазохінолінію щодо штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1. Досліджено інгібіторні властивості четвертинних солей імідазо[1,2-а]хінолінію за умов мікробної корозії сталі. Антимікробну та антикорозійну активності оцінено із врахуванням будови молекул четвертинних солей.

Наукова новизна. Вперше проведено порівняльне дослідження антимікробних властивостей похідних ряду бромідів хінолінію та імідазо[1,2-а]хінолінію. Природа та положення замісників у фенільному фрагменті молекул досліджених гетероциклічних систем суттєво впливають на їхню антибактеріальну дію. Встановлено, що анелювання імідазольного кільця до хінолінового ядра суттєво посилює антимікробну та антикорозійну активності сполук. Четвертинні солі імідазо[1,2-а]хінолінію проявляють одночасно біоцидну та захисну дії за умов мікробної корозії сталі.

Висновки. Четвертинні солі хінолінію та імідазо[1,2-а]хінолінію виявляють антимікробну активність щодо сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfovibrio* sp. Біоцидна дія солей хінолінію визначається електронною природою замісника у фенацильному фрагменті: введення електроноакцепторних груп підвищує пригнічення бактерій. Анелювання імідазольного кільця до хінолінового ядра (четвертинні солі імідазо[1,2-а]хінолінію) призводить до посилення антимікробної дії. Четвертинні солі імідазохінолінію проявляють високу антикорозійну активність (захисний ефект становить до 92,4 %). Це дозволяє рекомендувати речовини цього ряду як високоефективні інгібітори з біоцидною дією для захисту сталі від мікробної корозії.

Ключові слова: сульфатвідновлювальні бактерії, штам *Desulfovibrio* sp. M-4.1, четвертинні солі хінолінію та імідазохінолінію, мікробна корозія сталі

ABSTRACT

Purpose of the work. The aim of this study was to investigate the antimicrobial and anticorrosive activities of quaternary quinolinium and imidazo[1,2-a]quinolinium salts under conditions of microbial steel corrosion induced by sulfate-reducing bacteria *Desulfovibrio* sp.

Methodology. An experimental study of the antimicrobial and anticorrosive activities of quaternary quinolinium and imidazo[1,2-a]quinolinium salts was performed using conventional microbiological and corrosion methods. The biocidal activity of quinolinium and imidazoquinolinium bromide derivatives against strain *Desulfovibrio* sp. M-4.1 was determined. Furthermore, the inhibitory properties of quaternary imidazo[1,2-a]quinolinium salts under conditions of microbial steel corrosion were investigated. The antimicrobial and anticorrosive activities were evaluated taking into account the molecular structure of the quaternary salts.

Scientific novelty. A comparative study of the antimicrobial properties of a series of quinolinium and imidazo[1,2-a]quinolinium bromide derivatives has been conducted for the first time. The nature and position of the substituents in the phenyl fragment of the molecules of the studied heterocyclic systems significantly affect their antibacterial activity. It has been established

that the annulation of the imidazole ring to the quinoline nucleus significantly enhances the antimicrobial and anticorrosive activity of the compounds. Quaternary imidazo[1,2-a]quinolinium salts exhibit simultaneous biocidal and inhibitory effects under conditions of microbial corrosion of steel.

Conclusions. Quaternary quinolinium and imidazo[1,2-a]quinolinium salts exhibit antimicrobial activity against sulfate-reducing bacteria *Desulfovibrio* sp. The biocidal effect of quinolinium salts is determined by the electronic nature of the substituent in the phenacyl fragment: the introduction of electron-withdrawing groups increases the inhibition of bacteria. Annulation of the imidazole ring to the quinoline nucleus (quaternary imidazo[1,2-a]quinolinium salts) leads to enhanced antimicrobial activity. Quaternary imidazoquinolinium salts exhibit high anticorrosive activity (protective effect is up to 92.4 %). This allows recommending the substances of this series as highly effective inhibitors with biocidal action for protecting steel from microbial corrosion.

Key words: sulfate-reducing bacteria, strain *Desulfovibrio* sp. M-4.1, quaternary quinolinium and imidazoquinolinium salts, microbial corrosion of steel

Вступ

Проблема корозії металевих конструкцій залишається актуальною для багатьох галузей промисловості, зокрема нафтогазової, енергетичної, хімічної та будівельної. Значну частину економічних втрат спричиняє мікробна корозія, індукована сульфатвідновлювальними бактеріями, де ключову роль у руйнуванні металу відіграє сформована на його поверхні біоплівка. Саме тут мікроорганізми формують локальне мікросередовище та можуть впливати на електрохімічні реакції як через метаболіти, так і через механізми електронного обміну між мікроорганізмами та металом (Enning & Garrelfs, 2014; Wang et al., 2020; Khan et al., 2022; Liu et al., 2024).

Традиційні підходи до захисту металів від мікробної корозії базуються на застосуванні промислових інгібіторів-біоцидів (Purish et al., 2021; Shi et al., 2023; Koerdt et al., 2026). Проте більшість із них мають суттєві недоліки: високу токсичність для довкілля, швидке формування резистентності у мікроорганізмів та недостатню здатність проникати крізь захисний екзополісахаридний матрикс біоплівок. У зв'язку з цим актуальним завданням антикорозійного захисту є пошук високоефективних, малотоксичних та багатофункціональних інгібіторів, які здатні одночасно проявляти біоцидні та інгібіторні властивості.

Серед великого різноманіття органічних сполук перспективними інгібіторами з біоцидною дією є нітрогеновмісні гетероциклічні системи (Abd-Elal et al., 2014; Eduok et al., 2018; Demchenko et al., 2020; Singh et al.,

2023). Зокрема, похідні хіноліну привертають увагу дослідників як сполуки з біоцидною активністю та інгібітори (Matada et al., 2021; Verma & Quraishi, 2021; Singh et al., 2024; Chavan et al., 2025).

Модифікація хінолінового кільця шляхом аелювання імідазольного циклу в систему імідазохінолінію дозволяє отримати конденсовану систему, змінити електронну густину молекули та покращити її поверхнево-активні властивості, що потенційно підвищує як антимікробну, так і антикорозійну ефективності. Проте дослідження порівняльної антимікробної та антикорозійної активностей четвертинних солей хінолінію та імідазохінолінію в літературі представлені обмежено.

З огляду на це, актуальним є дослідження антимікробних та антикорозійних властивостей четвертинних солей хінолінію та імідазохінолінію, вибір ефективних біоцидів та визначення найбільш перспективних інгібіторів мікробної корозії сталі.

Матеріали та методи дослідження

Досліджували броміди 1-(4¹-R-фенацил)-хінолінію (рис.1, А) та броміди 2,3-діарил-4,5-дигідро-імідазо[1,2-а]хінолінію-3 (рис. 1, Б), що містять четвертинний Нітроген. Броміди хінолінію відрізняються замісниками в четвертому положенні фенацильного фрагмента, а імідазохінолінію містять конденсований імідазохінолінієвий цикл і арильні замісники за другим та третім положенням гетероциклічної системи. Склад та будову сполук підтверджено сучасними методами фізико-хімічного аналізу: методом ПМР-спектроскопії та мас-спектрометрії.

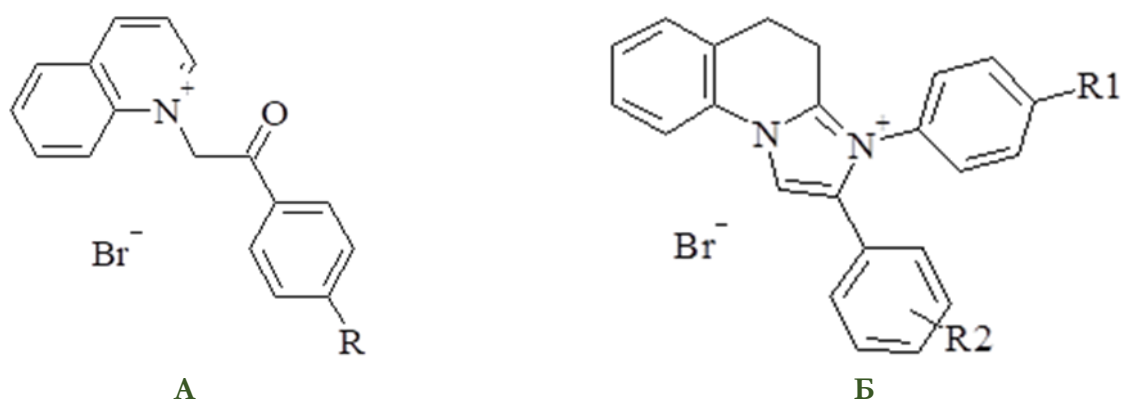


Рис. 1. Загальна формула. А – бромідів 1-(4¹-R-фенацил)-хінолінію (ЧСХ I – IV): I R= -CH₃, II R= -Br, III R= -NO₂, IV R= -OC₂H₅; Б - бромідів 2,3-діарил-4,5-дигідро-імідазо[1,2-а]хінолінію-3 (ЧСІХ I – V) I R1= -H, R2 = *пара*-CH₃, II R1= -OCH₃, R2 = *пара*-CH₃, III R1= -CH₃, R2 = *пара*-Br, IV R1= -CH₃, R2 = *пара*-OC₂H₅, V R1= -OCH₃, R2 = *пара*-Br

Для оцінки антимікробної активності бромідів хінолінію та імідазо[1,2-а]хінолінію щодо штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1 застосовували метод дифузії в агар. У попередньо підготовлені лунки в агаризованому поживному середовищі Постгейта «В», інокульованому сульфат-відновлювальними бактеріями *Desulfovibrio* sp., вносили спиртові розчини солей концентрацією 0,25 % та 1,0 %. Склад середовища Постгейта «В» описано в (Kushkevych et al., 2021). Анаеробні умови створювали за методом Штурм у модифікації Дуди (використання покривних скелець) (Volkogon et al., 2010). Герметизацію системи здійснювали шляхом заповнення простору між склом та чашкою стерильним 2,0 % агаром. Ефективність досліджуваних солей оцінювали за діаметром зони пригнічення росту бактерій. Штам *Desulfovibrio* sp. M-4.1 виділено нами із сульфідогенного природного угруповання феросфери та ідентифіковано молекулярно-біологічними методами (Demchenko et al., 2013).

Титр бактеріальних клітин у планктоні та біоплівці визначали методом граничних десятикратних розведень при висіві відповідної клітинної суспензії на рідке поживне середовище Постгейта «В» (Volkogon et al., 2010). Адгезовані до поверхні сталі клітини бактерій були зібрані у фіксований об'єм (40 мл) 0,1N фосфатного буфера (pH = 7) за допомогою ультразвуку з частотою 25 кГц (30 с) двічі з інтервалом 60 с, з використанням приладу УЗМ-

003/н. В суспензії визначали титр клітин та перераховували на площу зразка сталі.

Методом йодометричного титрування оцінювали концентрацію біогенного H₂S (Tsyhanok et al., 2014). Відносний ступінь впливу на сульфатредукцію бактерій розраховували за формулою:

$$S = ((C - C')/C) \times 100 \%,$$

де C' та C – середня концентрація сірководню в досліджуваній і контрольній пробі відповідно, мг/л.

Корозійні дослідження проводили на маловуглецевій конструкційній сталі СтЗпс наступного хімічного складу(масові частки): 99,094 % Fe, 0,19 % C, 0,07 % Si, 0,54 % Mn, 0,01 % Ni, 0,038 % S, 0,007 %P, 0,02 % Cr, 0,007 % N, 0,020 % Cu, 0,004 % As. Сталь СтЗпс застосовують для виготовлення будівельних металоконструкцій, зварних та незварних елементів, труб і деталей обладнання, що працюють під невеликими та середніми навантаженнями. За втратою маси зразків (розмір 50×18×1 мм) розраховували швидкість корозії ($K_m = \Delta m / (S \cdot \tau)$, де Δm - втрата маси (г), S - площа поверхні зразка (м²), τ - час експозиції в годинах, коефіцієнт її гальмування ($\gamma_m = K_m / K_m'$, де K_m та K_m' – швидкість корозії зразків без інгібітора та з ним (г/(м²·год)) та ефективність інгібування під час захисту ($IE_m = (1 - \gamma_m) \times 100\%$). Час експозиції зразків сталі у середовищі Постгейта «В» становив

336 год, концентрація речовин 0,5 г/л, температура культивування $28 \pm 2^\circ\text{C}$.

Статистичне опрацювання результатів експерименту проведено для рівня значущості 0,05 з врахуванням t-розподілення; повторність дослідів триразова. Відносна похибка не перевищує 10 %.

Результати дослідження та обговорення

Біоцидні властивості похідних четвертинних солей хінолінію та імідазохінолінію щодо штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1 наведено в таблиці 1.

Встановлено, що досліджені речовини проявляли біоцидні властивості щодо сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfovibrio* sp. за концентрацій 0,25 % та 1,0 %. При цьому найбільш негативний вплив на ріст бактерій виявлено для четвертинних солей імідазохінолінію, який зростав із підвищенням концентрації.

Так, за дії четвертинних солей хінолінію за концентрації 0,25 % діаметр зони пригнічення росту бактерій становив до 21,0 мм, а при 1,0 % – до 26,0 мм. Найбільшу антимікробну дію за концентрації 1,0 % виявляли сполуки ЧСХ II та ЧСХ III з електроноакцепторним замісником (-Br, та -NO₂ відповідно) в четвертому положенні фенацильного фрагмента. Введення зазначених замісників у структуру нітрогеновмісних гетероциклічних сполук підвищувало їхню токсичність для сульфатвідновлювальних бактерій. При цьому введення Брому підвищувало ліпофільність та здатність молекули проникати крізь мембрани сульфатвідновлювальних бактерій (Faleye et al., 2024), нітрогрупа часто піддається ферментативному відновленню всередині бактеріальної клітини з утворенням токсичних радикальних інтермедіатів, що руйнують ДНК бактерії (El-Atawy 2019).

Таблиця 1

Біоцидні властивості четвертинних солей хінолінію та імідазохінолінію щодо штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1 ($M \pm m$)

Умове позначення речовини	Діаметри зон пригнічення росту бактерій (мм) за відповідної концентрації речовин	
	0,25 %	1,0 %
броміди 1-(4 ¹ -R-фенацил)-хінолінію		
ЧСХ I	15,0 $\pm$ 0,5	21,7 $\pm$ 1,7
ЧСХ II	14,8 $\pm$ 0,8	25,0 $\pm$ 1,9
ЧСХ III	21,0 $\pm$ 1,6	26,0 $\pm$ 1,3
ЧСХ IV	20,0 $\pm$ 1,2	20,0 $\pm$ 1,6
броміди 2,3-діарил-4,5-дигідро-імідазо[1,2-а]хінолінію-3		
ЧСІХ I	24,7 $\pm$ 1,7	34,5 $\pm$ 2,3
ЧСІХ II	27,3 $\pm$ 1,2	36,7 $\pm$ 1,8
ЧСІХ III	33,3 $\pm$ 1,7	45,5 $\pm$ 3,4
ЧСІХ IV	27,2 $\pm$ 1,2	38,2 $\pm$ 1,6
ЧСІХ V	30,0 $\pm$ 1,1	38,7 $\pm$ 1,8

Сульфатвідновлювальні бактерії виявили чутливість щодо дії бромідів 2,3-діарил-4,5-дигідро-імідазо[1,2-а]хінолінію-3. Діаметри зон пригнічення росту бактерій становили до 45,5 мм за концентрації 1,0 %.

Біоцидна дія солей ЧСІХ I та ЧСІХ II за концентрації 1,0 % виявилась подібною: діаметри зон затримки росту становили до

36,7 мм (табл. 1). Така близькість результатів очевидно обумовлена подібністю їхньої хімічної будови. У структурі обидвох молекул є однаковий *пара*-метилфенільний замісник у положенні 2, тоді як у положенні 3 знаходяться незаміщена фенільна (ЧСІХ II) та *пара*-метоксифенільна (ЧСІХ I) групи відповідно.

Схожа тенденція спостерігалась і при аналізі активікробних властивостей щодо сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfovibrio* sp. сполук ЧСІХ IV та ЧСІХ V, для яких зони пригнічення росту бактерій становили 38,2 мм та 38,7 мм відповідно. Схожа чутливість сульфатвідновлювальних бактерій до цих речовин свідчить про те, що зміна взаємного розташування замісників у положеннях 2 та 3 (*para*-етоксифенільного та *para*-метилфенільного для ЧСІХ IV порівняно з *para*-бромфенільним та *para*-етоксифенільним для ЧСІХ V) суттєво не порушує загальний гідрофобно-ліпофільний баланс, необхідний для проявлення бактеріцидних властивостей.

Максимальний біоцидний ефект щодо штаму *Desulfovibrio* sp. М-4.1 зафіксовано для сполуки ЧСІХ III, яка містить електроно-акцепторний *para*-бромфенільний замісник та *para*-метилфенільну групу в положенні 2 та 3 гетероциклічної системи, відповідно.

Ймовірно, наявність атомів Брому забезпечувало зростання біоцидної активності за рахунок «галогенового ефекту» (Faleye et al., 2024), який підвищував проникність катіона крізь мембранні структури мікроорганізмів та призводило до пригнічення функціонування сульфатвідновлювальних бактерій. Це узгоджується як для сполук ряду четвертинних солей хінолінію, так і імідазохінолінію. Характер і

положення замісників у фенільному заміснику четвертинних солей імідазохінолінію суттєво впливали на їхню антибактеріальну дію.

Сульфатвідновлювальні бактерії *Desulfovibrio* sp. виявили більшу чутливість щодо речовин ряду четвертинних солей імідазохінолінію, ніж сполук ряду четвертинних солей хінолінію. Це свідчить про перспективність їх дослідження як інгібіторів мікробної корозії сталі, індукованої сульфатвідновлювальними бактеріями *Desulfovibrio* sp.

Так, за дії досліджуваних бромідів 2,3-діарил-4,5-дигідро-імідазо[1,2-а]хінолінію-3 клітин мікроорганізмів у бактеріопланктоні не виявлялось. При цьому у контролі їх чисельність досягала 10^8 кл/мл.

Враховуючи те, що основні процеси біокорозії відбуваються в біоплівці, утвореній на поверхні металу, було визначено чисельність прикріплених клітин сульфатвідновлювальних бактерій до поверхні металевого зразка.

За присутності досліджених речовин бактерії штаму *Desulfovibrio* sp. М 4.1 формували слабку за чисельністю клітин біоплівку порівняно з контролем (рис. 2). У біоплівці за присутності досліджуваних четвертинних солей імідазохінолінію, кількість клітин менша у 10^6 – 10^8 разів порівняно з контролем.

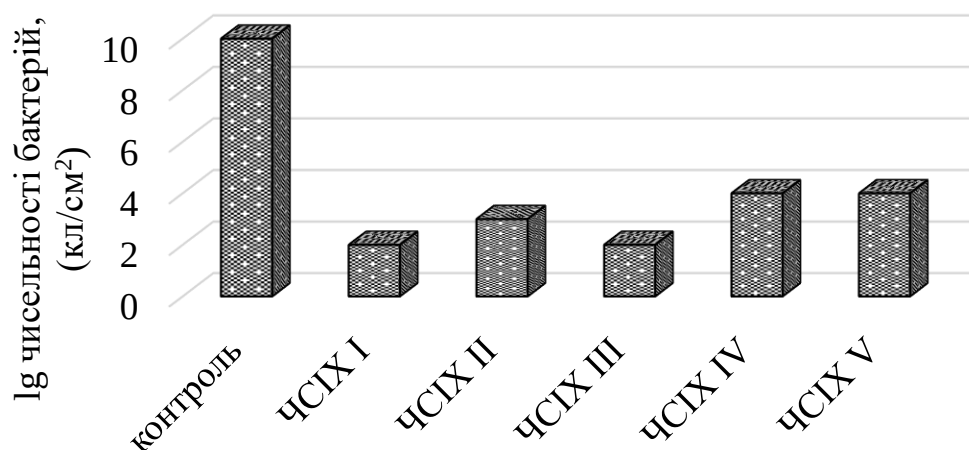


Рис. 2. Кількість клітин сульфатвідновлювальних бактерій штаму *Desulfovibrio* sp. М 4.1 у біоплівці за дії бромідів 2,3-діарил-4,5-дигідро-імідазо[1,2-а]хінолінію-3

Найменшу кількість (10^2 кл/см²) сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfovibrio* sp. у біоплівці було виявлено за присутності ЧСІХ I та ЧСІХ III, що корелює із значними

біоцидними властивостями сполук (таблиця 1).

У ході дослідження було встановлено вплив четвертинних солей імідазохінолінію

на процес мікробної корозії сталі СтЗпс, індукованої сульфатвідновлювальними бактеріями *Desulfovibrio* sp. (табл.2).

Швидкість корозії сталі зменшувалась у 6,5 разів за присутності інгібіторів ЧСІХ I та ЧСІХ IV. За дії ЧСІХ III та ЧСІХ VI швидкість корозії сталі знижувалась у 8,1 рази та у 8,7 разів, що забезпечувало захисний ефект 87,7 % та 88,5 % відповідно.

Більш ефективним інгібітором мікробної корозії серед досліджених сполук виявилася речовина ЧСІХ II: швидкість

корозії зменшувалась у 13,0 разів, що забезпечувало захисний ефект 92,4 % (табл. 2). Встановлено, що за присутності четвертинних солей імідазохінолінію за умов біокорозії сталі продукування сірководню бактеріями штаму *Desulfovibrio* sp. М 4.1 пригнічувалось: концентрація біогенного сірководню зменшувалась в 7,2–9,9 разів порівняно з контролем. Відносний ступінь впливу досліджених речовин становив до 91,6 %.

Таблиця 2

Показники мікробної корозії сталі за присутності бромідів 2,3-діарил-4,5-дигідро-імідазо[1,2-а]хінолінію-3

Умовне позначення речовини	Показники		
	γ_m	ІЕ _m , %	S, %
ЧСІХ I	6,5	84,6	88,8
ЧСІХ II	13,0	92,4	86,1
ЧСІХ III	8,7	88,5	91,6
ЧСІХ IV	6,5	84,6	89,9
ЧСІХ V	8,1	87,7	89,5

Отже, четвертинні солі імідазохінолінію за умов біокорозії повністю пригнічували розвиток штаму *Desulfovibrio* sp. М 4.1 у бактеріопланктоні та знижували чисельність бактерій у біоплівці, що формувалась на поверхні зразка сталі: кількість клітин зменшувалась у 10^6 – 10^8 разів порівняно з контролем. Четвертинні солі імідазохінолінію виявляли властивості інгібіторів мікробної корозії сталі, індукованої сульфатвідновлювальними бактеріями *Desulfovibrio* sp. (захисний ефект становив до 92,4 %). Найбільшу захисну дію проявляв бромід 2-(пара-толіл)-3-(4¹-метоксіфеніл)-4,5-дигідро-імідазо[1,2-а]хінолінію (ЧСІХ II), це, напевно, обумовлено поєднанням електронно-донорних замісників у структурі молекули, що і призводило до зростання її адсорбційної здатності на поверхні металу.

Зіставлення одержаних експериментальних даних із літературними показниками ефективності інших інгібіторів мікробної корозії свідчить про суттєві переваги четвертинних солей імідазохінолінію (Abd-Elaal et al., 2014; Eduok et al.,

2018, Singh et al., 2023). Більшість промислових інгібіторів виявляли захисний ефект (до 88,0 %) лише при комбінуванні з біоцидами щодо корозійно-активних бактерій. Натомість досліджувані броміди імідазохінолінію поєднують у своїй структурі анельоване імідазольне кільце, що забезпечує подвійний механізм дії. Захисний ефект становив до 92,4 %, що перевищує показники як вихідних солей хінолінію, так і більшості відомих нітрогеновмісних гетероциклічних аналогів. Це підтверджує високий потенціал бромідів імідазохінолінію як багатофункціональних інгібіторів-біоцидів.

Висновки

Встановлено, що похідні четвертинних солей хінолінію та імідазо[1,2-а]хінолінію проявляли високу антимікробну активність щодо сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfovibrio* sp. за концентрацій розчинів 0,25 % та 1,0 %, яка зростала зі збільшенням концентрації.

Природа замісника в пара-положенні фенільного кільця фенацильного фрагмента бромідів 1-(4¹-R-фенацил)-хінолінію була

визначальним фактором токсичності щодо сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfovibrio* sp. Електроноакцепторні замісники (-NO₂, -Br) суттєво інтенсифікували антимікробну дію четвертинних солей хінолонію, забезпечуючи максимальні діаметри зон пригнічення росту бактерій у низці досліджених похідних хінолонію за концентрації 1,0 % (25,0 мм та 26,0 мм для ЧСХ II та ЧСХ III відповідно).

Анелювання імідазольного кільця до хінолінового ядра суттєво посилювало антимікробну дію четвертинних солей імідазо[1,2-а]хінолінію: за концентрації 1,0 % діаметр зон пригнічення росту бактерій становив до 45,5 мм. Це значно перевищує ефективність солей ряду

хінолінію і дозволяє рекомендувати конденсовану імідазохінолінієву систему як перспективну платформу для створення ефективних біоцидів.

Встановлено, що четвертинні солі імідазо[1,2-а]хінолінію знижували чисельність клітин штаму *Desulfovibrio* sp. М 4.1 в бактеріопланктоні та біоплівці за умов мікробної корозії сталі. Найбільший захисний ефект 92,4 % проявляв бромід 2-(*para*-толіл)-3-(4¹-метоксіфеніл)-4,5-дігідро-імідазо[1,2-а]хінолінію (ЧСХ II). Це робить броміди імідазо[1,2-а]хінолінію перспективними багатофункціональними інгібіторами (інгібітори-біоциди) для захисту конструкційних матеріалів від мікробної корозії.

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-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Abd-Elaal, A. A., Aiad, I., Shaban, S. M., Tawfik, S. M., & Sayed, A. (2014). Synthesis and evaluation of some triazole derivatives as corrosion inhibitors and biocides. *Journal of Surfactants and Detergents*, 17(3), 483–491. <https://doi.org/10.1007/s11743-013-1547-0>

Alimov, V. I., & Duriagina, Z. A. (2012). *Corrosion and protection of metals from corrosion*. Skhidnyi Vydavnychiy Dim. 328 p. (in Ukrainian).

Алімов В. І., Дурягіна З. А. Корозія та захист металів від корозії : навч. посіб. Донецьк ; Львів : Східний видавничий дім, 2012. 328 с.

Chavan, N. D., Sarveswari, S., & Vijayakumar, V. (2025). Quinoline derivatives' biological interest for anti-malarial and anti-cancer activities: An overview. *RSC Advances*, 15(36), 25345–25360. <https://doi.org/10.1039/d5ra00534e>

Demchenko, N., Tkachenko, S., & Demchenko, S. (2020). Synthesis, antibacterial and anti-corrosive activity of 2,3-dihydroimidazo[1,2-a]pyridinium bromides. *Chemistry & Chemical Technology*, 14(3), 327–333. <https://doi.org/10.23939/chcht14.03.327>

Demchenko, N. V., Kurmakova, I. M., & Tretyak, O. P. (2013). Features of corrosion activity of microbial communities of gas-pipeline ferrosphere laid in sandy soil. *Microbiology and Biotechnology*, (4), 90–97. <http://erpub.chnpu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/6090>. (in Ukrainian).

Демченко Н.М., Курмакова І.М., Третяк О.П. Особливості корозійної активності мікробних спільнот феросфери газопроводу в піщаному ґрунті. *Мікробіологія і біотехнологія*. 2013. № 4. С. 90–97. <http://erpub.chnpu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/6090>

Eduok, U., Faye, O., & Szpunar, J. (2018). Effect of benzothiazole biocide on SRB-induced biocorrosion of hot-dip galvanized steel. *Engineering Failure Analysis*, 93, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.07.008>

El-Atawy, M. A., Hamed, E. A., Alhadi, M., & Omar, A. Z. (2019). Synthesis and antimicrobial activity of some new substituted quinoxalines. *Molecules*, 24(22), Article 4198. <https://doi.org/10.3390/molecules24224198>

Enning, D., & Garrelfs, J. (2014). Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: New views of an old problem. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(4), 1226–1236. <https://doi.org/10.1128/AEM.02848-13>

Faleye, O. S., Boya, B. R., Lee, J.-H., Choi, I., & Lee, J. (2024). Halogenated antimicrobial agents to combat drug-resistant pathogens. *Pharmacological Reviews*, 76(1), 90–141. <https://doi.org/10.1124/pharmrev.123.000863>

Khan, M. S., Liang, T., Liu, Y., Shi, Y., Zhang, H., Li, H., Guo, S., Pan, H., Yang, K., & Zhao, Y. (2022). Microbiologically influenced corrosion mechanism of ferrous alloys in marine environment. *Metals*, 12(9), Article 1458. <https://doi.org/10.3390/met12091458>

Koerdt, A., Knisz, J., Wade, S., & Silva, E. R. (Eds.). (2026). Microbiologically influenced corrosion: A comprehensive guide to principles, assessment and mitigation (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781032708010>

Kushkevych, I., Kovářová, A., Dordevic, D., Gaine, J., Kollar, P., Vítězová, M., Rittmann, S.K.-M.R. (2021). Distribution of Sulfate-Reducing Bacteria in the Environment: Cryopreservation Techniques and Their Potential Storage Application. *Processes*, 9, 1843. <https://doi.org/10.3390/pr9101843>

Liu, N., Qiu, L., & Qiu, L. (2024). Carbon steel corrosion induced by sulfate-reducing bacteria: A review of electrochemical mechanisms and pathways in biofilms. *Coatings*, 14(9), Article 1105. <https://doi.org/10.3390/coatings14091105>

Matada, B. S. M., Pattanashettar, R., & Yernale, N. G. (2021). A comprehensive review on the biological interest of quinoline and its derivatives. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 32, Article 115973. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2020.115973>

Purish, L. M., Abdulina, D. R., & Iutynska, G. O. (2021). Inhibitors of corrosion induced by sulfate-reducing bacteria. *Mikrobiolohichniy Zhurnal*, 83(6), 95–109. <https://doi.org/10.15407/microbiolj83.06.095>

Shi, X., Zhang, R., Sand, W., Mathivanan, K., Zhang, Y., Wang, N., Duan, J., & Hou, B. (2023). Comprehensive review on the use of biocides in microbiologically influenced corrosion. *Microorganisms*, 11(9), Article 2194. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092194>

Singh, A., Ansari, K. R., Ali, I. H., Sharma, N. R., Bansal, A., Alanazi, A. K., & Noureldeen, A. (2023). Corrosion and bacterial growth inhibition by amino acid functionalized pyridine derivative at P110 steel/oil formation water interface: Experimental, surface and molecular docking investigations. *Journal of Molecular Liquids*, 391, Article 123305. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123305>

Singh, V. K., Kumari, P., Som, A., Rai, S., Mishra, R., & Singh, R. K. (2024). Design, synthesis and antimicrobial activity of novel quinoline derivatives: An in silico and in vitro study. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 42(13), 6904–6924. <https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2236716>

Tsyhanok, L. P., Bubel, T. O., Vishnikin, A. B., & Vashkevych, O. Y. (2014). *Analytical chemistry. Chemical methods of analysis* (L. P. Tsyhanok, Ed.). Oles Honchar Dnipropetrovsk National University. 252 p. (in Ukrainian). https://library.dnu.dp.ua/Metodichki/analit_chimija.pdf

Циганок Л. П., Бубель Т. О., Вишнікін А. Б., Вашкевич О. Ю. Аналітична хімія. Хімічні методи аналізу : навч. посіб. / за ред. Л. П. Циганок. Дніпропетровськ : ДНУ ім. О. Гончара, 2014. 252 с. https://library.dnu.dp.ua/Metodichki/analit_chimija.pdf

Verma, C., & Quraishi, M. A. (2021). Quinoline and its derivatives as corrosion inhibitors. In *Organic Corrosion Inhibitors: Synthesis, Characterization, and Applications* (pp. 149–165). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119794516.ch8>

Volkogon, V.V., Nadkernychna, O.V., Tokma-kova, L.M. et al. (2010). *Experimental Soil Microbiology*. (V. V. Volkogon, Ed.). Agrarian Science. (in Ukrainian).

Волкогон В. В., Надкернична О. В., Токмакова Л. М. та ін. Експериментальна ґрунтова мікробіологія / за ред. В. В. Волкогона. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.

Wang, D., Liu, J., Jia, R., Dou, W., Kumseranee, S., Punpruk, S., Li, X., & Gu, T. (2020). Distinguishing two different microbiologically influenced corrosion (MIC) mechanisms using an electron mediator and hydrogen evolution detection. *Corrosion Science*, 177, Article 108993. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108993>

Received: 23.06.2026. **Accepted:** 08.08.2026. **Published:** 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Демченко Н., Ткаченко С. Антимікробна та антикорозійна активність четвертинних солей хінолінію та імідазо[1,2-а]хінолінію. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 120-129. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.9>

Cite this article in APA style as:

Demchenko, N., & Tkachenko, S. (2026). Antymikrobnа ta antykorozijnа aktyvnosti chetvertynnykh solei khinoliniu ta imidazo[1,2-a]khinoliniu [Antimicrobial and anticorrosive activities of quaternary quinolinium and imidazo[1,2-a]quinolinium salts]. *Biota. Human. Technology*, (2), 120-129. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.9> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Demchenko N. [*in Ukrainian: Демченко Н.*] ¹, 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

Tkachenko S. [*in Ukrainian: Ткаченко С.*] ², Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Prof., email: tkachenko16sv@ukr.net
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 Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

² Data collection, manuscript preparation.



ENVIRONMENTAL POLLUTION STRESSES AND ORGANISMS' RESPONSE

СТРЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ
ТА РЕАКЦІЯ ОРГАНІЗМІВ



UDC 549.892.1:615

DOI: 10.58407/bht.2.26.10



Copyright (c) 2026 Yuliia Voronina-Tuzovskykh, Viktor Yanchenko, Olena Bondar, Veronika Voronina, Iryna Kurmakova, Ihor Savosta
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 Вороніна-Тузівських, Віктор Янченко, Олена Бондар,
Вероніка Вороніна, Ірина Курмакова, Ігор Савоста
ДОСЛІДЖЕННЯ ХРОНІЧНОЇ ТОКСИЧНОСТІ КОМПЛЕКСУ ОЛІЙНОГО
НА ОСНОВІ БУРШТИНУ



Yuliia Voronina-Tuzovskykh, Viktor Yanchenko, Olena Bondar,
Veronika Voronina, Iryna Kurmakova, Ihor Savosta

RESEARCH OF CHRONIC TOXICITY OF THE OIL COMPLEX
BASED ON AMBER

АНОТАЦІЯ

Досліджено комплекс олійний на основі бурштини як перспективна сировина для безпечних косметичних та фармацевтичних препаратів.

Мета роботи. Вивчення токсикологічних характеристик комплексу олійного на основі бурштини ТМ ІЛ SAV AMBER при повторних введеннях, визначення ступеня його ушкоджуючої дії при тривалому введенні, виявлення найбільш чутливих органів і систем організму, дослідження ступеню оборотності ушкоджень.

Методологія. Досліджували основні інтегративні показники функціонального стану, показники стану серцево-судинної та центральної нервової системи, периферичні та біохімічні показники крові та стан сечі. В експерименті задіяно 40 білих здорових щурів, яким вводився олійний комплекс (середня доза - 2,5 мл/кг); контроль - 0,9 % розчин NaCl. Поведінкові реакції вивчали з використанням тесту «відкрите поле». Систолічний тиск вимірювали безкровним методом за допомогою манометра й реєстратора пульсу. Сечу досліджували з використанням діагностичних тест-смужок Dekaphan Leuco на аналізаторі сечі CL-50 (High Technology Inc).

Кількість еритроцитів, лейкоцитів і тромбоцитів крові підраховували в камері Горяєва. Визначення гемоглобіну крові проводили геміхромним методом. Активність АлАТ, АсАТ, ЛФ, вміст загального білка, альбумінів, глобулінів, креатиніну, сечовини, глюкози, загального холестерину, тригліцеридів, натрію, калію, кальцію, хлоридів, фосфору в сироватці крові визначали за допомогою наборів реагентів для клінічної біохімії; протромбіновий час - за допомогою турбідиметричного гемокоагулометра SOLAR CGL2110.

Наукова новизна: вперше досліджено хронічну токсичність олійного комплексу на основі бурштини ТМ ІЛ SAV AMBER.

Висновки. Повторні наскірні нанесення олійного комплексу на основі бурштини ТМ ІЛ SAV AMBER не спричиняють статистично значущих відмінностей у цитологічних та біохімічних показниках системи крові, сечі, функціональних показниках серцево-судинної системи, а також не викликають відмінностей в інтегративних показниках центральної нервової системи та шлунково-кишкового тракту між дослідними та контрольними групами тварин. Препарат може бути рекомендований для подальших лабораторних досліджень.

Ключові слова: хронічна токсичність, комплекс олійний, бурштин, косметична субстанція

ABSTRACT

The paper examines an amber-based oil complex and identifies it as a raw material for developing safe cosmetic and pharmaceutical products.

Purpose of the work. To study the toxicology of the TM IL SAV AMBER amber-based oil complex during repeated use. The study assessed its damaging effects during prolonged use, identified the most sensitive organs and systems of the body, and studied the degree of reversibility of any damage.

Methodology. We studied the main integrative indicators of functional status, indicators of the cardiovascular and central nervous systems, peripheral and biochemical blood indicators, and urine status. The experiment involved 40 healthy white rats, which were administered an oil complex (average dose: 2.5 ml/kg); the control group received a 0.9 % NaCl. Behavioral reactions were studied using the "open field" test. Systolic pressure was measured using a bloodless method with a manometer and pulse recorder. Urine was examined using Dekaphan Leuco diagnostic test strips on a CL-

50 urine analyzer (High Technology Inc). The number of red blood cells, white blood cells, and platelets in the blood was counted in a Goryaev chamber. Blood hemoglobin was determined using the hemichromatic method. The activity of ALT, AST, LF, the content of total protein, albumin, globulin, creatinine, urea, glucose, total cholesterol, triglycerides, sodium, potassium, calcium, chloride, and phosphorus in blood serum were determined using clinical biochemistry reagent kits; prothrombin time was determined using a SOLAR CGL2110 turbidimetric hemocoagulometer.

Scientific novelty. The chronic toxicity of the amber-based oil complex TM IL SAV AMBER has been investigated for the first time.

Conclusions. Repeated dermal applications of the amber-based oil complex TM IL SAV AMBER do not cause statistically significant differences in cytological and biochemical parameters of the blood system, urine, functional parameters of the cardiovascular system, and do not cause differences in integrative parameters of the central nervous system and gastrointestinal tract between the experimental and control groups of animals. The drug can be recommended for further laboratory studies.

Key words: chronic toxicity, oil complex, amber, cosmetic substance

Вступ

Пошук нової природної сировини дозволяє створювати більш безпечні та етичні продукти для фармацевтичного ринку. В цьому плані на увагу заслуговує бурштин та олійні комплекси на його основі, зокрема торгової марки TM IL SAV AMBER, як багатофункціональна сировина, що містить компоненти з різною терапевтичною дією, зокрема антибактеріальною. Перспективність дослідження бурштину зумовлена наявністю його значних родовищ на території України (Рівненська, Житомирська та Волинська області), відповідністю вимогам «зеленої хімії» та цілям Стратегії сталого розвитку.

Аналіз зразків Балтійського бурштину показав наявність у його складі речовин з антиоксидантними, антибактеріальними, протигрибковими властивостями (Tumiłowicz et al., 2016). Натомість етанольні екстракти одержані з українського бурштину (Chorny et al., 2024) відрізнялися більшою концентрацією біологічно-активних речовин та антиоксидантною активністю.

Встановлено, що вживання питної води з додаванням водного екстракту бурштину сприяє покращенню пам'яті та когнітивних функцій людей (Myronov et al., 2018), а також обумовлює нормалізацію функціонування піруватдегідрогеназної активності мітохондрій у дітей (Stepanova et al., 2011).

Наразі розроблено низку фармацевтичних препаратів на основі похідних бурштинової кислоти, зокрема етилметилгідроксипіридину сукцинату, запропонованих (Lisenko & Palchevska, 2020).

Сучасним напрямком розробки препаратів на основі бурштину є також

створення олійних комплексів. Вони, крім бурштинової кислоти, містять водночас вітаміни А, Е, К, F, PP, D та групи В, а також є джерелом макро-, мікро- та ультрамікроелементів. Особливо важливим є наявність цинку, феруму, кальцію, йоду, калію та інших складових неорганічної частини комплексу (Voronina-Tuzovskiykh et al., 2024). Елементний склад свідчить про багатогранну можливість використання комплексу та перспективність у виробництві на його основі косметичних та фармацевтичних продуктів, але водночас розробка інноваційних сертифікованих препаратів вимагає комплексного дослідження можливого токсичного впливу на організм.

Метою дослідження є вивчення токсикологічних характеристик комплексу олійного на основі бурштину TM IL SAV AMBER при повторних введеннях, визначення ступеня його ушкоджуючої дії при тривалому введенні, виявлення найбільш чутливих органів та систем організму, а також дослідження ступеню оборотності ушкоджень.

Матеріали та методи дослідження

Для характеристики хронічної токсичності комплексу олійного на основі бурштину TM IL SAV AMBER досліджувалися наступні параметри: основні інтегративні показники функціонального стану; показники стану серцево-судинної та центральної нервової системи; периферичні та біохімічні показники крові та стан сечі. Дослідження токсикологічних характеристик проведені згідно «Наказу МОЗ України №944 від 14.12.2009 р. «Про затвердження Порядку проведення доклінічного вивчення лікарських засобів та експертизи матеріалів

доклінічного вивчення лікарських засобів» (On approval of the Procedure..., 2009).

Вивчення субхронічної токсичності досліджуваного препарату при повторних нашкірних нанесеннях проводили на 40 білих щурах масою 170-230 г (до початку експерименту), що утримувалися на стандартному раціоні віварію та пройшли попередню акліматизацію протягом 10 діб (СОП № УТ-01). Догляд, утримання та годування тварин здійснювався згідно з ДСТУ 8060:2015 (Лабораторні тварини. Вимоги до утримання) вимогами нормативних документів у стандартних умовах віварію ДДМУ згідно СОП № ТС-01; УТ-11 (Kozhem'jakin, et al., 2022).

Тварини утримувалися в стандартних клітках (пластмасовий ящик з оцинкованою сіткою) розмірами 500×320×160 мм. Кожна експериментальна група містила 10 тварин (окремо самці і самки) (СОП № УТ-11). Рандомізація в групі проведена механічним способом (СОП № УТ-02). Маркування тварин здійснено за допомогою 1 % розчину діамантового зеленого (СОП № УТ-03). Протоколи дослідження та усі процедури, пов'язані з утриманням тварин, гуманним ставленням до них і їх використанням в експерименті проводились з дотриманням вимог GLP і Європейською конвенцією про захист хребетних тварин, які використовуються для дослідних та інших цілей від 18.03.1986 р. та Наказу Міністерства охорони здоров'я України № 944 від 14.12.2009 р.

Досліджуваний препарат вводився щодня 1 раз на добу протягом 28 діб. Тривалість дослідження визначена, виходячи з передбачуваної тривалості застосування препарату у людини залежно від шляху введення згідно СОП № ЗТ-08. Способом введення був спосіб, рекомендований для клінічного вивчення, а саме нашкірне нанесення препарату, що забезпечує простоту введення й відповідає передбаченому в клінічній практиці місцевому нанесенню препарату на поверхню шкіри (Stefanov, ed., 2007).

Комплекс олійний на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER наносили щурам у максимально припустимих об'ємах для даного шляху введення – по 0,5 мл на тварину (Stefanov, ed., 2007). При цьому середня доза досліджуваного препарату, яку отримували тварини, складала 2,5 мл/кг. Були сформовані 2 досліджувані групи

щурів по 10 тварин (окремо самців і самок). Крім досліджуваних груп були сформовані 2 контрольні групи щурів (10 самців і 10 самок), яким нашкірно наносився 0,9 % розчин натрію хлориду в порівнянному об'ємі (по 0,5 мл на тварину або 2,5 мл/кг):

Група №1 – Комплекс олійний на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER, 2,5 мл/кг (n=10, ♂).

Група №2 – Комплекс олійний на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER, 2,5 мл/кг (n=10, ♀).

Група №3 – Розчин натрій хлориду 0,9 %, 2,5 мл/кг (контроль) (n=10, ♂).

Група №4 – Розчин натрій хлориду 0,9 %, 2,5 мл/кг (контроль) (n=10, ♀).

Для проведення експерименту у тварин обох груп за добу до початку дослідження вистригали шерсть на бічній поверхні тіла так, щоб площа нанесення становила 10 % загальної поверхні. У ході дослідження препарат наносили нашкірно 7 разів на тиждень (1 раз на день, у проміжку з 9:00 до 10:00) протягом 28 днів відповідно до СОП № ТСЩ-05.

Протягом усього терміну дослідження тварини перебували під щоденним спостереженням: відзначалися виживаність, апетит, маса тіла тварин (перед введенням препарату, на 7, 14, 21 і 28 день експерименту), стан шерстяного покриву й слизових оболонок, поведінка, характеристика фекалій, забарвлення сечі. Після закінчення введення препарату проводили максимально повне обстеження експериментальних тварин за допомогою гематологічних, біохімічних і фізіологічних тестів. Наприкінці експерименту проводили патоморфологічні дослідження. Визначали масу органів і проводили їхнє гістологічне дослідження (СОП № ЗТ-02, ГІД-02).

Поведінкові реакції вивчали з використанням тесту «відкрите поле» (Stanford, 2007). При цьому рухову активність оцінювали за кількістю пересічених квадратів; пасивно-оборонні реакції – за кількістю вертикальних стійок; дослідницьку активність – за кількістю заглядань у нірки; емоційний стан – за кількістю дефекацій і вмивань (грумінг) протягом 3 хвилин спостереження (Stanford, 2007). Тестування показників поведінкової активності проводили на 28-у добу від початку введення досліджуваного засобу (СОП № ПР-10).

Вимірювання систолічного тиску проводилося безкровним методом за допомогою манометра й реєстратора пульсу.

Функціональний стан серця оцінювали по часових (тривалості інтервалів PQ, QRS, QT, RR) і амплітудним (величині зубців P, R) характеристикам електрокардіограми в II стандартному відведенні. Біоелектрична активність міокарда знімалася за допомогою голчастих електродів і оброблялася комп'ютерним кардіографічним комплексом (Cardiolab+) (Zharinov, Kuts, ed., 2020) (СОП № ПР-04) на 28 добу експерименту.

Дослідження сечі проводили на 28 добу експерименту з використанням стандартних діагностичних тест-смужок DekaPhan Leuco виробництва «Pliva-Lachema Diagnostika» (Чехія) на аналізаторі сечі CL-50 виробництва High Technology Inc. (США). Мікроскопію осаду проводили за допомогою світлової мікроскопії (СОП № ПР-07).

Кількість еритроцитів, лейкоцитів і тромбоцитів крові підраховували в камері Горяєва (СОП № КДКС-04, № КДКС-05, № КДКС-06). Приготування й фарбування мазків, а також визначення формули крові проводили відповідно загальноприйнятим методичним вказівкам (Varenyuk & Dzerzhynskyy, 2019). Визначення гемоглобіну крові проводили геміхромним методом за допомогою біохімічного аналізатора HTI Biochem SA (Chemistry Analyzer) виробництва High Technology Inc. (США) і стандартного тест-набору виробництва НПП «Філісіт-Діагностика» (СОП № КДКС-10).

Активність АЛАТ, АсАТ, ЛФ, а також вміст загального білка, альбумінів, глобулінів, креатиніну, сечовини, глюкози, загального холестерину, тригліцеридів, натрію, калію, кальцію, хлоридів, фосфору в сироватці крові визначали за допомогою наборів реагентів для клінічної біохімії виробництва High Technology Inc. (США) (СОП № КБХ-03, № КБХ-04, № КБХ-05, № КБХ-06, № КБХ-07, № КБХ-08, № КБХ-09). Реєстрацію показників проводили в сироватці крові (СОП № КБХ-01) на біохімічному аналізаторі HTI Biochem SA (Chemistry Analyzer) виробництва High Technology Inc. (США) (СОП № ПР-16, № ПР-17).

Активованій частковий тромбопластиновий час (АЧТЧ) визначали в цитратній плазмі за допомогою турбідиметричного гемокоагулометра SOLAR CGL2110 (SOLAR) (СОП № КДКС-14, № КДКС-15).

Визначення протромбінового часу (ПЧ) проводили за допомогою турбідиметричного гемокоагулометра SOLAR CGL2110 (SOLAR) (СОП № КДКС-14, № КДКС-15).

При оцінці змін, які спостерігаються у тварин в хронічному токсикологічному експерименті, було виключена можливість впливу всіх побічних факторів, не пов'язаних із введенням препарату (захворювання тварин, їхнє харчування, утримання і т. ін.).

Статистичну обробку результатів дослідження проводили за допомогою програмного продукту STATISTICA 6.1 Statsoft Inc. Визначали середні арифметичні значення ($\bar{M}$) та довірчий інтервал ($\pm m$). Для кількісних показників проводилася перевірка гіпотези нормального розподілу даних у групах за допомогою критерію Шапіро-Вілکا. Залежно від нормальності розподілу порівнюваних рядів дослідні групи порівнювалися з контрольною або за допомогою критерію Ст'юдента для незалежних вибірок і з вихідним значенням за допомогою парного критерію Ст'юдента, або за допомогою U-критерію Манна-Вітні для порівняння з контролем і парного критерію Вілкоксона для порівняння з вихідним значенням (Fetisov, 2018).

Рівень значимості для критерію Шапіро-Вілکا взятий рівним 0,01, а для інших критеріїв – 0,05. У випадку множинних порівнянь використовувалась поправка Бонферроні або інші методи множинних порівнянь.

Для категоріальних показників проводилося порівняння груп за допомогою точного критерію Фішера.

Для змінної «маса тіла» у кожній групі проведена оцінка значимості відмінностей на 1, 7, 14, 21 і 28 добу за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу й критерію Дункана.

Результати дослідження та обговорення

Інтегративні показники функціонального стану. В умовах повторних нашкірних нанесень олійного комплексу на основі бурштину у дозі 2,5 мл/кг загибелі тварин у групах не спостерігалось. Також не відзначені зміни основних інтегральних показників за шкалою 0–3 (табл. 1).

Динаміка маси тіла досліджуваних тварин представлена в табл. 2. Аналіз даних дозволяє зробити висновки, що при повторних нашкірних нанесеннях досліджуваного препарату маса тіла залишалася в межах фізіологічної норми й статистично не відрізнялася за показниками від тварин контрольної групи.

Таблиця 1

Оцінка основних інтегративних показників функціонального стану тварин (n=40)

Групи тварин			
№1	№2	№3	№4
Активність ¹			
2	2	2	2
Апетит ²			
2	2	2	2
Поведінка ³			
2	2	2	2
Виділення з носа ⁴			
1	1	1	1
Стан очей ⁵			
1	1	1	1
Випорожнення ⁶			
1	1	1	1
Спрага ⁷			
2	2	2	2
Положення тіла ⁸			
2	2	2	2
Стан шерстяного покриву ⁹			
0	0	0	0
Тремор ¹⁰			
0	0	0	0

Примітка

¹Активність: 0 - повна відсутність; 1 - знижена, лише фізіологічні потреби; 2 - помірна, адекватна дії подразників; 3 - гіперактивність, занепокоєння.

²Апетит: 0 - повна відсутність; 1 - знижений; 2 - задовільний, адекватний потребам; 3 - підвищений.

³Поведінка: 0 - відсутність рухів, не реагує на подразники; 1 - знижена, відповідає на сильні подразники; 2 - адекватна подразникам; 3 - неадекватна подразникам.

⁴Виділення з носа: 0 - сухість слизової оболонки; 1 - слизова оболонка волога, виділень назовні немає; 2 - помірні виділення; 3 - рясні виділення.

⁵Стан очей: 0 - відсутність рухів, сухість кон'юнктиви; 1 - рухи активні, рефлексі адекватні, кон'юнктива блідо-рожева; 2 - гіперемія кон'юнктиви, слезотеча; 3 - виразки, некроз, гній.

⁶Випорожнення: 0 - відсутність випорожнень; 1 - 1-3 рази/год., кал оформлений; 2 - діарея, кал неоформлений, рідкий, частота до 3 раз/год.; 3 - діарея з кров'ю та слизом частіше 3 раз/год.

⁷Спрага: 0 - відмова від споживання води; 1 - споживання рідке, до 15 мл/добу; 2 - споживання помірне, 25-40 мл/добу, адекватне спожитому корму; 3 - полідипсія.

⁸Положення тіла: 0 - лежить нерухомо; 1 - змінює лише при споживанні їжі; 2 - адекватне виконуваний дії, активна зміна при рухах; 3 - вимушене, однотипне, нефізіологічне.

⁹Стан шерстяного покриву: 0 - хутро рівномірне, блискуче, охайне; 1 - «скуповджена» шерсть; 2 - злипла, жирна, ламка шерсть; 3 - алопеції.

¹⁰Тремор: 0 - відсутність; 1 - незначний; 2 - помірний; 3 - виражений.

Таким чином, повторні наскірні нанесення комплексу олійного на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER у дозуванні 2,5 мл/кг протягом 28 діб не супроводжувалися статистично достовірно значимими змінами в динаміці маси тіла у дослідних і контрольних тварин.

Показники функціонального стану центральної нервової системи. Дослідження

впливу повторних наскірних нанесень комплексу олійного на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER у дозі 2,5 мл/кг на стан ЦНС у щурів з використанням тесту «відкрите поле», який традиційно застосовують при аналізі ефектів препаратів на нервово-психічні функції.

Таблиця 2

Зміна маси тіла (г) щурів при повторних нашкірних нанесеннях комплексу олійного на основі бурштину (n=40, M ± m)

Групи	Вих. фон	7 доба	14 доба	21 доба	28 доба
№1	199,4 ± 4,29	211,6 ± 3,91	225,9 ± 4,09	235,3 ± 4,20	240,0 ± 4,03
№2	200,0 ± 4,98	212,0 ± 4,77	226,3 ± 4,98	236,6 ± 4,84	241,3 ± 4,72
№3	195,8 ± 4,17	208,1 ± 4,20	222,9 ± 4,26	232,5 ± 4,24	237,0 ± 4,03
№4	199,2 ± 5,26	211,8 ± 5,17	225,8 ± 5,00	235,3 ± 5,09	240,0 ± 4,92

Результати вивчення показників поведінкових реакцій у щурів у «відкритому полі» після нашкірних нанесень досліджуваного препарату протягом 28 днів наведені в табл. 3. Встановлено, що у щурів дослідних

груп на 28 добу експерименту не відзначалося значимих змін показників, що характеризують рухову, дослідницьку активність, а також емоційний статус.

Таблиця 3

Показники поведінкових реакцій у щурів у «відкритому полі» (n=40, M ± m)

Показники, за 3 хв	Групи тварин			
	№1	№2	№3	№4
Горизонтальна активність кількість пересічених квадратів	21,7 ± 1,12	18,8 ± 1,15	17,8 ± 1,40	19,5 ± 1,49
Дослідницька активність кількість заглядань у нірки	3,6 ± 0,37	3,4 ± 0,40	3,7 ± 0,26	3,5 ± 0,40
Вертикальна активність кількість стійок	2,8 ± 0,29	2,7 ± 0,30	3,3 ± 0,47	2,9 ± 0,48
Грумінг тривалість реакцій, 3 сек.	23,0 ± 1,37	18,7 ± 2,10	22,6 ± 1,85	20,5 ± 1,09
Дефекації кількість разів	0,7 ± 0,15	0,8 ± 0,13	0,9 ± 0,23	0,7 ± 0,21

Таким чином, повторні протягом 28 днів нашкірні нанесення досліджуваного засобу не впливають на рухову й дослідницьку активності тварин, а також не змінюють емоційний стан експериментальних тварин.

Стан серцево-судинної системи. Оцінка впливу комплексу олійного на основі бурштину на стан серцево-судинної системи в хронічному експерименті проводилася за аналізом впливу препарату на показники електрокардіограми й рівень артеріального тиску представлені в табл. 4 та табл. 5.

Встановлено, що повторні протягом 28 днів нашкірні нанесення досліджуваного препарату в

дозі 2,5 мл/кг не чинять істотного впливу на швидкість деполяризації передсердь, швидкість проведення збудження через атріовентрікулярне з'єднання, пучок Гіса та його гілки (табл. 5).

Досліджуваний препарат не здійснює вплив на рівень систолічного артеріального тиску у щурів в зазначені терміни спостереження.

Таким чином, комплекс олійний на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER у дозі 2,5 мл/кг при повторних нашкірних нанесеннях протягом 28 днів не чинить впливу на параметри біоелектричної активності міокарда й рівень систолічного артеріального тиску.

Таблиця 4

Зміна біоелектричних параметрів серця щурів у II стандартному відведенні (n=40, M ± m)

Показники	Групи тварин			
	№1	№2	№3	№4
ЧСС, уд/хв	406,4 ± 10,8	386,1 ± 12,9	387,6 ± 9,34	402,2 ± 11,0
Інтервали, мс				
PQ	38,8 ± 0,74	39,6 ± 0,72	39,0 ± 0,68	39,4 ± 0,73
P	18,0 ± 0,42	17,8 ± 0,87	18,8 ± 0,74	18,4 ± 0,58
QT	58,0 ± 1,15	57,0 ± 0,61	57,8 ± 0,81	58,0 ± 0,89
QRS	15,0 ± 0,54	15,0 ± 0,45	15,8 ± 0,55	15,4 ± 0,73
RR	148,6 ± 3,94	156,8 ± 4,71	155,6 ± 3,38	150,2 ± 4,09
Амплітуда, мВ				
R	0,651 ± 0,041	0,613 ± 0,023	0,636 ± 0,035	0,647 ± 0,028
P	0,074 ± 0,005	0,090 ± 0,006	0,086 ± 0,007	0,078 ± 0,008

Таблиця 5

Рівень систолічного артеріального тиску у щурів (n=40, M ± m)

Показники	Групи тварин			
	№1	№2	№3	№4
сАТ, мм.рт.ст.	112,7 ± 3,23	115,7 ± 2,49	113,3 ± 3,10	116,2 ± 2,63

Результати досліджень впливу препарату на показники периферичної крові білих щурів представлені в табл. 6 – 8.

Встановлено, що курсове нашкірне нанесення протягом 28 діб комплексу олійного на основі бурштину у дозі 2,5 мл/кг не викликає достовірно значимих змін показників периферичної крові щурів (кількість еритроцитів, лейкоцитів, тромбоцитів і рівень гемоглобіну). Встановлені незначні відмінності вивчених параметрів тварин дослідних і контрольної груп пов'язані, ймовірно, з можливими сезонними коливаннями показників і не

виходять за межі фізіологічної норми (табл. 6).

При детальному розгляді морфологічного складу лейкоцитів периферичної крові щурів, яким вводився комплекс олійний на основі бурштину, було виявлено, що як відносний, так і абсолютний вміст основних форм лейкоцитів (паличкоядерні й сегментоядерні нейтрофіли, лімфоцити, моноцити, еозинофіли) відповідав значенням контрольної групи тварин і перебував у межах нормальних показників для щурів (табл. 7-8).

Таблиця 6

Гематологічні показники щурів (n=40, M ± m)

Групи тварин	Показники				
	Еритроцити, $\times 10^{12}/\Lambda$	Гемоглобін, г/Λ	Лейкоцити, $\times 10^9/\Lambda$	Тромбоцити, тис./мкл	ШОЕ, мм/год
1	2	3	4	5	6
№1	5,03 ± 0,12	152,9 ± 3,14	8,70 ± 0,58	221,0 ± 6,27	3,2 ± 0,29
№3	5,13 ± 0,12	155,1 ± 3,53	8,94 ± 0,58	228,0 ± 8,60	3,4 ± 0,31

Продовження Таблиці 6

1	2	3	4	5	6
№2	5,20 ± 0,13	156,4 ± 3,45	9,30 ± 0,48	235,5 ± 7,90	3,5 ± 0,45
№4	4,85 ± 0,13	148,3 ± 2,35	7,94 ± 0,65	219,0 ± 7,14	2,7 ± 0,52

Таблиця 7

Морфологічний склад білих клітин (%) периферичної крові щурів (n=40, M ± m)

Групи тварин	Показники				
	Лімфоцити	Моноцити	Еозинофіли	Нейтрофіли	
				Паличкоядерні	Сегментоядерні
№1	70,1 ± 0,67	3,7 ± 0,45	3,2 ± 0,36	1,7 ± 0,30	21,3 ± 0,54
№3	68,5 ± 1,73	3,5 ± 0,40	3,1 ± 0,31	1,9 ± 0,31	23,0 ± 1,52
№2	69,1 ± 1,60	3,4 ± 0,37	2,7 ± 0,37	2,1 ± 0,23	22,7 ± 1,35
№4	69,4 ± 0,92	3,6 ± 0,31	2,9 ± 0,35	1,8 ± 0,29	22,3 ± 0,86

Таблиця 8

Абсолютний вміст лейкоцитів ($\times 10^9/\Delta$) периферичної крові щурів (n=40, M ± m)

Групи тварин	Показники				
	Лімфоцити	Моноцити	Еозинофіли	Нейтрофіли	
				Паличкоядерні	Сегментоядерні
№1	6,09 ± 0,404	0,32 ± 0,040	0,28 ± 0,034	0,14 ± 0,025	1,87 ± 0,154
№3	6,13 ± 0,436	0,32 ± 0,048	0,27 ± 0,029	0,17 ± 0,032	2,04 ± 0,183
№2	6,44 ± 0,398	0,31 ± 0,032	0,25 ± 0,034	0,20 ± 0,023	2,10 ± 0,149
№4	5,51 ± 0,46	0,28 ± 0,022	0,23 ± 0,033	0,14 ± 0,026	1,78 ± 0,167

Таким чином, препарат олійний комплекс на основі бурштину у дозі 2,5 мл/кг при повторних наскірних нанесеннях щурам протягом 28 діб не чинить гематотоксичного впливу.

Результати досліджень біохімічних показників сироватки крові щурів, що характеризують функціональний стан печінки й нирок після повторних наскірних нанесень комплексу олійного на основі бурштину у дозі 2,5 мл/кг протягом 28 діб, наведені в табл. 9. Всі коливання цифрових значень біохімічних показників, відзначені між дослідними та контрольними групами, не

виходили за рамки фізіологічних норм для даного виду тварин (Nasibullin et al., 2023).

Серед численних біохімічних методів, які застосовують при вивченні субхронічної токсичності, суттєве значення приділяється визначенню активності ферментів-маркерів гепатоцитолізу – АлАТ і АсАТ. Згідно результатів, наведених у таблиці 10, повторні наскірні нанесення щурам комплексу олійного на основі бурштину протягом 28 діб не приводили до зміни активності сироваткових амінотрансфераз. Активність ЛФ у сироватці крові щурів дослідних груп також достовірно не відрізнялася від показників контрольних груп.

Таблиця 9

Зміни показників біохімічного складу сироватки крові щурів (n=40, M ± m)

Показники	Групи тварин			
	№1	№2	№3	№4
АлАТ, МО/л	78,1 ± 6,12	82,0 ± 7,90	75,9 ± 5,98	73,6 ± 5,71
АсАТ, МО/л	119,2 ± 5,27	145,5 ± 9,05	128,9 ± 5,90	135,3 ± 8,21
ЛФ, МО/л	179,5 ± 13,2	214,3 ± 12,4	201,5 ± 7,80	194,7 ± 12,6
Креатинін, мг/л	6,94 ± 0,36	7,12 ± 0,37	6,85 ± 0,25	7,01 ± 0,42
Сечовина, ммоль/л	7,63 ± 0,31	8,54 ± 0,30	7,55 ± 0,27	8,18 ± 0,32
Загальний білок, г/л	66,3 ± 1,72	67,5 ± 2,05	64,4 ± 2,19	65,7 ± 1,52
Альбуміни, г/л	34,8 ± 0,95	36,1 ± 1,09	34,6 ± 1,12	34,8 ± 0,84
Глобуліни, г/л	31,5 ± 0,82	31,4 ± 1,03	29,8 ± 1,11	30,9 ± 0,71
Глюкоза, ммоль/л	6,69 ± 0,34	6,78 ± 0,35	7,47 ± 0,26	7,04 ± 0,29
Загальний холестерин, ммоль/л	1,38 ± 0,121	1,61 ± 0,118	1,45 ± 0,133	1,57 ± 0,124
Тригліцериди, ммоль/л	0,377 ± 0,022	0,400 ± 0,032	0,337 ± 0,023	0,411 ± 0,042
Na ⁺ , ммоль/л	152,3 ± 2,10	148,7 ± 1,60	149,3 ± 1,56	150,2 ± 1,88
K ⁺ , ммоль/л	4,38 ± 0,176	4,76 ± 0,106	4,80 ± 0,074	4,58 ± 0,179
Ca ²⁺ , ммоль/л	2,82 ± 0,077	2,70 ± 0,089	2,74 ± 0,117	2,67 ± 0,082
Cl ⁻ , ммоль/л	98,2 ± 0,80	97,8 ± 0,71	99,0 ± 1,05	98,4 ± 0,77
P, ммоль/л	2,75 ± 0,098	2,84 ± 0,139	2,66 ± 0,124	2,75 ± 0,126

Таблиця 10

Активованний частковий тромбопластиновий час і протромбіновий час у щурів (n=40, M ± m)

Групи тварин	АЧТЧ, сек	ПЧ, сек
№1	18,9 ± 1,12	29,9 ± 1,12
№2	21,3 ± 1,18	31,2 ± 1,27
№3	19,3 ± 0,83	28,8 ± 0,68
№4	20,2 ± 1,54	30,0 ± 1,37

У всіх дослідних групах вміст креатиніну (критеріальний показник функції нирок) у сироватці крові за своїми характеристиками не виходив за межі фізіологічних величин, що може свідчити про нормальну екскреторну функцію нирок. Концентрація сечовини (кінцевого продукту метаболізму білків, що виводиться нирками) у сироватці крові дослідних груп тварин також відповідала значенням фізіологічної норми для щурів.

Вміст загального білка, альбумінів, глобулінів, глюкози, загального холестерину, тригліцеридів та електролітів (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Cl⁻, P) у сироватці крові щурів залишалися в межах нормальних значень для даного виду тварин,

хоча й характеризувалися деяким розкидом показань між експериментальними групами.

Таким чином, повторні нашкірні нанесення щурам комплексу олійного на основі бурштину у дозі 2,5 мл/кг протягом 28 діб показали безпеку його застосування у відношенні органів і систем експериментальних тварин (за результатами біохімічних досліджень сироватки крові).

Вплив препарату на систему згортання крові. Оцінка впливу внутрішньовенного введення комплексу олійного на основі бурштину на систему згортання крові проводилася на підставі вивчення показників базових коагуляційних тестів – АЧТЧ і ПЧ

(табл.10). Активований частковий тромбопластиновий час являє собою час, який необхідний для утворення згустку фібрину в плазмі крові після додавання до неї каолін-кефалінового реактиву й розчину кальцій хлориду. АЧТЧ відображає роботу «внутрішнього шляху» системи згортання крові. Показує дефіцит (відсутність) або ненормальну роботу одного або декількох факторів згортання – II, V, VIII, IX, X, XI, XII (крім факторів VII і XIII) і відображає вплив на систему згортання препаратів інгібіторів згортання. Подовження АЧТЧ вказує на схильність до кровотечі.

Протромбіновий час – є поширеним скринінговим тестом для оцінки зовнішнього каскаду згортання плазми. Він використо-

вується для визначення активності фактора VII, контролю над лікуванням антикоагулянтами (особливо непрямого типу дії), при скринінгу системи гемостазу, рідко для кількісного визначення фібриногену.

Отримані результати свідчать про те, що повторні нашкірні нанесення досліджуваного олійного комплексу на основі бурштину у дозі 2,5 мл/кг не призводять до змін АЧТЧ та ПЧ, отже не чинять впливу на систему згортання крові.

Результати дослідження показників сечі щурів в умовах 28-денного нашкірного нанесення олійного комплексу на основі бурштину представлені в табл. 11.

Таблиця 11

Показники сечі щурів (n=40, М ± m)

Показники	Групи тварин			
	№1	№2	№3	№4
Об'єм	4,91 ± 0,30	4,60 ± 0,35	4,75 ± 0,19	4,54 ± 0,31
Колір	жовтий	жовтий	жовтий	жовтий
Мутність	прозора	прозора	прозора	прозора
Питома вага	1,021 ± 0,002	1,023 ± 0,002	1,018 ± 0,003	1,020 ± 0,002
pH	6,95 ± 0,25	7,05 ± 0,19	6,85 ± 0,21	7,20 ± 0,21
Білок, г/л	0,62 ± 0,130	0,76 ± 0,125	0,55 ± 0,126	0,69 ± 0,129

Встановлено, що у тварин, яким протягом 28 діб нашкірно наносили досліджуваний препарат, не виявлено істотних змін показників сечі, які могли б свідчити про порушення функції нирок. Значення питомої ваги, pH, рівня білка в групах щурів, яким наносили досліджуваний препарат, статистично не відрізнялися від показників груп контролю. Кетони, уробіліноген, глюкоза, нітроти, еритроцити, лейкоцити в сечі щурів контрольної та дослідної груп не виявлялися.

Таким чином, повторні нашкірні нанесення олійного комплексу на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER у дозі 2,5 мл/кг протягом 28 діб не приводять до порушення функціонального стану нирок піддослідних тварин.

Подальші лабораторні дослідження повинні бути спрямовані на морфологічні особливості органів для виключення в них

структурних змін за умов впливу досліджуваного препарату.

Висновки

Встановлено, що повторні нашкірні нанесення олійного комплексу на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER не спричиняють статистично значущих відмінностей у цитологічних та біохімічних показниках системи крові, сечі, функціональних показниках серцево-судинної системи, а також не викликають відмінностей в інтегративних показниках центральної нервової системи та шлунково-кишкового тракту між дослідними та контрольними групами тварин.

З огляду на наведені результати, препарат олійного комплексу на основі бурштину ТМ IL SAV AMBER є перспективним об'єктом для подальших лабораторних досліджень.

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 (№ протоколу: 5, 3 жовтня 2024р., 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

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 disclose.

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

Chornyi, V., Krûma, Z., Mysiura, T., Popova, N., & Zavialov, V. (2024) Comparative extraction of components from Ukrainian and Baltic ambers. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences Section B*, 77(5-6), 244-249 <https://doi.org/10.2478/prolas-2023-0035>

Fetisov, V.S. (2018). STATISTICA statistical data analysis package. NDU (In Ukrainian).

Фетісов В.С. Пакет статистичного аналізу даних STATISTICA. Ніжин: НДУ імені Гоголя, 2018. 114 с.

Kozhem'jakin, Yu.M., Khromov, O.S., Filonenko, M. A., & Saifetdinova, G. A. (2022). *Scientific and practical recommendations for keeping laboratory animals and working with them*. Avicenna. (In Ukrainian)

Науково-практичні рекомендації з утримання лабораторних тварин та роботи з ними: монографія / Ю.М. Кожем'якін, О.С. Хромов, М. А. Філоненко, та ін. Київ: Авіценна, 2022. 156 с.

Lysenko, Yu.S., & Palchevska, T.A. (2020). Drugs based on ethylmethylhydroxypyridine succinate. *Scientific achievements of modern society. Abstracts of the 9th International scientific and practical conference*. April, 28-30, 2020. Cognum Publishing House. (in Ukrainian).

Лисенко Ю.С., Пальчевська Т.А. Лікарські засоби на основі етилметилгідроксипіридину сукцинат / Scientific achievements of modern society: Abstracts of the 9th International scientific and practical conference (2020) Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. 2020. С 683-688.

Mironov, O. L., Kachalova, N. M., Dzyuba, O. I., Levchik, N. Ya., & Bogza, S. L. (2018). Research on the biological activity of Ukrainian amber. *Physical and organic chemistry, pharmacology, and pharmaceutical technology of biologically active substances*, 1, 13-24. (in Ukrainian).

Дослідження біологічної активності українського бурштину / О. Л. Міронов, Н. М. Качалова, О. І. Дзюба, та ін. *Фізико-органічна хімія, фармакологія та фармацевтична технологія біологічно активних речовин: збірник наукових праць*. 2018. Т. 1. С. 13-24.

Nasibullin, B.A., Gushcha, S.G., & Oleshko, O.Ya. (Ed.). (2023). *Working with laboratory animals: care and reproduction of models of pathological conditions (manual)*. Poligraf. (in Ukrainian).

Робота з лабораторними тваринами: догляд та відтворення моделей патологічних станів (посібник) / За заг. ред. Б.А. Насібуллін, С.Г. Гуща, О.Я. Олешко. Одеса: «Поліграф», 2023. 96 с.

On Approval of the Procedure for Conducting Preclinical Studies of Medicinal Products and Expert Evaluation of Materials from Preclinical Studies of Medicinal Products, Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 944, Dec. 14, 2009 [cited Sept. 5, 2025] (Ukraine). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0053-10#Text> (In Ukrainian).

Про затвердження Порядку проведення доклінічного вивчення лікарських засобів та експертизи матеріалів доклінічного вивчення лікарських засобів : Наказ МОЗ України від 14.12.2009 № 944. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0053-10#Text>

Stanford, S. C. (2007). The Open Field Test: reinventing the wheel. *Journal of Psychopharmacology*, 21(2), 134–135. <https://doi.org/10.1177/0269881107073199>

Stefanov, O.V. (Ed.). (2001) *Preclinical studies of medicinal products*. Kyiv: Avicenna. (In Ukrainian)

Доклінічні дослідження лікарських засобів / за ред. О.В. Стефанова, Київ: Авіцена; 2001. 527 с.

Stepanova, E.I., Kolpakov, I.E., & Litvinenko O.M. (2011). Use of succinic acid to correct biochemical manifestations of mitochondrial dysfunction in children-residents of radioaction contaminated areas. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*, 16, 255-260. (In Ukrainian)

Степанова Є.І., Колпаков І.Є., Литвиненко О.М. Застосування бурштинової кислоти для корекції біохімічних проявів мітохондріальних дисфункцій у дітей – мешканців радіоактивно забруднених територій. Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2011. Вип. 16, С. 255-260.

Tumiłowicz, P., Synoradzki, L., Sobiecka, A., Arct, J., Pytkowska, K. Safarzyński S. (2016). Bioactivity of Baltic amber – fossil resin. *Polimery*, 1(5), 347-356. <https://doi.org/10.14314/polimery.2016.347>

Varenyuk, I.M., & Dzerzhinsky, M.E. (2019) *Methods of cytological and histological diagnosis: textbook*. Interservice. (In Ukrainian)

Варенюк І.М., Держинський М.Е. Методи цито-гістологічної діагностики: навчальний посібник. Київ: Інтерсервіс, 2019. 256 с.

Voronina-Tuzovskaya, Yu. V., Tkachenko, S. V., Kurmakova, I. M., Yanchenko, V. O., Usov, A. M., Savosta, I. O., & Pleshakov O. A. (2023). Elemental composition of amber powder abrasive and prospects for its use as a raw material in the pharmaceutical industry *Scientific Collection «InterConf+»*, (39(179), 461–469. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.11.2023.049> (in Ukrainian).

Елементний склад бурштинової пудри-абразиву та перспективність її використання як сировини фармацевтичної промисловості / Ю. В. Вороніна-Тузовських, С. В. Ткаченко, І. М. Курмакова, та ін. *Scientific Collection «InterConf+»*. 2023. №39(179). С. 461–469. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.11.2023.049>

Voronina-Tuzovskiykh, Yu., Mikulenko, O., Bondar, O., Kurmakova, I., & Pleshakov, O. (2024). Chemical composition of amber-based macerate: methods of analysis and results. *Biota. Human. Technology*, (3), 171-179. <https://doi.org/10.58407/bht.3.24.10> (In Ukrainian)

Хімічний склад мацерату на основі бурштину: методи аналізу та результати / Ю. Вороніна-Тузовських, О. Микуленко, О. Бондар, та ін. *Biota. Human. Technology*. 2024. №3. С. 171–179. <https://doi.org/10.58407/bht.3.24.10>

Zharinov O.Y., V.O. Kuts (Ed.) (2020). Fundamentals of Electrocardiography. Chetverta Hvilya. (In Ukrainian)
Основи електрокардіографії / за ред. О.Й. Жарінова, В.О. Куць. Київ: Четверта хвиля, 2020. 248 с.

Received: 18.01.2026. Accepted: 09.05.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Вороніна-Туззовських Ю., Янченко В., Бондар О.,
Вороніна В., Курмакова І., Савоста І. Дослідження
хронічної токсичності комплексу олійного на
основі бурштина. *Biota. Human. Technology.* 2026.
№ 2. С. 131-143. DOI:
<https://doi.org/10.58407/bht.2.26.10>

Cite this article in APA style as:

Voronina-Tuzovskykh, Y., Yanchenko, V., Bondar, O.,
Voronina, V., Kurmakova, I., & Savosta, I. (2026).
Doslidzhennia khronichnoi toksychnosti kompleksu
oliinoho na osnovi burshtynu [Research of chronic
toxicity of the oil complex based on amber]. *Biota.
Human. Technology,* (2), 131-143.
<https://doi.org/10.58407/bht.2.26.10> (in
Ukrainian)

Information about the authors:

Voronina-Tuzovskykh Yu. [in Ukrainian: **Вороніна-Туззовських Ю**] ¹, Cand. Sci. (Pharm.), email: yulianavt1984@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6673-2154 Scopus-Author ID: 56384500500
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Yanchenko V. [in Ukrainian: **Янченко В.**] ², Cand. Sci. (Pharm.), Assoc. Prof., 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

Bondar O. [in Ukrainian: **Бондар О.**] ³, 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.

Voronina V. [in Ukrainian: **Вороніна В.**] ⁴, Bachelor's Degree Candidate, email: veronikavoronina610@gmail.com
ORCID: 0009-0000-7917-2304
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Kurmakova I. [in Ukrainian: **Курмакова І.**] ⁵, 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

Savosta I. [in Ukrainian: **Савоста І.**] ⁶, owner LLC IL SAV AMBER, yura@oligroup.ua
ORCID: 0009-0004-0144-3492
LIMITED LIABILITY COMPANY IL SAV AMBER (LLC IL SAV AMBER)
5 Borodtna Ingenera Street, Kyiv, 02092, Ukraine

¹ Study design, funds collection, data collection.

² Manuscript preparation.

³ Data collection, manuscript preparation.

⁴ Statistical analysis.

⁵ Manuscript preparation, statistical analysis.

⁶ Data collection.

UDC 502.175:574.5

DOI: 10.58407/bht.2.26.11



Copyright (c) 2026 Iryna Munasypova-Motyash, Nataliia Tkachuk

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 Мунасіпова-Мотяш, Наталія Ткачук
СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО БІОІНДИКАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ
ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ



Iryna Munasypova-Motyash, Nataliia Tkachuk
MODERN APPROACHES TO BIOINDICATIVE MONITORING
OF AQUATIC ECOSYSTEMS

АНОТАЦІЯ

Сучасний антропогенний пресинг на водні екосистеми вимагає впровадження високочутливих методів моніторингу, здатних фіксувати порушення гомеостазу гідробіонтів на ранніх етапах. Традиційні гідробіологічні підходи, засновані на аналізі структурно-функціональної організації планктонних та бентосних угруповань, дедалі частіше інтегруються з молекулярно-біохімічними та токсикологічними тест-системами. Особливу загрозу для стабільності іхтіоценозів та об'єктів аквакультури становить хронічне надходження хімічних ксенобіотиків (гербіцидів, поверхнево-активних речовин) та біологічних контамінантів (мікотоксинів, зокрема афлатоксину В1 і Т-2 токсину). У зв'язку з цим актуальним є теоретичне узагальнення та аналітична оцінка інформативності сучасних ценотичних, молекулярно-генетичних та біохімічних маркерів, що використовуються для інтегрального екологічного аудиту водойм.

Мета роботи – здійснити системний аналіз та узагальнення сучасних методологічних підходів до біоіндикаційного моніторингу водних екосистем, визначивши найбільш інформативні молекулярно-біохімічні, ценотичні та іхтіотоксикологічні маркери антропогенної трансформації водойм і оцінки адаптаційного потенціалу гідробіонтів.

Методологія ґрунтувалася на системному аналізі, компаративному оцінюванні та узагальненні результатів сучасних натурних і експериментальних досліджень світового наукового простору. Предметом аналізу аналітичного огляду виступали параметри розвитку суцесійних процесів фітопланктону та діатомових водоростей, особливості ембріогенезу риб за дії кліматичних чинників, а також флуктуації показників енергетичного (ензими мітохондріального дихання, глюконеогенез), ліпідного та нуклеїнового (ДНК, РНК, вільні нуклеотиди) обміну, інтенсивності ліпопероксидації та антиоксидантного захисту в органах-мішенях коропових риб за дії хімічних і біологічних полютантів.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації та критичному аналізі мультирівневих маркерів біомоніторингу з обґрунтуванням необхідності відходу від монопараметричних оцінок. Уперше комплексно поєднано та концептуалізовано вектори тривалого екологічного моніторингу на рівні фіто- й бентоценозів із експресією клітинних рецепторів (TRPV4) та сезонною динамікою ферментативних зрушень в організмі риб за умов поєданого хімічного (пестициди, ПАР) та біологічного (мікотоксикози) навантаження.

Висновки. Доведено, що оцінка видового різноманіття мікрowodоростей є надійним індикатором довготривалих змін трофічного статусу річкових систем, тоді як показники раннього онтогенезу риб відображають вплив глобальних кліматичних факторів. Встановлено, що за умов дії хімічних ксенобіотиків та мікотоксинів (афлатоксину В1, Т-2 токсину) універсальними та найбільш чутливими критеріями раннього патологічного процесу є інтенсифікація перекисного окиснення ліпідів, депресія антиоксидантної системи, гальмування нуклеїнового обміну та деструкція мітохондріальних ензимних контурів. Отримані результати обґрунтовують доцільність розробки й практичного впровадження інтегральних мультимаркерних панелей у загальну систему екологічного моніторингу природних водойм та промислової аквакультури.

Ключові слова: біомоніторинг, водні екосистеми, фітопланктон, діатомові водорості, іхтіотоксикологія, ксенобіотики, мікотоксини, окисний стрес, енергетичний обмін, біохімічні маркери

ABSTRACT

Modern anthropogenic pressure on aquatic ecosystems demands the implementation of highly sensitive monitoring methods capable of detecting homeostatic disruptions in hydrobionts at early stages. Traditional hydrobiological approaches based on the structural and functional organization of planktonic and benthic communities are increasingly being integrated with molecular-biochemical and toxicological test systems. A particular threat to the stability of ichthyocenoses and aquaculture facilities is posed by the chronic influx of chemical xenobiotics (herbicides, surfactants) and biological contaminants (mycotoxins, specifically aflatoxin B1 and

T-2 toxin). In this regard, the theoretical synthesis and analytical evaluation of the informativeness of modern coenotic, molecular-genetic, and biochemical markers used for the integrated ecological audit of water bodies is highly relevant.

The aim of the study was to perform a systematic analysis and synthesis of modern methodological approaches to the bioindicative monitoring of aquatic ecosystems, identifying the most informative molecular-biochemical, coenotic, and ichthyotoxicological markers of anthropogenic transformation of water bodies and the assessment of the adaptive potential of hydrobionts.

Methodology was based on the systematic analysis, comparative assessment, and synthesis of results from contemporary field and experimental studies within the global scientific space. The subjects of this analytical review included the development parameters of successional processes in phytoplankton and diatom algae, the peculiarities of fish embryogenesis under the influence of climatic factors, as well as fluctuations in energy metabolism (mitochondrial respiration enzymes, gluconeogenesis), lipid and nucleic acid metabolism (DNA, RNA, free nucleotides), the intensity of lipid peroxidation, and antioxidant defense in target organs of cyprinid fish under the action of chemical and biological pollutants.

Scientific novelty of the work lies in the systematization and critical analysis of multi-level biomonitoring markers, substantiating the necessity of moving away from mono-parametric evaluations. For the first time, long-term ecological monitoring vectors at the phyto- and benthocoenosis levels have been comprehensively combined and conceptualized alongside cellular receptor expression (TRPV4) and the seasonal dynamics of enzymatic alterations in the fish organism under conditions of combined chemical (pesticides, surfactants) and biological (mycotoxicosis) loading.

Conclusions. It has been proven that evaluating the species diversity of microalgae is a reliable indicator of long-term changes in the trophic status of river systems, whereas the parameters of early fish ontogeny reflect the impact of global climatic factors. It was established that under the influence of chemical xenobiotics and mycotoxins (aflatoxin B1, T-2 toxin), the universal and most sensitive criteria for early pathological processes are the intensification of lipid peroxidation, depression of the antioxidant system, inhibition of nucleic acid metabolism, and destruction of mitochondrial enzymatic pathways. The obtained results substantiate the viability of developing and practically implementing integrated multi-marker panels into the general system of ecological monitoring for both natural water bodies and industrial aquaculture.

Key words: biomonitoring, aquatic ecosystems, phytoplankton, diatoms, ichthyotoxicology, xenobiotics, mycotoxins, oxidative stress, energy metabolism, biochemical markers

Вступ

Збереження стійкості та біологічного різноманіття водних екосистем в умовах інтенсивного антропогенного пресингу та кліматичних змін належить до ключових завдань сучасної екологічної науки. Традиційні фізико-хімічні методи аналізу водного середовища, хоч і забезпечують точність визначення концентрації конкретних речовин, мають дискретний характер і не дають цілісного уявлення про пролонговану біологічну дію забруднювачів на живі організми. У зв'язку з цим особливості актуальності набуває розвиток і впровадження методології екологічного моніторингу на основі біоіндикації (Gokçe, 2022). Використання гідробіонтів як живих датчиків дозволяє інтегрально оцінити стан середовища та спрогнозувати динаміку розвитку екосистеми в цілому. У цьому контексті важливо розмежовувати поняття біоіндикації та біомоніторингу. Біоіндикація передбачає використання реакцій організмів, популяцій або угруповань для характеристики змін стану навколишнього середовища, тоді як біомоніторинг є систематичним та регулярним спостереженням за такими біологічними показниками у часі й просторі. Таким чином,

біоіндикаційні методи є важливою складовою комплексної системи біомоніторингу водних екосистем.

Класичні підходи до біомоніторингу річкових та озерних систем традиційно базуються на аналізі структурно-функціональної організації фітопланктонних спільнот (Dembowska, 2021) та бентосних діатомових водоростей, які є надійними маркерами якості води у межах Водної рамкової директиви ЄС (Masouras et al., 2021). Водночас реакція екосистеми на забруднення формується на основі сукупної відповіді окремих організмів, де первинні патологічні зміни відбуваються на молекулярному, біохімічному та клітинному рівнях задовго до прояву видимих порушень у популяціях. Окрім того, чутливість гідробіонтів на ранніх стадіях онтогенезу (наприклад, виживаність заплідненої ікри) суттєво залежить від флуктуацій абіотичних чинників, таких як температура чи солоність, що модулює загальний екологічний статус водойми (Park et al., 2024).

Сучасний етап розвитку біоіндикації вимагає залучення високочутливих біохімічних та іхтіотоксикологічних маркерів для оцінки впливу новітніх антропогенних чинників, зокрема мікропластику, який здатний змінювати властивості позаклі-

тинних речовин мікроводоростей (*Microcystis aeruginosa*) і виступати вектором для інших токсикантів (Ye et al., 2022). Проте найбільшу загрозу для стабільності аквакультур та природних іхтіоценозів становить хімічне забруднення ксенобіотиками різної природи, включаючи залишки пестицидів, поверхнево-активних речовин (ПАР) та мікотоксинів (Sevi et al., 2016; Koletsy et al., 2021).

Потрапляння гербіцидів та ПАР у водне середовище ініціює глибокі перебудови в метаболізмі риб. Зокрема, це проявляється у деструктивних змінах ферментів енергетичного обміну та термінальних реакцій глюконеогенезу (Yakovenko et al., 2018; Mekhed et al., 2019), а також у вираженій сезонній динаміці їхньої токсичної дії на вміст глюкози в тканинах. Паралельно з цим, надходження у водойми мікотоксинів (Т-2 токсину, афлатоксину В1 та ін.), що продукуються мікроскопічними грибами та накопичуються у кормах та м'язах риб (Kovalsky et al., 2016; Pickova et al., 2021; Polotnianko & Mekhed, 2023), викликає системний токсикоз. Наслідком такого впливу є порушення морфологічних і гематологічних показників іхтіофауни (Fornari et al., 2023; Polotnianko & Mekhed, 2024), супресія нуклеїнового обміну (Filonenko & Mekhed, 2025) та деградація ліпідних компонентів клітинних мембран (Symonova et al., 2018).

Оскільки ключовою ланкою патогенезу за дії ксенобіотиків є розвиток окисного стресу, особливу індикаційну цінність має моніторинг інтенсивності перекисного окиснення ліпідів та активності ензимів антиоксидантного захисту в тканинах і печінці промислових видів риб, зокрема коропа (*Cyprinus carpio*) (Yakovenko et al., 2017; Simonova & Mekhed, 2025). Комплексна адаптивна відповідь крові та метаболічних систем гідробіонтів на хронічне забруднення середовища (Nikolaenko et al., 2023; Shkurko et al., 2024) слугує надійним біохімічним критерієм у системі раннього екологічного сповіщення.

Таким чином, інтеграція класичних гідробіологічних методів із сучасними молекулярно-біохімічними тест-системами іхтіомоніторингу є необхідною умовою для формування об'єктивної оцінки екологічного стану водойм.

Мета дослідження – теоретично обґрунтувати та узагальнити сучасні методологічні підходи до біоіндикаційного моніторингу водних екосистем, оцінити інформативність біохімічних, іхтіотоксикологічних та морфологічних маркерів гідробіонтів в умовах антропогенного забруднення водойм ксенобіотиками та мікотоксинами.

У сучасній практиці екологічного менеджменту водних ресурсів біомоніторинг розглядається як фундаментальний інструмент, що доповнює хімічний аналіз. Проте ефективність оцінки залежить від вибору правильного методологічного рівня – від організового до екосистемного (Gokçe, 2022).

Дослідження структурних змін угруповань гідробіонтів дозволяють фіксувати довгострокові тренди трансформації водойм. Зокрема, аналіз видового різноманіття та щільності фітопланктону є класичним інструментом оцінки трофічного статусу та загальної якості води в басейнах великих річок (Dembowska, 2021). Важливе місце в інтегральному моніторингу посідають бентосні діатомові водорості. Завдяки своїй малорухливості та специфічним вимогам до субстрату, вони виступають надійними індикаторами локального антропогенного навантаження, що активно використовується в країнах ЄС у межах виконання вимог Водної рамкової директиви (Masouras et al., 2021).

Разом з тим, чутливість водних екосистем до забруднення тісно переплітається зі змінами глобальних абіотичних чинників – температури та солоності води. Флуктуації цих параметрів безпосередньо впливають на виживаність та ембріогенез риб на ранніх стадіях розвитку, що може радикально змінювати чисельність популяцій (Park et al., 2024). На молекулярному рівні адаптація гідробіонтів до таких коливань супроводжується специфічною експресією генів, зокрема транскрипційних варіантів мРНК ванілоїдних рецепторів (TRPV4), які є первинними клітинними датчиками температурного та осмотичного стресу (Lee et al., 2021).

Більш тонкі та ранні патологічні процеси в гідроекосистемах виявляються через біохімічну відповідь іхтіофауни.

Потрапляння у воду ксенобіотиків (пестицидів, ПАР) порушує метаболічну карту риб, блокуючи ключові ензими енергетичного обміну та ініціюючи збої у системі глюконеогенезу (Yakovenko et al., 2018; Mekhed et al., 2019). Водночас запуск вільнорадикальних процесів та інтенсифікація перекисного окиснення ліпідів у печінці та інших тканинах промислових риб є універсальним маркером хімічного отруєння, що змушує антиоксидантну систему організму працювати на межі виснаження (Yakovenko et al., 2017; Simonova & Mekhed, 2025).

Особливу екотоксикологічну небезпеку становить забруднення водою мікотоксинами, які потрапляють туди зі стічними водами агрокомплексів або через неякісні штучні корми (Koletsy et al., 2021). Основними продуцентами цих небезпечних метаболітів є мікроскопічні гриби родів *Aspergillus*, *Fusarium* та *Penicillium*, поширені у зерновій сировині (Pickova et al., 2021). Проблема ускладнюється явищем ко-контамінації – одночасною присутністю в кормах та воді кількох видів регульованих та маскованих мікотоксинів, що створює ефект синергічної токсичності для гідробіонтів (Kovalsky et al., 2016).

Серед усього спектра мікотоксинів найбільш детально вивчається дія афлатоксину B1 (AFB1) та T-2 токсину. AFB1 є потужним гепатоканцерогеном і генотоксикантом. Його наявність у трофічних ланцюгах та продуктах переробки вимагає постійного контролю (Mushtaq et al., 2012) та розробки методів детоксикації, наприклад, за допомогою ультрафіолетового опромінення (Hassan, 2018) або введення у корми спеціальних адсорбуючих добавок для мінімізації деструктивного впливу на гістологію печінки риб (Fornari et al., 2023). На клітинному рівні дія AFB1 призводить до глибокого пригнічення синтезу нуклеїнових кислот ДНК та РНК у тканинах риб, що гальмує пластичний обмін (Filonenko & Mekhed, 2025).

Не менш агресивним є T-2 токсин (трихотеценовий мікотоксин). Дослідженнями доведено, що він здатний накопичуватися безпосередньо у м'язовій тканині риб (Polotnianko & Mekhed, 2023), викликаючи суттєві зміни морфологічних параметрів іхтіофауни, хронічну деградацію

ліпідного шару мембран та деструкцію клітин крові (Symonova et al., 2018; Polotnianko & Mekhed, 2024). Сукупний вплив мікотоксинів на іхтіологічні показники та загальний метаболізм коропових риб формує стійкий стан хронічного токсикозу (Mekhed, 2024; Shkurko et al., 2024). Проте організм риб демонструє комплексні адаптаційні зрушення (гліколіз, зміна гематологічного профілю), намагаючись компенсувати дію пошкоджувальних факторів водного середовища (Nikolaenko et al., 2023).

Таким чином, аналіз сучасних наукових публікацій свідчить про доцільність комплексного використання показників різних рівнів організації гідробіонтів для підвищення інформативності екологічного моніторингу водних екосистем.

Матеріали та методи дослідження

Теоретико-методологічну основу роботи становить системний аналіз та критичне узагальнення сучасних наукових підходів до біоіндикаційного оцінювання екологічного статусу водних середовищ. Для досягнення поставленої мети було застосовано метод систематичного літературного огляду, який дозволив комплексно проаналізувати динаміку розвитку іхтіотоксикологічних та гідробіологічних досліджень за останні роки. Інформаційною базою дослідження слугували релевантні публікації, індексовані у провідних міжнародних та національних реферативних базах даних, зокрема Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar та електронних фондах Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського.

Пошук наукових публікацій охоплював переважно період 2018–2025 рр., із додатковим урахуванням фундаментальних праць попередніх років, що мають безпосереднє значення для розкриття теоретичних і методологічних аспектів біоіндикації. До аналізу включалися наукові публікації, присвячені використанню гідробіонтів та їхніх морфологічних, фізіологічних, біохімічних і молекулярних показників для оцінювання стану водних екосистем та впливу антропогенних чинників.

Основними дескрипторами пошуку виступали терміни, пов'язані з екологічним моніторингом гідроекосистем, сучасними

методами біоіндикації, молекулярно-біохімічними маркерами токсичності у риб, а також специфічними аспектами впливу ксенобіотиків, гербіцидів, поверхнево-активних речовин та мікотоксинів на антиоксидантну систему і ліпідний обмін промислових видів іхтіофауни.

Систематизацію та аналітичну обробку фактичного матеріалу відібраних джерел проводили за двома основними напрямками. Перший напрям охоплював оцінку екосистемно-ценотичних параметрів, таких як структурна організація фітопланктону та бентосних діатомових водоростей під впливом антропогенних та глобальних кліматичних факторів. Другий напрям був зосереджений на організмovo-біохімічному рівні, де детально аналізували механізми порушення метаболізму, пригнічення нуклеїнового та ліпідного обміну, а також індукцію окисного стресу в тканинах риб за дії токсикантів хімічного та біологічного походження. Такий комплексний методологічний підхід забезпечив об'єктивність висновків та дозволив сформулювати цілісне уявлення про сучасний стан біоіндикаційного моніторингу.

Вибір зазначених показників для аналітичного узагальнення зумовлений їхньою здатністю відображати різні рівні організації біологічної відповіді на дію антропогенних чинників. Ценотичні показники характеризують структурні та функціональні зміни угруповань, морфологічні й онтогенетичні параметри відображають реакцію організмovoго рівня, тоді як біохімічні та молекулярні маркери дають змогу виявляти ранні функціональні порушення в організмі гідробіонтів. Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати як уже сформовані зміни, так і ранні прояви дії стресових факторів.

Результати дослідження та обговорення

Сучасний екологічний моніторинг водних об'єктів базується на усвідомленні того, що гідроекосистема реагує на антропогенне навантаження як цілісна функціональна структура. Системний аналіз наукових публікацій останніх років дозволяє констатувати, що оцінка якості водного середовища успішно здійснюється за допомогою індикаторних організмів на

різних рівнях їхньої біологічної організації. Провідне місце у структурі сучасного біомоніторингу посідає аналіз структурно-функціональних параметрів фітопланктонних угруповань. Як первинні продуценти, мікрowodорості миттєво реагують на зміну гідрохімічного режиму, появу біогенних елементів та токсичне забруднення, що робить їх незамінними об'єктами для довгострокового спостереження за екологічним статусом великих транскордонних річкових систем та оцінки їхнього трофічного стану (Dembowska, 2021).

Поряд із вільноплаваючим фітопланктоном, у світовій практиці водоохоронного менеджменту особлива увага приділяється дослідженням бентосних екосистем. Зокрема, використання донних діатомових водоростей як високочутливих біоіндикаторів визнано одним із найбільш стандартизованих та об'єктивних методів у межах реалізації вимог Водної рамкової директиви Європейського Союзу. Завдяки прикріпленому способу життя та специфічним екологічним нішам різних видових таксонів, бентосні діатомеї дозволяють оцінити не лише поточний рівень сапробності чи токсичності водойми, а й спрогнозувати довготривалі сукцесійні зміни в річкових мережах під впливом урбанізації та промислового пресингу (Masouras et al., 2021).

Сучасні методологічні підходи до біомоніторингу також враховують, що стабільність екосистем та виживання популяцій вищих гідробіонтів тісно пов'язані з глобальними кліматичними флуктуаціями. Зміни температурного режиму та коливання солоності води чинять сильний модифікуючий вплив на ранні стадії онтогенезу риб, які є найбільш вразливими ланками іхтіоценозів. Натурні та модельні експерименти засвідчують, що навіть незначні відхилення солоності від оптимуму критично знижують виживаність та порушують процеси ембріогенезу заплідненої ікри промислових видів риб, що здатне повністю дестабілізувати відтворення біоресурсів у специфічних гідроекосистемах (Park et al., 2024). На глибинному, клітинному рівні молекулярний механізм адаптації організму до таких осмотичних та термічних стрес-факторів регулюється через

активацію специфічних білкових комплексів. Дослідження експресії транскрипційних варіантів матричної РНК ванілоїдних рецепторів типу 4 підтверджують, що ці мембранні структури функціонують як первинні сенсорні датчики клітини, забезпечуючи тонку фізіологічну перебудову і компенсаторні реакції гідробіонтів у відповідь на динамічні зміни параметрів навколишнього середовища (Lee et al., 2021).

Таким чином, інтегральний аналіз стану водних екосистем на сучасному етапі успішно поєднує класичні гідробіологічні методи оцінки видового різноманіття планктону й бентосу з делікатними молекулярно-генетичними та ембріологічними тест-системами. Це дозволяє здійснювати всебічний екологічний аудит водойм, фіксуючи порушення як на рівні цілих біоценозів, так і на рівні фізіологічної стійкості окремих індикаторних видів.

У системі сучасного екологічного моніторингу водних екосистем фіксація біохімічних зрушень в організмі іхтіофауни посідає особливе місце, оскільки молекулярні маркери дозволяють реєструвати наявність токсичного пресингу задовго до появи видимих морфологічних чи популяційних змін. Найбільшу загрозу для стабільності природних водойм та об'єктів аквакультури становить хронічне надходження хімічних ксенобіотиків штучного походження, серед яких провідну роль відіграють залишки гербіцидів та поверхнево-активних речовин, що масово застосовуються в агропромисловому секторі та комунальному господарстві. Потрапляючи у водне середовище, ці сполуки швидко проникають через зябровий апарат та шкірні покриви риб, ініціюючи системні метаболічні перебудови та порушуючи роботу життєво важливих ензимних контурів.

Одним із ключових механізмів негативного впливу пестицидів та сурфактантів на гідробіонтів є деструкція енергетичного потенціалу клітин. Дослідження метаболічного профілю модельного об'єкта - коропа звичайного (*Cyprinus carpio* L.) - свідчать про те, що тривалий вплив гербіцидів та поверхнево-активних речовин призводить до вираженого пригнічення активності ключових ферментів енергетичного обміну, блокуючи нормальний перебіг дихальних процесів у мітохондріях та знижуючи адаптаційний резерв організму

(Yakovenko et al., 2018). Токсична дія пестицидного навантаження також суттєво трансформує вуглеводний обмін риб, викликаючи глибокі збої у функціонуванні ферментів термінальних реакцій глюконеогенезу. При цьому характерною особливістю є чітко виражена сезонна динаміка токсичного ефекту, коли коливання температури та гідрохімічного режиму водойм у різні пори року модулюють силу патогенного впливу ксенобіотиків, призводячи до критичних флуктуацій вмісту глюкози в тканинах та виснаження тканинних депо глікогену (Mekhed et al., 2019).

Паралельно з деструкцією енергетичного обміну, універсальною ланкою патогенезу за дії хімічних забруднювачів різної природи є індукція окисного стресу. Надходження ксенобіотиків у внутрішнє середовище риб супроводжується надмірною генерацією активних форм кисню, які атакують поліненасичені жирні кислоти клітинних мембран. Розвиток інтенсивних процесів перекисного окиснення ліпідів, особливо у печінці коропа, яка є головним органом детоксикації та біотрансформації, слугує прямим показником глибини токсичного ураження (Simonova & Mekhed, 2025). У відповідь на вільнорадикальну агресію відбувається активація ендогенної антиоксидантної системи, ензимами якої на перших етапах намагаються нейтралізувати токсичні перекиси та радикальні сполуки. Проте в умовах тривалого або висококонцентрованого антропогенного забруднення відзначається виснаження та різке зниження активності компонентів антиоксидантного захисту в тканинах, що свідчить про зрив фізіологічної адаптації та перехід процесу на рівень незворотних клітинних пошкоджень (Yakovenko et al., 2017).

Таким чином, оцінка стану ензимних систем енергетичного метаболізму, моніторинг інтенсивності ліпопероксидації та детекція активності ферментів антиоксидантного захисту в органах-мішенях риб забезпечують високу чутливість екологічного моніторингу. Ці біохімічні показники виступають надійними молекулярними критеріями раннього виявлення антропогенної трансформації гідроекосистем, дозволяючи своєчасно оцінити реальну загрозу для іхтіофауни в умовах хімічного пресингу.

Поряд із хімічним пресингом ксенобіотиків штучного походження, суттєвою загрозою для біологічного розмаїття водойм та рентабельності промислового рибництва є контамінація водного середовища та штучних кормів токсинами мікроскопічних грибів. Сучасний екологічний моніторинг об'єктів аквакультури все частіше фіксує присутність вторинних метаболітів мікроміцетів родів *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, серед яких найбільш патогенними для іхтіофауни визнано афлатоксин В1 та Т-2 токсин. Ці біологічні полютанти мають виражену гепатотоксичну, імуносупресивну та хронічну загальнотоксичну дію, а їхнє проникнення в організм риб аліментарним шляхом ініціює каскад небезпечних метаболічних розладів і глибоку деструкцію клітинних структур.

Первинною мішенню для дії мікотоксинів в організмі риб виступає печінка як центральний орган метаболізму та детоксикації (Filonenko & Mekhed, 2025). Дослідження біохімічного статусу коропа звичайного свідчать, що аліментарне надходження мікотоксинів супроводжується різким пригніченням процесів біосинтезу. Зокрема, розвиток хронічного мікотоксикозу призводить до вираженого гальмування нуклеїнового обміну, що проявляється у зниженні концентрації РНК та ДНК у тканинах печінки, а також зумовлює істотні зсуви у фракційному складі вільних нуклеотидів і пригнічує активність ферментів їхнього розпаду. Крім того, глибоких змін зазнає ліпідна матриця клітинних мембран. Під дією Т-2 токсину та афлатоксину В1 спостерігається деградація загальних ліпідів та порушення оптимального співвідношення між фосфоліпідами і триацилгліцеридами, що свідчить про розвиток жирової інфільтрації печінки, дестабілізацію клітинної архітектури та втрату мембранами їхніх бар'єрних функцій.

Системний характер дії мікотоксинів чітко відстежується за змінами морфологічних та гематологічних показників іхтіофауни. Тривала інтоксикація викликає депресію кровотворної системи, що маніфестує у вигляді анемічних станів, зниження кількості еритроцитів та гемоглобіну, а також реорганізації лейкоцитарної формули крові у бік лімфопенії та гранулоцитозу. Водночас на рівні організму фіксується виражена імуносупресія, зумовлена пригніченням неспецифічної резистентності

та зниженням лізоцимної і бактерицидної активності сироватки крові, що робить риб беззахисними перед вторинними бактеріальними та паразитарними інвазіями. Морфологічні дослідження паренхіматозних органів підтверджують біохімічні зрушення, виявляючи дистрофічні процеси, некробіотичні зміни гепатоцитів, деструкцію епітелію ниркових каналців та деформацію зябрових пелюсток, що в сукупності веде до зниження темпів росту риб та зростання їхньої летальності.

Таким чином, узагальнення даних сучасного мікотоксикологічного моніторингу вказує на необхідність інтеграції біохімічних маркерів нуклеїнового та ліпідного метаболізму разом із класичними гематологічними і морфологічними тестами в загальну систему екологічного аудиту. Це дозволяє диференціювати ефекти біологічного забруднення від хімічного токсикозу та забезпечує ранню діагностику латентних форм мікотоксикозів в аквакультурі.

Висновки

Проведений системний аналіз сучасних наукових підходів до біоіндикаційного моніторингу водних екосистем дозволяє констатувати, що об'єктивна оцінка екологічного статусу водойм в умовах інтенсивного антропогенного пресингу можлива лише за умови інтеграції методів різних біологічних рівнів. Комплексне поєднання класичних гідробіологічних досліджень на ценотичному рівні з делікатними молекулярно-біохімічними та іхтіотоксикологічними тест-системами забезпечує формування цілісного та прогностично цінного уявлення про стан гідроекосистем. При цьому структурно-функціональні параметри фітопланктону та бентосних діатомових водоростей виступають надійними індикаторами довготривалих суцесійних змін і загального трофічного статусу водойм, тоді як оцінка раннього онтогенезу риб та експресії специфічних клітинних рецепторів дозволяє чітко диференціювати вплив глобальних кліматичних факторів, зокрема коливань температури та солоності середовища.

За даними проаналізованих досліджень, умовах забруднення водойм сучасними хімічними ксенобіотиками, такими як залишки гербіцидів та поверхнево-активних речовин, найбільш чутливими критеріями

раннього екологічного неблагополуччя є молекулярно-метаболичні маркери іхтіофауни. Хронічний хімічний токсикоз викликає глибоку деструкцію енергетичного потенціалу клітин модельного об'єкта *Cyprinus carpio*, що маніфестує у пригніченні ключових мітохондріальних ферментів, збоях ферментативних контурів глюконеогенезу із вираженою сезонною залежністю, а також в індукції окисного стресу. Інтенсифікація процесів перекисного окиснення ліпідів на тлі виснаження ендогенної антиоксидантної системи в органах-мішенях риб слугує універсальним показником глибини патологічного процесу та зриву фізіологічної адаптації організму задовго до появи видимих популяційних зрушень.

Доведено, що не менш вагомим вектором сучасного екодослідження має виступати мікотоксикологічний моніторинг, оскільки біологічна контамінація водного середовища та штучних кормів вторинними метаболітами мікроміцетів, зокрема афлатоксином B1 та T-2

токсином, чинить потужну деструктивну дію на іхтіофауну. Розвиток мікотоксикозів супроводжується гальмуванням нуклеїнового обміну, зниженням концентрації РНК і ДНК, деградацією ліпідного матриксу гепатоцитів, а також вираженою імуносупресією та глибокою реорганізацією морфо-гематологічного профілю риб, так як в роботі не наведено даних про ступінь пригнічення нуклеїнового обміну. Інтеграція біохімічних маркерів нуклеїнового та ліпідного метаболізму разом із класичними гематологічними тестами в єдину систему екологічного аудиту дозволяє чітко диференціювати ефекти біологічного забруднення від хімічного інтоксикаційного синдрому. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі полягають у розробці стандартизованих мультимаркерних панелей для експрес-діагностики ранніх стадій антропогенної трансформації як природних водойм, так і замкнених систем промислової аквакультури.

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

Автор Наталія Ткачук є членом редакційної колегії Biota. Human. Technology. Вона не брала участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийнятті цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Author Nataliia Tkachuk is the member of the editorial board of Biota. Human. Technology. She was 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

- Dembowska, E.A. (2021). The use of phytoplankton in the assessment of water quality in the lower section of Poland's largest river. *Water*, 13(23), 3471. <https://doi.org/10.3390/w13233471>
- 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, hermatological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*, 4, 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>
- Gökçe, D. (2022). The importance and effectiveness of aquatic biomonitoring. *New Paradigms in Environmental Biomonitoring Using Plants*. Elsevier, 45–72. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824351-0.00007-9>
- 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/ijs.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(12), 363. <https://doi.org/10.3390/toxins8120363>
- Lee, H.J., Lee, S.Y., & Kim, Y.K. (2021). Molecular characterization of transient receptor potential vanilloid 4 (TRPV4) gene transcript variant mRNA of chum salmon *Oncorhynchus keta* in response to salinity or temperature changes. *Gene*, 795, 145779. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2021.145779>
- Masouras, A., Karaouzas, I., Dimitriou, E., Tsirtsis, G., & Smeti, E. (2021). Benthic diatoms in river biomonitoring-present and future perspectives within the water framework directive. *Water*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/w13040478>
- 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.
- Mekhed, O. B., Yakovenko, B. V., & Iskevych, Ye. V. (2019). Seasonal dynamics of herbicides' toxic impact on activity of enzymes of terminal gluconeogenesis reactions and glucose content in carp tissues. *Hydrobiological Journal*, 55(3), 67–73. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i3.80>
- Mushtaq, M., Sultana, V., Anwar, F., et al. (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-Polihraf, 99–100. (in Ukrainian)

Ніколаєнко Т., Івашченко М., Івашченко 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>

Park, J. W., Kim, B. S., Kim, J. K., Jung, H. K., Park, H. J., & Lee, C. I. (2024). Influence of salinity on the survival rate of fertilized chum salmon (*Oncorhynchus keta*) eggs. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 39. <https://doi.org/10.3390/jmse12010039>

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-токсиком. *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., et al. (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 коропових 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. (2025). Effect of toxicants of different chemical nature on lipid peroxidation intensity in the liver of scaly carp (*Cyprinus carpio*). *Natural Science Education and Science*, 4, 171–180. <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-4.22> (in Ukrainian).

Симонова Н. А., Мехед О. Б. Вплив токсикантів різної хімічної природи на інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у печінці коропа лускатого (*Cyprinus carpio*). *Природнича освіта і наука*. 2025. Вип. 4. С. 171–180. DOI: <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-4.22>

Symonova, N. A., Mekhed, O. B., Kupchyk, O. Y., & Tretyak, O. P. (2018). Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(4), 6–10. https://doi.org/10.15421/2018_234

Yakovenko, B. V., Tretyak, A. P., Mekhed, O. B., Khaitova, A. D., & Simonova, N. A. (2017). Effect of xenobiotics on the activity of the antioxidant system in carp tissues. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology*, 2(69), 76–80. (in Ukrainian).

Яковенко Б. В., Третяк А. П., Мехед О. Б., Хайтова А. Д., Симонова Н. А. Вплив ксенобіотиків на активність антиоксидантної системи в тканинах коропа. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія: Біологія*. 2017. № 2 (69). С. 76–80.

Yakovenko, B. V., Tretyak, O. P., Mekhed, O. B., & Iskevych, O. V. (2018). Effect of herbicides and surfactants on enzymes of energy metabolism of the *Cyprinus carpio*. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 948–952. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i3.80>

Ye, T., Yang, A., Wang, Y., Song, N., Wang, P., & Xu, H. (2022). Changes of the physicochemical properties of extracellular polymeric substances (EPS) from *Microcystis aeruginosa* in response to microplastics. *Environmental Pollution*, 315, 120354. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120354>

Received: 23.06.2026. Accepted: 12.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Мунасіпова-Мотяш І., Ткачук Н. Сучасні підходи до біоіндикаційного моніторингу водних екосистем. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 144-154.
<https://doi.org/10.58407/bht.2.26.11>

Cite this article in APA style as:

Munasypova-Motyash, I., & Tkachuk, N. (2026). Suchasni pidkhody do bioindykatsiinoho monitorynhu vodnykh ekosystem [Modern approaches to bioindicative monitoring of aquatic ecosystems]. *Biota. Human. Technology*, (2), 144-154. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.11> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Munasypova-Motyash I. [in Ukrainian: **Мунасіпова-Мотяш І.**] ¹, Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Prof., email: irynamotyash@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4129-9040

Department of General, Developmental and Social Psychology, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Tkachuk N. [in Ukrainian: **Ткачук Н.**] ², 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

¹ Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, data curation, writing - original draft, writing - review & editing.

² Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, data curation, writing - original draft, writing - review & editing.

UDC 579.551.214:632.951

DOI: 10.58407/bht.2.26.12



Copyright (c) 2026 Olexandr Smolsky

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 Смольський

ВІЛЬНО-РАДИКАЛЬНІ ПРОЦЕСИ У ТКАНИНАХ КОРОПА
ЗА ТОКСИЧНОГО ВПЛИВУ ПРЕПАРАТУ «КОРАГЕН»
В УМОВАХ *IN VITRO*



Olexandr Smolsky

FREE RADICAL PROCESSES IN CARP TISSUES
UNDER THE TOXIC INFLUENCE OF THE PREPARATION "KORAGEN"
IN *IN VITRO* CONDITIONS

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Оцінка редокс-статусу тканин коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.) за дії токсичних концентрацій препарату «Кораген» на фоні штучно індукованого окисного стресу.

Методологія. Експеримент проводився *in vitro* на ізольованих тканинах коропа лускатого (*C. carpio*) системі неферментативного перекисного окиснення ліпідів. Вибір ступеня розведення препарату обумовлений пошуком його небезпечної концентрації на окисно-відновний гомеостаз досліджуваних тканин в умовах експерименту. Інтенсивність перебігу окисних процесів оцінювали за накопиченням малонового діальдегіду, а стан ферментативної ланки системи антиоксидантного захисту – за супероксиддисмутаза та каталазна активностями. Спрямованість вільнорадикальних процесів у бік анти- або прооксидантної компоненти оцінювали за розрахунком фактору антиоксидантного стану. Вміст загального білку визначали фотоколориметрично за О.Н Lowry. Статистичну обробку отриманих даних проводили загальноприйнятими методами математичної статистики.

Наукова новизна. Вперше проведено оцінку редокс-статусу тканин коропа лускатого (*C. carpio*) за дії токсичних концентрацій препарату «Кораген» на фоні штучно індукованого окисного стресу.

Висновки. Встановлено особливості концентраційного та тканеспецифічного впливу препарату «Кораген» на процеси перекисного окиснення ліпідів та ферменти антиоксидантного захисту у тканинах коропа в умовах *in vitro*. Проаналізовано шляхи захисту людини і тварин від токсичної дії препарату дії у районах його агрохімічного застосування. Показані різнонаправлені зміни у досліджуваних тканинах щодо вмісту малонового діальдегіду в залежності від концентрації препарату та часу його експозиції у тканинах. Встановлено активацію супероксиддисмутази активності у печінці, м'язах та пригнічення даного ферменту у еритроцитах у більшості варіантів досліду. Виявлено чутливість ферменту каталази до концентрації препарату та часу експозиції.

Ключові слова: перекисне окиснення ліпідів у тканинах коропа, малоновий діальдегід, каталазна активність, супероксиддисмутаза активність, фактор антиоксидантного стану, інсектицид «Кораген»

ABSTRACT

Purpose of the work. Assessment of the redox status of carp tissues (*Cyprinus carpio* L.) under the action of toxic concentrations of the drug "Koragen" against the background of artificially induced oxidative stress.

Methodology. The experiment was conducted *in vitro* on isolated carp tissues (*C. carpio*) in the system of non-enzymatic lipid peroxidation. The choice of the degree of dilution of the drug was due to the search for its dangerous concentration for the redox homeostasis of the studied tissues under experimental conditions. The intensity of the course of oxidative processes was assessed by the accumulation of malondialdehyde, and the state of the enzymatic link of the antioxidant protection system - by superoxide dismutase and catalase activities. The direction of free radical processes towards the anti- or pro-oxidant component was assessed by calculating the antioxidant state factor. The content of total protein was determined photocolormetrically according to O.N. Lowry. Statistical processing of the obtained data was carried out using generally accepted methods of mathematical statistics.

Scientific novelty. For the first time, the redox status of carp tissues (*C. carpio*) was assessed under the action of toxic concentrations of the drug "Koragen" against the background of artificially induced oxidative stress.

Conclusions. The features of the concentration and tissue-specific effect of the drug “Koragen” on the processes of lipid peroxidation and antioxidant defense enzymes in carp tissues under *in vitro* conditions were established. The ways of protecting humans and animals from the toxic effects of the drug in the areas of its agrochemical application were analyzed. Multidirectional changes in the studied tissues regarding the content of malondialdehyde were shown depending on the concentration of the drug and the time of its exposure in the tissues. Activation of superoxide dismutase activity in the liver, muscles and inhibition of this enzyme in erythrocytes were established in most variants of the experiment. The sensitivity of the catalase enzyme to the concentration of the drug and the exposure time was revealed.

Keywords: lipid peroxidation in carp tissues, malondialdehyde, catalase activity, superoxide dismutase activity, antioxidant state factor, insecticide “Koragen”

Вступ

Перекисне окиснення ліпідів (ПОЛ) – це окисна деградація ліпідів, яка відбувається під дією вільних радикалів і є однією з основних причин пошкодження клітинних мембран та подальшої загибелі клітин унаслідок впливу активних форм кисню (Honcharuk & Korshun, 2004). Цей процес регулює ліпідний склад біологічних мембран і мембраноасоційованих ферментів, бере участь у синтезі лейкотрієнів, простагландинів, метаболізмі катехоламінів та стероїдних гормонів, впливає на проникність мембран і транспорт речовин через них (Nizhenkovska et al., 2012). Інтенсивне вивчення окисних процесів в організмі в останні роки пов'язане з накопиченням даних, які свідчать про те, що стресорні або екстремальні фактори, зокрема отруєння організму ксенобіотиками та іншими речовинами антропогенного походження, призводять до зміщення балансу в системі “прооксиданти/антиоксиданти”, внаслідок чого і створюються умови для формування окисного стресу (Escobales et al., 2005).

В останні роки у практиці сільсько-господарського виробництва широкого застосування в якості інсектицидів набула група похідних хлорантранілпіролу (препарати «Кораген», «Ампліго», «Зеніт»), особливістю дії яких є здатність впливати на процеси м'язового скорочення (Pesticide Fact Sheet, 2008).

Метою даної роботи була оцінка редокс-статусу тканин коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.) за дії токсичних концентрацій препарату «Кораген» на фоні штучно індукованого окисного стресу.

Матеріали та методи дослідження

Досліди проводилися *in vitro* на гомогенатах печінки, скелетних м'язів, а також на еритроцитах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.). Гомогенати тканин готували на основі 0,025М Трис-НCl-буфера з рН 7,4, що містив 0,175 М розчин KCl у співвідношенні 7:18 (біологічний матеріал : буферний розчин). Кров

для досліджень відбирали з синуса зябрової вени з використанням гепарину, як антикоагулянта, з розрахунку 20 од./мл крові (Karlova et al., 2023). Для отримання суспензії еритроцитів кров центрифугували при 3000 об/хв на центрифугі ОПн-ВУХЛ4.2 протягом 10 хв, а осад еритроцитів ресуспендували у 0,025М Трис-НCl-буферному розчині (рН 7,4).

Експеримент проводили у модельованих умовах, а саме в системі неферментативного ПОЛ. Інкубаційна суміш містила біологічний матеріал (гомогенат печінки, скелетних м'язів або кров) та 0,5М трис-НCl-буфер. Для індукції неферментативного аскорбатзалежного ПОЛ в інкубаційну суміш додавали суміш 0,25мМ розчину ферум (II) сульфату та 0,5мМ розчину аскорбінової кислоти (Shen et al., 2021).

У якості контролю використовували гомогенати печінки, скелетних м'язів та суспензію еритроцитів які інкубували в системі неферментативного аскорбатзалежного ПОЛ протягом 1 год при температурі 37 °C у водяному термостаті ІТЖ-0-03.

Дослідні групи гомогенати печінки, скелетних м'язів й суспензію еритроцитів, в яких попередньо активували систему неферментативного ПОЛ як у контрольній групі тканин, а потім протягом 3 та 6 годин інкубували при температурі 37 °C у водяному термостаті ІТЖ-0-03 з розчинами препарату «Кораген» з розведенням 1:10 (20 г/л), 1:100 (2 г/л) та 1:1000 (0,2 г/л). Вибір ступеня розведення препарату обумовлений пошуком найбільш небезпечної концентрації препарату щодо впливу на окисно-відновний гомеостаз досліджуваних тканин в умовах експерименту, зокрема варіант розведення препарату 1:100 відповідає рекомендованій дозі інсектициду в умовах боротьби із шкідниками з урахуванням розведення препарату у інкубаційному середовищі.

Для оцінки інтенсивності вільнорадикальних процесів за дії досліджуваного препарату в умовах штучно індукованого окисного стресу, визначали наступні

показники: вміст проміжного продукту ПОЛ – малонового діальдегіду (МДА), а також каталазну та супероксиддисмутазну активність. Спрямованість вільнорадикальних процесів у бік анти- або прооксидантної компоненти оцінювали за розрахунком фактору антиоксидантного стану (ФАОС), який розраховували за співвідношенням активностей СОД та каталази та вмісту МДА:

$$\text{ФАОС} = \frac{\text{СОД-активність} \times \text{Каталазна активність}}{\text{МДА}}$$

Інтенсивність перебігу окисних процесів оцінювали за накопиченням кінцевого продукту ПОЛ – МДА. Для цього до 1 мл отриманого після інкубації розчину додавали 2 мл охолодженої 20 %-вої трихлороцтової кислоти (ТХО). Утворений розчин поміщали на 12 год. у холодильник, після чого проби центрифугували при 4000 об./хв. До 1 мл супернатанту додавали 2 мл 0,8 %-вого розчину тіобарбітурової кислоти (ТБК) та поміщали на 10 хв. у киплячу водяну баню. Відомо, що при високій температурі в кислому середовищі МДА реагує з 2-ТБК, утворюючи забарвлений азометиновий комплекс із максимумом поглинання при 532 нм. Для підвищення ефективності визначення МДА у проби вносили 4 мл н-бутанолу та вимірювали оптичну густину бутанольних екстрактів. Молярний коефіцієнт екстинкції цього комплексу (ϵ) становить $1,56 \times 10^5 \text{ см}^{-1} \times \text{М}^{-1}$ (Buddi et al., 2002).

Супероксиддисмутазну активність визначали за реакцією інгібування аутоокиснення адреналіну. Інкубаційна суміш містила: 2,5 мл карбонатного буферу (0,2 М, рН=10,6), 50 мкл 0,1 %-го розчину адреналіну та 0,5 мл досліджуваної речовини, потім її ретельно і швидко перемішували, поміщали в спектрофотометр і вимірювали величину оптичної щільності при довжині хвилі 347 нм через 30 с. з інтервалом 3 хв. (Brazhko et al., 2009). СОД-активність виражали у відсотках інгібування окиснення адреналіну.

Каталазну активність визначали за методом (Luna et al., 2005). Для цього до 3,0 мл 0,05 М калій-фосфатного буферного розчину додавали 20 мкл біологічного матеріалу, 10 мкл 3 % розчину пероксиду водню, суміш перемішували та при 240 нм вимірювали час, необхідний для зменшення оптичної густину розчину на 0,05. Вибір довжини хвилі

обумовлен абсорбційним максимумом поглинання перекису водню.

Кількість загального білка у тканинах визначали за екстинцією забарвлених у синій колір комплексів білка з йонамі Купрума у лужному середовищі в присутності солей винної кислоти (сегнетова сіль) (Korylchuk & Nikolaychuk, 2019). Для цього до 0,1 мл розчину білка (гомогенат печінки та м'язів, гемолізат еритроцитів) додавали 2 мл суміші реактивів А (Na_2CO_3 2 % в NaOH : 2 г $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow$ до 100 г 0,1Н розчином NaOH) та Б (1 г $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 + 300$ мл води $\rightarrow$ озичняємо та додаємо 0,5 г $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ до 100 мл.) та перемішували. Через 10 хв. до розчину додавали 0,5 мл реактиву Фоліна та знов перемішували. Через 45 хв. вимірювали оптичну щільність отриманих забарвлених розчинів на спектрофотометрі UV-1200 при довжині хвилі 750 нм. Вимірювання здійснювали проти холостої проби, що не містила білка. Для порівняння готували серію стандартних розчинів білка (сироватковий альбумін бика) та будували калібрувальний графік.

Статистичну обробку отриманих даних проводили за допомогою комп'ютерної програми Microsoft Excel загальноприйнятими методами варіаційної статистики з використанням t-критерію Ст'юдента (Prylutsky & Ilchenko, 2017). Статистично значущими вважали результати, для яких $p < 0,05$.

Результати дослідження та обговорення

У системі неферментативного ПОЛ у гомогенатах печінки та м'язів і суспензії еритроцитів, отриманих з інтактних тварин на першому етапі, визначали вміст ТБК-активних продуктів, а саме МДА як проміжного продукту ПОЛ при дії чинників різної природи на біологічні системи різних екологічних ланок (Osoba, 2009).

Встановлено (табл. 1), що в умовах модельованого окисного стресу вміст цього продукту ПОЛ суттєво залежить від типу досліджуваної тканини, часу інкубації, а також ступеня розведення препарату. Крім того, вміст МДА при 6-ти годинній інкубації у всіх дослідних варіантах у порівнянні з 3-х годинною інкубацією має тенденцію до збільшення, при цьому при визначенні його у суспензії еритроцитів зростання є статистично значущим.

Так, у гомогенатах печінки при 3-х год. інкубації вміст МДА при використанні препарату у розведенні 1:10 статистично значуще зростає на 16,47 %, 1:100 – зменшується на 18,95 % ($p < 0,05$), а при розведенні 1:1000 достовірні зміни не виявляються. У суспензії еритроцитів застосування інсектициду у розведенні 1:10 та 1:100 стимулює процеси ПОЛ (вміст МДА статистично значуще зростає відповідно на 38,48 та 27,55 %), проте при розведенні 1:1000 відмічається його зменшення на 32,54 % ($p < 0,05$). Слід відмітити, що спрямованість анти/прооксидантних відхилень є однаковою як при 3-х, так і при 6-ти годинній інкубації тканин.

Водночас, у гомогенатах м'язів спостерігається пригнічення процесів ПОЛ при використанні препарату у розведеннях 1:10 та 1:1000 – вміст МДА при цьому знижується, відповідно, на 36,52% й 30,86 % (3-х годинна інкубація) та на 32,65 % й 38,55 % (6-ти годинна інкубація) ($p < 0,05$). При дії препарату у розведенні 1:100 виявляються різноспрямовані зміни у вмісті ТБК-активних продуктів: при інкубації 3 год. вміст МДА статистично значуще зростає на 24,53 %, а при 6-ти годинній інкубації зменшується на 15,19 %.

Аналіз концентраційних залежностей свідчить про активацію процесів ПОЛ у печінці та суспензії еритроцитів при обох експозиціях при розведенні препарату 1:10, а також у

суспензії еритроцитів при обох експозиціях та у м'язах при 3-х годинному впливі при використанні препарату в розведенні 1:100.

У той же час пригнічення пероксидації ліпідів відмічається в обох експозиціях у м'язах при використанні препарату в розведенні 1:10; у печінці при розведенні 1:100 (експозиція 3 та 6 год.) та у м'язах при експозиції препарату 6 год.

Також слід зазначити, що розведення препарату 1:1000 у печінці в усіх варіантах дослідів не впливає на вміст МДА (зменшення не є статистично значущим), а у суспензії еритроцитів та у гомогенатах м'язів спостерігається пригнічення процесів ПОЛ та вірогідне зменшення вмісту МДА. Останнє може бути пов'язане з активацією ферментативної ланки системи АОЗ.

Таким чином, аналіз спрямованості та інтенсивності вільнорадикальних процесів за рівнем МДА свідчить про найбільший прооксидантний вплив на печінку при застосуванні препарату у розведенні 1:10, на суспензію еритроцитів – у розведенні 1:10 та 1:100, а найменший вплив вільних радикалів виявляється для гомогенатів м'язів при 3-х год. експозиції.

Слід відмітити особливості впливу варіанту розведення препарату 1:100, оскільки це відповідає рекомендованій дозі інсектициду в умовах боротьби із шкідниками з урахуванням розведення препарату у інкубаційному середовищі.

Таблиця 1

Вміст малонового діальдегіду у тканинах коропа при дії препарату «Кораген» на фоні штучно індукованого окисного стресу (нмоль/г тканини), $M \pm m$, $n=5$

Варіант дослідів	Досліджувана тканина					
	Гомогенат печінки		Суспензія еритроцитів		Гомогенат м'язів	
Час інкубації	3 год.	6 год.	3 год.	6 год.	3 год.	6 год.
Контроль	225,3 ± 17,2	255,2 ± 19,3	42,1 ± 2,8	56,2 ± 3,4 [#]	74,2 ± 4,3	88,2 ± 5,4
Розведення 1:10	262,4 ± 19,3*	293,1 ± 21,3*	58,3 ± 3,5*	74,4 ± 4,1*	47,1 ± 3,1*	59,4 ± 3,6*
Розведення 1:100	182,6 ± 12,4*	215,7 ± 16,5*	53,7 ± 2,2*	69,8 ± 4,7*	92,4 ± 5,3*	74,8 ± 4,9*
Розведення 1:1000	221,5 ± 14,6	248,2 ± 18,1	28,4 ± 1,5*	34,5 ± 2,8*	51,3 ± 3,8*	54,2 ± 3,7*

Примітка: * - $p < 0,05$ відносно контролю

Відомо, що СОД є ферментом первинного антиоксидантного захисту, що запобігає утворенню пероксидів полієнових жирних кислот клітинних мембран та мембран субклітинних утворень, що є наслідком функціонування вільно-радикального шляху

використання кисню (Martines-Alvarez et al., 2005).

Результати досліджень, проведених *in vitro*, свідчать про залежність СОД-активності гомогенатів печінки, м'язів та суспензії еритроцитів від часу інкубації та ступеня розведення препарату (табл. 2).

Таблиця 2

Супероксиддисмутазна активність у тканинах коропа при дії препарату «Кораген» на фоні штучно індукованого окисного стресу, (у.о./г тканини), $M \pm m$, $n=5$

Варіант досліджу	Досліджувана тканина					
	Гомогенат печінки		Суспензія еритроцитів		Гомогенат м'язів	
Час інкубації	3 год.	6 год.	3 год.	6 год.	3 год.	6 год.
Контроль	25,3 ± 1,6	28,2 ± 1,8	15,1 ± 0,8	12,2 ± 1,4	11,2 ± 1,3	8,2 ± 0,5
Розведення 1:10	21,4 ± 1,3*	33,4 ± 2,5*	11,5 ± 1,2*	9,6 ± 0,4*	14,7 ± 1,1*	10,7 ± 0,8*
Розведення 1:100	32,6 ± 2,1*	38,6 ± 2,3*	10,7 ± 1,4*	8,9 ± 0,6*	8,1 ± 0,5*	10,5 ± 1,1*
Розведення 1:1000	27,1 ± 1,8	30,2 ± 1,9	14,8 ± 1,1	13,7 ± 1,3	12,4 ± 0,9	10,9 ± 1,4*

Примітка: * - $p < 0,05$ відносно контролю

Так, у печінці статистично значуща активація ферменту на 18,43 % спостерігається при застосуванні препарату у розведенні 1:10 при 6-ти годинній інкубації, а також в усіх інших дослідних варіантах, окрім 3-х годинної інкубації, де відмічається пригнічення активності ферменту на 15,42 %. Проте при дії препарату у розведенні 1:1000 збільшення активності ферменту не є статистично значущим.

В еритроцитах при застосуванні препарату в усіх варіантах розведення та обох експозиціях активність первинної ланки АОЗ зменшується ($p < 0,05$), проте при розведенні 1:1000 статистично значущих змін не виявлено. Відповідне зниження активності ферменту при 3-год експозиції становить 23,84 та 29,14 %, а при 6-год обробці препаратом – 21,31 та 27,05 %.

Зростання СОД-активності відмічається і у м'язах в усіх дослідних варіантах, окрім 3-год експозиції при використанні інсектициду в розведенні 1:100. Зокрема при 3-год експозиції при дії розведень 1:10 та 1:1000 відмічено збільшення активності ферменту на 31,25 % та 10,71 %.

Виявлені нами зміни при цьому можуть розглядатися як можлива відповідь системи АОЗ на окисний стрес, викликаний дією речовиною препарату «Кораген».

Таким чином, найбільш стійкою до дії препарату є печінка та м'язи, а пригнічення СОД-активності та, ймовірно, посилення окисного стресу спостерігається у еритроцитах, що підтверджується і збільшенням у них вмісту ТБК-активних продуктів (табл.1), зокрема МДА.

Відомо, що в основу механізмів знешкодження пероксид водню, що є продуктом вільно-радикального шляху використання кисню, покладена каталітична дія ферментів-оксидоредуктаз, зокрема каталази (Latyshko et al., 2000). Утилізується пероксид водню у мітохондріях, мікосомлах, пероксисомлах та мембранах. Генерація та каталітичне розщеплення H_2O_2 у клітині контролюються ферментативно і жорстко детермінованими. Каталаза здійснює каталітичне розщеплення H_2O_2 через каталазну або пероксидазну реакції. Нами була досліджена пероксидазна реакція каталітичної дії каталази та доведено зміни каталазної активності в залежності від часу інкубації та концентрації інсектициду (табл.3). Так, при дослідженні впливу препарату при його використанні у розведенні 1:10 статистично значуще зростання каталазної активності спостерігається лише у печінці при обох експозиційних витримках: на 27,07 % при 3-х год та 21,07 % при 6 год. експозиції. Проте у еритроцитах та м'язах фермент пригнічується при обох експозиціях при розведенні препарату 1:10.

Так, відповідне зниження активності у еритроцитах становить 25,90 та 26,48 %, а у м'язах – 36,34 та 29,87 %. У той же час при розведенні препарату до так званої «польової концентрації» (1:100) відмічаються протилежні зміни: у печінці (інкубація 3 та 6 год.) та еритроцитах (інкубація 3 год.) каталазна активність зменшується: на 24,35 та 36,57 % у печінці та 34,26 % у еритроцитах, а у інших варіантах впливу зростає ($p < 0,05$): на 23,68 % у еритроцитах при 6 год інкубації та

у м'язах на 30,09 та 31,86 % при 3-х та 6-ти год інкубації відповідно. Щодо розведення 1:1000, то спостерігаються різноспрямовані зміни активності ферменту в залежності від часу інкубації. Так, 3-х годинний вплив препарату у печінці активує фермент (тенденція), а у еритроцитах та м'язах,

навпаки, його інгібує ($p < 0,05$) відповідно на 29,08 та 31,94 %. Проте при 6-ти годинній інкубації встановлена зворотна зміна активності: у печінці каталазна активність має тенденцію до зниження, а у інших тканинах – до зростання (у м'язах статистично значуще, на 25,44 %).

Таблиця 3

Каталазна активність у тканинах коропа при дії препарату «Кораген» на фоні штучно індукованого окисного стресу, (у.о./г тканини), $M \pm m$, $n=5$

Варіант досліджу	Досліджувана тканина					
	Гомогенат печінки		Суспензія еритроцитів		Гомогенат м'язів	
Час інкубації	3 год.	6 год.	3 год.	6 год.	3 год.	6 год.
Контроль	77,2 $\pm$ 5,4	84,5 $\pm$ 5,8	25,1 $\pm$ 1,7	32,1 $\pm$ 2,2	43,2 $\pm$ 3,3	45,2 $\pm$ 3,4
Розведення 1:10	98,1 $\pm$ 7,3*	102,3 $\pm$ 7,2*	18,6 $\pm$ 1,3*	23,6 $\pm$ 2,4*	27,5 $\pm$ 1,8*	31,7 $\pm$ 2,8*
Розведення 1:100	58,4 $\pm$ 3,6*	53,6 $\pm$ 3,4*	16,5 $\pm$ 1,9*	39,7 $\pm$ 2,6*	56,2 $\pm$ 3,4*	59,6 $\pm$ 4,2*
Розведення 1:1000	84,5 $\pm$ 6,8	71,6 $\pm$ 5,9	17,8 $\pm$ 1,4*	37,4 $\pm$ 2,1*	29,4 $\pm$ 3,5*	56,7 $\pm$ 3,7*

Примітка: * - $p < 0,05$ відносно контролю

Таким чином, каталазна активність досліджуваних тканин відображає зміни як у активності ферментів АОЗ, так і у кількості продуктів ПОЛ, оскільки пероксид водню є складовою ланки вільнорадикального утворення МДА (Saliga, 2013). При цьому тканиною, найбільш чутливою щодо ушкоджувальної дії пероксиду водню, є суспензія еритроцитів та м'язи (при застосуванні препарату в розведенні 1:10 та 1:1000), а також печінка (розведення 1:100).

Для інтегральної оцінки анти-/прооксидантного статусу ізольованих тканин коропа в умовах експерименту нами були розраховані значення фактору антиоксидантного стану, який дозволяє оцінити потужність системи АОЗ до дії токсичних або

абіотичних чинників довкілля на тварин (Arteni et al., 2010) (табл. 4).

Встановлені зміни у загальному антиоксидантному статусі тканинних ізолятів в умовах експерименту та його залежність від концентрації препарату та часу експозиції. Зокрема, показано, що найбільше послаблення системи АОЗ в умовах експерименту має місце у суспензії еритроцитів (розведення препарату 1:10 та 1:100) та у м'язах при 3-х годинній експозиції препарату (розведення препарату 1:100).

Відповідне зниження ФАОС у еритроцитах становить 61,8 та 64,04 % при експозиції 3 год і 56,52 та 27,54 % при 6 год обробці досліджуваних зразків препаратом ($p < 0,05$), а у м'язах відмічене зменшення ФАОС становить 27,54 %.

Таблиця 4

Фактор антиоксидантного стану у тканинах коропа при дії препарату «Кораген» на фоні штучно індукованого окисного стресу, $M \pm m$, $n=5$

Варіант досліджу	Досліджувана тканина					
	Гомогенат печінки		Суспензія еритроцитів		Гомогенат м'язів	
Час інкубації	3 год.	6 год.	3 год.	6 год.	3 год.	6 год.
1	2	3	4	5	6	7
Контроль	8,6 $\pm$ 0,4	9,2 $\pm$ 0,6	8,9 $\pm$ 0,6	6,9 $\pm$ 0,4	6,4 $\pm$ 0,4	4,1 $\pm$ 0,3

Продовження таблиці 4

1	2	3	4	5	6	7
Розведення 1:10	7,9 ± 0,5	11,5 ± 0,8	3,4 ± 0,2*	3,0 ± 0,2*	8,0 ± 0,5*	5,6 ± 0,3*
Розведення 1:100	10,2 ± 0,7*	9,4 ± 0,6	3,2 ± 0,3*	5,0 ± 0,4*	4,9 ± 0,2*	8,4 ± 0,5*
Розведення 1:1000	10,3 ± 0,6*	8,9 ± 0,5	8,5 ± 0,6	14,1 ± 1,2*	7,1 ± 0,6	11,3 ± 1,2*

Примітка: * - $p < 0,05$ відносно контролю

Проте у печінці спостерігаємо різнонаправлені зміни у даному показнику: при дії розведення препарату 1:10 при 3-х год експозиції має місце тенденція до зниження антиоксидантного статусу тканини, а при 6 год – навпаки, тенденція до збільшення, але результати не є статистично значущими; розведення препарату 1:100 та 1:1000 викликає посилення ФАОС, при цьому при 3 год експозиції відмічаємо статистично значуще зростання показника відповідно на 18,6 та 19,77 %, а при 6 год інкубації можна констатувати тенденцію до посилення системи АОЗ. Також слід відмітити, що 6 год. експозиція гомогенатів м'язів викликає посилення ФАОС в усіх концентраційних варіантах впливу препарату: на 36,59 % при розведенні 1:10, на 104,87 % при розведенні 1:100 та на 175,61 % при розведенні 1:1000.

Таким чином, найбільшого ушкодження зазнають мембранні ліпіди еритроцитів, що посилює окисну деструкцію гемоглобіну та порушує його фізіолого-біохімічну роль.

Висновки

Встановлено вплив препарату «Кораген» на процеси ПОЛ та ферменти АОЗ у тканинах коропа та особливості цього впливу щодо різних тканин, що може стати у нагоді для розробки більш безпечних інсектицидів-похідних хлорантраніліпролу та пошуку шляхів захисту людини і тварин від їх ушкоджувальної дії у районах їх агрохімічного застосування.

Показано збільшення вмісту МДА у печінці (при розведенні препарату 1:10), у суспензії еритроцитів (розведення 1:10 та 1:100) та у гомогенатах м'язів (розведення

1:100) при інкубації 3 год. Натомість зниження вмісту МДА виявлено у м'язах (розведення 1:10, експозиція 3 та 6 год.), у печінці (розведення 1:100, експозиція 3 та 6 год.) та у м'язах (6-ти год.).

Встановлено зростання СОД-активності у печінці (розведення 1:10, інкубація 6 год., а також усі інші дослідні варіанти, окрім інкубації 3 год. при розведенні 1:10, за якої його активність знижується). Зростання СОД-активності виявлено і у м'язах в усіх дослідних варіантах, окрім 3-х годинного впливу (розведення 1:100). В еритроцитах СОД-активність, навпаки, зменшується (усі розведення, крім 1:1000, експозиції 3 і 6 год.).

Виявлено, що при застосуванні розведення 1:10 каталазна активність зростає лише у печінці, а у еритроцитах та м'язах вона знижується. При розведенні 1:100, навпаки, у печінці (інкубація 3 та 6 год.) та еритроцитах (інкубація 3 год.) каталазна активність зменшується, а у інших варіантах впливу зростає. При розведенні 1:1000 встановлено різноспрямовані зміни активності ферменту залежно від часу інкубації.

З розрахованих значень фактору АОЗ встановлено, що найбільше послаблення системи АОЗ в умовах експерименту має місце у еритроцитах (розведення препарату 1:10 та 1:100) та у м'язах при експозиції препарату 3 год, проте у печінці (3-годинна дія препарату) і у м'язах (6-годинна дія) встановлено посилення системи АОЗ.

Таким чином у модельованих токсикологічних умовах показана тканинна та концентраційна специфічність дії активного компонента препарату «Кораген» на організм коропа, що слід враховувати при проведенні агрохімічних заходів поблизу річок, озер або інших відкритих водних джерел.

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 (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

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

Arteni, O., Olteanu, Z., Oprică, L., & Bălan, M. (2010). Researches on the activity of oxidoreductases from tissues harvested in different stages of development at *Cyprinus carpio*. *Secțiunea Genetică și Biologie Moleculară*, 11, 83-86.
<https://www.researchgate.net/publication/255962006> Researches on the activity of oxidoreductases from tissues harvested in different stages of development at *Cyprinus carpio*

Brazhko, O., Zavgorodniy, M., Kruglyak, O., Omelyanchyk, L. & Shapoval, G. (2015). Antioxidant activity of alkoxy-substituted (hinol-4-ylthio) carboxylic acids. *Ukrainian Biochemical Journal*, 87(2). pp. 95-102.
<http://dx.doi.org/10.15407/ubj87.02.095> (in Ukrainian)

Бражко О., Завгородній М., Кругляк О., Омелянчик Л., Шаповал, Г. Антиоксидантна активність алкоксизаміщених (хінол-4-ілтіо) карбонових кислот. *Український біохімічний журнал*. 2015. Т. 87, № 2. С. 95-102. <http://dx.doi.org/10.15407/ubj87.02.095>

Buddi, R., Lin, B., & Atilano S. (2002). Evidence of oxidative stress in human corneal diseases. *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 50(3), 341-351. <https://doi.org/10.1177/002215540205000306>

Escobales, N., Crespo, M., & Escobales, N. (2005). Oxidative-nitrosative stress in hypertension. *Current Vascular Pharmacology*, 3, 231-246. <https://doi.org/10.2174/1570161054368643>

Honcharuk, E., & Korshun, M. (2004). Free radical oxidation as a universal nonspecific mechanism of damaging effects of harmful environmental factors. *Journal of the Academy of Medical Sciences of Ukraine*, 10(1), 131-150.
https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=DPOXZN4AAAAJ&citation_for_view=DPOXZN4AAAAJ:eQOLeE2rZwMC (in Ukrainian)

Гончарук, Є., Коршун, М. Вільно-радикальне окислення як універсальний неспецифічний механізм пошкоджуючої дії шкідливих чинників довкілля. *Журнал АМН України*. 2004. Т.10, № 1. С. 131-150.
https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=DPOXZN4AAAAJ&citation_for_view=DPOXZN4AAAAJ:eQOLeE2rZwMC

Karlova, L.V., Pryshedko, V.M., Begma, N. A., & Dutka, V. R. (2023). Hematological indicators of the blood of males and females of the Ukrainian scaled carp breed. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural sciences / Articles*, 25(98), 40-46. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a9807> (in Ukrainian)

Карлова Л.В., Пришедько В.М., Бегма Н.А. Гематологічні показники крові самців і самок української лускатої породи коропа. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С.З. Гжицького. Серія: Сільськогосподарські науки*, 2023, Т. 25, № 98. С. 40-46. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a9807>

Kopylchuk, G. P., & Nikolaychuk, I.M. (2019). Laboratory practical in biochemistry: teaching-methodical manual. Chernivtsi: Chernivtsi National University named after Yu. Fedkovych. <https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/3148> (in Ukrainian)

Копильчук Г.П., Николайчук І.М. Лабораторний практикум із біохімії: навч.-метод. посібник. Чернівці: Чернівець нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2019. 144 с. <https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/3148>

Latyshko, H., Gudkova, L., & Gudkova, O. (2000). Catalytic properties of *Penicillium vitale* catalase. Peroxidase reaction of the enzyme. *Biopolymers and the cell*, 16(6), 505-509. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/d6eaf102-14e0-4b18-8126-5a59e7b4a131/content> (In Ukrainian)

Латишко, Н., Гудкова, Л., Гудкова, О. Каталітичні властивості каталази *Penicillium vitale*. Пероксидазна реакція ферменту. *Біополімери і клітина*. 2000. Т.16, №6. С. 505-509. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/d6eaf102-14e0-4b18-8126-5a59e7b4a131/content>

Luna, C. M., Pastori, G. M., Driscoll, S., Groten, K., Bernard, S., & Foyer, C. H. (2005). Drought control on H₂O₂ accumulation, catalase (CAT) activity and CAT gene expression in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 56(411), 417-423. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri039>

Martines-Alvarez, R., Morales, A., & Sanz, A. (2005). Antioxidant defenses in fish: biotic and abiotic factors. *Review in Fish Biology and Fisheries*, 15(1), 75-88. <https://doi.org/10.1007/s11160-005-7846-4>

Nizhenkovska, I., Nizhenkovsky, O., & Vilchynska, V. (2012). Lipoperoxidation processes and the state of the AO system in the myocardium of rats under conditions of intoxication with anthracycline antibiotics. *Modern Problems of Toxicology*, 2, 45-47. http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/toxicology/2012/2_2012/str45.pdf (in Ukrainian)

Ніженковська І., Ніженковський О., Вільчинська В. Процеси ліпопероксидації та стан АО системи в міокарді щурів за умов інтоксикації антрацикліновими антибіотиками. *Сучасні проблеми токсикології*. 2012. № 2. С. 45-47. http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/toxicology/2012/2_2012/str45.pdf

Osoba, I. (2009). Peculiarities of the functioning of the antioxidant defense system of the organism. *Fisheries Science of Ukraine*, (1), 133-139. https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=rnu_2009_1_27 (In Ukrainian)

Особа І. Особливості функціонування системи антиоксидантного захисту організму. *Рибогосподарська наука України*. 2009. № 1. С. 133-139. https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=rnu_2009_1_27

Pesticide Fact Sheet: Chlorantraniliprole. (2008). Available at: https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-090100_01-Apr-08.pdf

Prylutsky, Y., & Ilchenko, O. (2017). Statistical Methods in Biology: Textbook. Naukova Dumka. <https://www.biochemistry.org.ua/images/kosterin/monograf/Статистичні-методи-в-Біології.pdf> (in Ukrainian)

Прилуцький Ю., Ільченко О. *Статистичні методи в біології: Підручник*, Київ: Наукова думка. 2017. <https://www.biochemistry.org.ua/images/kosterin/monograf/Статистичні-методи-в-Біології.pdf>

Saliga, Y. (2013). Superoxide dismutase and catalase activity in rat tissues during chronic chlorpyrifos intoxication. *Bulletin of the Zaporizhia National University. Biological Sciences*, (2), 108-114. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vznu_bio_2013_2_17 (in Ukrainian)

Салига Ю. Супероксиддисмутаза і каталазна активність у тканинах щурів за хронічної інтоксикації хлорпірифосом. *Вісник Запорізького національного університету. Біологічні науки*. 2013. № 2. С. 108-114. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vznu_bio_2013_2_17

Shen, J., Griffiths, P.T., Campbell, S.J., Utinger, B., Kalberey, M., & Paulson, S.E. (2021). Ascorbate oxidation by iron, copper and reactive oxygen species: review, model development, and derivation of key rate constants. *Scientific Reports*, 11, 7417. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86477-8>

Received: 28.06.2026. **Accepted:** 06.08.2026. **Published:** 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Смольський О. Вільно-радикальні процеси у тканинах коропа за токсичного впливу препарату «Кораген» в умовах *in vitro*. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 155-164. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.12>

Cite this article in APA style as:

Smolsky, O. (2026). Vilno-radykalni protsesy u tkanyakh koropa za toksychnoho vplyvu preparatu «Koragen» v umovakh *in vitro* [Free radical processes in carp tissues under the toxic influence of the preparation "Koragen" in *in vitro* conditions]. *Biota. Human. Technology*, (2), 155-164. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.12> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Smolsky O. [in Ukrainian: **Смольський О.**], Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Prof., email: alexsmolsky@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7942-3414 Scopus-Author ID: 56165706900 ResearcherID: ABH-8893-2022
Department of Chemistry, Technology and Pharmacy, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

UDC 597.551.213:577.113:582.281.21

DOI: 10.58407/bht.2.26.13



Copyright (c) 2026 Dmytrii Filonenko, Maryna Yachna, Olha Mekhed, Oleksandr Tretiak

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/).

Дмитрій Філоненко, Марина Ячна, Ольга Мехед, Олександр Третяк

БІОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТА КЛІТИННО-ГЕНЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОБМІНУ
НУКЛЕЇНОВИХ КИСЛОТИ У ТКАНИНАХ КАРАСЯ ЗА ДІЇ МІКОТОКСИНІВ

Dmytrii Filonenko, Maryna Yachna, Olha Mekhed, Oleksandr Tretiak

BIOCHEMICAL PARAMETERS AND CYTO-GENETIC ASPECTS OF NUCLEIC ACID
METABOLISM IN CRUCIAN CARP TISSUES UNDER THE INFLUENCE OF MYCOTOXINS

АНОТАЦІЯ

Інтенсифікація промислової аквакультури та сучасні зміни клімату підвищують ризик контамінації рибних кормів і водного середовища мікотоксинами, що вимагає глибокого розуміння молекулярних механізмів їхньої патогенної дії. Традиційні патоморфологічні дослідження дедалі частіше доповнюються тонкими молекулярно-генетичними та цитологічними тест-системами, здатними фіксувати порушення гомеостазу гідробіонтів на субклітинному рівні. Особливу загрозу для стабільності іхтіоценозів становить хронічне аліментарне надходження біологічних контамінантів – афлатоксину В1 (АФВ1) та Т-2 токсину, які безпосередньо вражають генетичний апарат і пластичний обмін клітин-мішеней. У зв'язку з цим актуальним є біохімічне та цитогенетичне обґрунтування інформативності маркерів нуклеїнового метаболізму для ранньої діагностики мікотоксикозів у риб.

Мета роботи - з'ясувати цитологічні та генетичні механізми порушень нуклеїнового обміну в клітинах різних органів риб (печінки, м'язів, зябер та мозку) за ізольованої та комбінованої дії афлатоксину В1 і Т-2 токсину.

Методологія ґрунтувалася на системному аналізі, компаративному оцінюванні та узагальненні результатів сучасних натурних і експериментальних іхтіотоксикологічних досліджень світового та вітчизняного наукового простору. Предметом аналізу виступали закономірності кількісних зрушень вмісту РНК, динаміка інтегрального індексу пластичного обміну (співвідношення РНК/ДНК), а також флуктуації активності гідролітичних ферментів нуклеїнового метаболізму (кислої та лужної ДНКаз і РНКаз) у клітинах корошових риб за умов інтоксикації.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному розкритті й систематизації мультирівневих патологічних ефектів мікотоксинів на біосинтезувальний та генетичний апарати клітин риб. Уперше концептуалізовано відмінності між цитогенетичною дією АФВ1 (через метаболічну активацію до епоксидів та блокування транскрипції) і Т-2 токсину (через ініціацію риботоксичного стресу та інгібування трансляції), а також теоретично обґрунтовано механізм їхньої одночасної дії за умов мікст-контамінації, що призводить до тотального колапсу нуклеїнового обміну.

Висновки. Доведено, що ізольований та сумісний вплив мікотоксинів викликає системний регрес пластичного балансу, знижуючи рівень РНК (до 41,7 %) та коефіцієнт РНК/ДНК (до 25,3 %) в усіх досліджених органах з найбільшим проявом у печінці та мозку. Встановлено, що ключовим молекулярно-генетичним тригером деградації нуклеїнових кислот є стійка активація ДНКаз та РНКаз (в ~1,8 раза), яка цитологічно супроводжується руйнуванням ультраструктури гранулярного ендоплазматичного ретикулу, деградацією ядерець, каріолізісом та запуском апоптозу. Отримані результати обґрунтовують доцільність практичного впровадження маркерів нуклеїнового обміну до мультимаркерних панелей моніторингу здоров'я риб в індустріальній аквакультурі.

Ключові слова: іхтіотоксикологія, аквакультура, афлатоксин В1, Т-2 токсин, нуклеїновий обмін, РНК, коефіцієнт РНК/ДНК, ДНКаз, РНКаз, риботоксичний стрес, апоптоз

ABSTRACT

The intensification of industrial aquaculture and current climate changes increase the risk of mycotoxin contamination in fish feed and the aquatic environment, which requires a profound understanding of the molecular mechanisms of their pathogenic action. Traditional pathomorphological studies are increasingly being supplemented by subtle molecular genetic and cytological test systems capable of recording homeostatic disturbances in hydrobionts at the subcellular level. A particular threat to the stability of ichthyocenoses is posed by the chronic dietary intake of biological contaminants, specifically aflatoxin B1 (AFB1) and T-2 toxin, which directly affect the genetic apparatus and plastic metabolism of target cells. In this regard, the biochemical and

cytogenetic substantiation of the informativeness of nucleic acid metabolism markers for the early diagnosis of mycotoxicoses in fish is highly relevant.

The aim of the work was to elucidate the cytological and genetic mechanisms of nucleic acid metabolism disorders in cells of various fish organs (liver, muscles, gills, and brain) under the isolated and combined action of aflatoxin B1 and T-2 toxin.

The methodology was based on a systematic analysis, comparative assessment, and generalization of the results of modern field and experimental ichthyotoxicological studies from the global and domestic scientific space. The subject of the analytical review was the regularities of quantitative shifts in RNA content, the dynamics of the integral index of plastic metabolism (RNA/DNA ratio), as well as fluctuations in the activity of hydrolytic enzymes of nucleic acid metabolism (acid and alkaline DNases and RNases) in the cells of cyprinid fish under intoxication conditions.

The scientific novelty of the work lies in the comprehensive disclosure and systematization of the multilevel pathological effects of mycotoxins on the protein-synthesizing and genetic apparatus of fish cells. For the first time, the differences between the cytogenetic action of AFB1 (via metabolic activation to epoxides and transcription blockade) and T-2 toxin (via initiation of ribotoxic stress and translation inhibition) have been conceptualized, and the mechanism of their synergism under conditions of mixed contamination, leading to a total collapse of nucleic acid metabolism, has been theoretically substantiated.

Conclusions. It has been proven that isolated and combined exposure to mycotoxins causes a systemic regression of the plastic balance, reducing the RNA level (by up to 41.7 %) and the RNA/DNA coefficient (by up to 25.3 %) in all studied organs, with the most pronounced manifestations in the liver and brain. It has been established that the key molecular genetic trigger of nucleic acid degradation is the stable activation of DNase and RNase (by ~1.8 times), which cytologically is accompanied by the destruction of the granular endoplasmic reticulum ultrastructure, nucleolar degradation, karyolysis, and the trigger of apoptosis. The obtained results substantiate the feasibility of the practical implementation of nucleic acid metabolism markers into multi-marker panels for monitoring fish health in industrial aquaculture.

Keywords: ichthyotoxicology, aquaculture, aflatoxin B1, T-2 toxin, nucleic acid metabolism, RNA, RNA/DNA ratio, DNase, RNase, ribotoxic stress, apoptosis

Вступ

Нуклеїнові кислоти є ключовими біополімерами живих організмів, що забезпечують зберігання, передачу та реалізацію генетичної інформації. Кількісні зміни вмісту ДНК і РНК у клітинах і тканинах є чутливими індикаторами функціонального стану організму та можуть відображати як адаптаційні, так і патологічні процеси, що виникають під дією факторів навколишнього середовища (Mekhed, 2013b; Afanasyeva & Chorei, 2024).

Підтримання стабільності нуклеїнового обміну є необхідною умовою нормального функціонування клітин, їх росту, диференціації та відтворення. Різноманітні ксенобіотики здатні порушувати ці процеси, впливаючи на цілісність ДНК, механізми реплікації, транскрипції та трансляції. Такі порушення призводять до змін клітинного метаболізму, пригнічення або активації синтетичних процесів та зниження адаптаційного потенціалу організму (Barany et al., 2021; Fornari et al., 2023).

Особливу небезпеку для гідробіонтів становлять мікотоксини – вторинні метаболіти плісневих грибів, які широко поширені у кормах і можуть потрапляти в організм риб через трофічний ланцюг. Результати сучасних досліджень свідчать про значне забруднення

кормової сировини та комбікормів афлатоксинами, трихотеценами та іншими мікотоксинами, які часто виявляються у вигляді комплексних контамінацій (Kovalsky et al., 2016; Koletsi et al., 2021; Gruber-Dorninger et al., 2025).

Афлатоксин В1 належить до найбільш токсичних і генотоксичних мікотоксинів. Він спричиняє порушення росту, метаболізму, функціонального стану печінки та цілісності тканин у риб різних видів (Barany et al., 2021; Liu et al., 2023). Окрім метаболічних ефектів, афлатоксин В1 здатний індукувати ушкодження ДНК, порушення транскрипційних процесів та активацію оксидативного стресу (Hassan, 2018; Strosnider et al., 2006).

На клітинному рівні дія мікотоксинів проявляється у зміні інтенсивності нуклеїнового обміну, порушенні експресії генів та активації компенсаторно-адаптаційних механізмів. У зв'язку з цим визначення кількісного вмісту ДНК і РНК у тканинах риб є інформативним підходом для оцінювання ступеня токсичного впливу та функціонального стану організму (Mekhed, 2013a; Filonenko & Mekhed, 2025).

Попередні дослідження свідчать, що токсиканти різної хімічної природи здатні викликати суттєві зміни вмісту нуклеїнових кислот у тканинах риб, що підтверджує чутливість цього показника до дії екзогенних

факторів (Mekhed, 2013a; Nikolaenko et al., 2023). Однак цитологічні та генетичні механізми змін нуклеїнового обміну під впливом мікотоксинів залишаються недостатньо вивченими.

Метою роботи було дослідити цитологічні та генетичні механізми змін нуклеїнового обміну в клітинах риб під впливом мікотоксинів та оцінити вміст ДНК і РНК як маркерів токсичного впливу.

Особливе місце серед екотоксикантів займають мікотоксини - токсичні вторинні метаболіти мікроскопічних грибів, які широко контамінують зернову сировину та комбікорми. У сучасних умовах розвитку аквакультури саме корми розглядаються як основний шлях надходження цих сполук до організму риб. Моніторингові дослідження останніх років свідчать про значне поширення афлатоксинів, дезоксиніваленолу, Т-2 токсину та інших мікотоксинів у кормах для аквакультури, причому досить часто вони трапляються у вигляді комбінованої контамінації, що посилює ризики токсичного впливу (Koletsy et al., 2021; Kovalsky et al., 2016; Gruber-Dorninger et al., 2025). Крім того, джерелом надходження мікотоксинів можуть бути й окремі харчові продукти, у яких регулярно виявляють афлатоксини різних типів (Mushtaq et al., 2012; Pickova et al., 2021).

Серед відомих мікотоксинів найбільшу небезпеку становить афлатоксин В1, який характеризується високою гепатотоксичною, мутагенною та канцерогенною активністю. Після потрапляння до організму він біотрансформується в реакційноздатні епоксидні метаболіти, що взаємодіють із ДНК, утворюючи ковалентні аддукти та порушуючи стабільність геному. Наслідком цього є розвиток мутацій, пригнічення синтезу нуклеїнових кислот, порушення експресії генів і активація процесів перекисного окиснення ліпідів (Strosnider et al., 2006; Hassan, 2018). Дослідження на різних видах риб підтверджують, що надходження афлатоксину В1 з кормом призводить до пригнічення росту, порушення білкового та ліпідного обміну, розвитку структурних ушкоджень печінки, а також змін функціонального стану інших органів і тканин (Barany et al., 2021; Liu et al., 2023).

Останніми роками значна увага приділяється дослідженню механізмів токсичної дії мікотоксинів саме у риб як чутливих біоіндикаторів стану водних

екосистем. Показано, що вплив Т-2 токсину та афлатоксину В1 супроводжується змінами морфофункціональних показників, інтенсивності перекисного окиснення ліпідів, біохімічного профілю та накопиченням токсичних сполук у тканинах коропових риб (Polotnianko & Mekhed, 2023; Polotnianko & Mekhed, 2024; Mekhed, 2024; Shkurko et al., 2024; Simonova & Mekhed, 2025a; Simonova & Mekhed, 2025b). Водночас здатність окремих мікроорганізмів до біодеградації мікотоксинів розглядається як перспективний напрям зниження токсичного навантаження у системах аквакультури, хоча ефективність таких підходів потребує подальших досліджень (Vanhoutte et al., 2016).

Власні дослідження та результати інших авторів свідчать, що зміни вмісту ДНК і РНК у тканинах риб можуть бути одними з найчутливіших індикаторів токсичного ураження ще до появи виражених морфологічних порушень. Показано, що токсиканти різної хімічної природи здатні викликати суттєві зміни інтенсивності нуклеїнового обміну, які відображають ступінь функціональної перебудови клітин і адаптаційні можливості організму (Mekhed, 2013a; Nikolaenko et al., 2023; Filonenko & Mekhed, 2025). Незважаючи на значний обсяг досліджень, механізми порушення нуклеїнового обміну під дією мікотоксинів, особливо на цитологічному та генетичному рівнях, залишаються недостатньо з'ясованими, що визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Матеріали та методи дослідження

Експериментальну частину дослідження проводили на дворічних особинах карася сріблястого (*Carassius gibelio*) масою тіла 250–350 г. Риб виловлювали у штучній водоймі Київської області, яка використовувалася як контрольна та не зазнавала впливу відомих техногенних джерел забруднення.

Досліди виконували в лабораторних умовах восени із використанням скляних акваріумів об'ємом 200 дм³. Щільність посадки становила одна особина на 40 дм³ води. Експозиція тривала 14 діб. Упродовж експерименту підтримували стабільний температурний режим водного середовища на рівні +15...+16 °С, а концентрацію розчиненого кисню - у межах 5–7 мг/дм³, що відповідає фізіологічним потребам досліджуваного виду. Для забезпечення належної якості водного

середовища повну заміну води здійснювали через кожні три доби.

Риб розподіляли на три експериментальні групи по п'ять особин у кожній. Контрольна група утримувалася без внесення токсичних сполук, тоді як у трьох дослідних групах моделювали вплив афлатоксину В1 у концентрації $1,0 \text{ мг/дм}^3$, мікотоксину Т-2 у концентрації $0,05 \text{ мг/дм}^3$ та сумісна дія В1 і Т-2 у зазначених концентраціях відповідно. Як джерело токсикантів використовували сертифіковані стандартні зразки TRILOGY (термін придатності до 06.2026), які зберігали відповідно до вимог паспорта стандарту за температури не вище 8°C .

Після завершення експозиції для подальших біохімічних досліджень відбирали тканини печінки, зябер, скелетних м'язів і головного мозку.

Визначення вмісту нуклеїнових кислот здійснювали спектрофотометричним методом. Для оцінки концентрації РНК реєстрували показники оптичної густини за довжин хвиль 260 і 286 нм, тоді як для ДНК вимірювання проводили при 268 та 284 нм. Співвідношення РНК/ДНК розглядали як інтегральний показник метаболічної активності клітин відповідно до методичних рекомендацій, наведених у роботі Афанасьєвої К. С. та Чопей М. І. (Afanasyeva & Chopei, 2024). Визначення активності нуклеаз проводили з використанням підходу, заснованого на оцінюванні ступеня ферментативної деградації нуклеїновокислотних субстратів (Radchenko et al., 2022).

Статистичне опрацювання отриманих результатів проводили із застосуванням методів варіаційної статистики за допомогою

програмного забезпечення Statistica 10.0. Для оцінки достовірності відмінностей між контрольною та дослідними групами використовували критерій Стюдента (t-критерій). Статистично значущими вважали відмінності при рівні значущості $p < 0,05$.

Результати дослідження та обговорення

Аналіз даних щодо вмісту ДНК у тканинах карася свідчить про наявність чітко виражених тканинних та токсикант-залежних змін. У контрольній групі найвищі значення ДНК відмічені у зябрах, а найнижчі – у м'язовій тканині, що відображає базові особливості інтенсивності клітинного обміну в різних органах. За дії афлатоксину В1 у концентрації $1,0 \text{ мг/дм}^3$ спостерігається зниження вмісту ДНК у всіх досліджуваних тканинах. Зменшення показника характерне для печінки та мозку, що вказує на високу чутливість цих органів до генотоксичної дії афлатоксину. У м'язовій тканині зміни є менш інтенсивними, що може свідчити про відносну стабільність її клітинного геному. При дії Т-2 токсину також відмічається зниження рівня ДНК, проте його вираженість дещо відрізняється від афлатоксину В1. У даному випадку зміни мають більш рівномірний характер між тканинами, хоча загальна тенденція залишається подібною. Це може бути пов'язано з переважним впливом Т-2 токсину на білоксинтетичні та мембранні процеси з вторинним ушкодженням нуклеїнових кислот. Комбінована дія афлатоксину В1 і Т-2 токсину призводить до найбільш вираженого зниження вмісту ДНК у всіх досліджуваних тканинах (рис. 1).

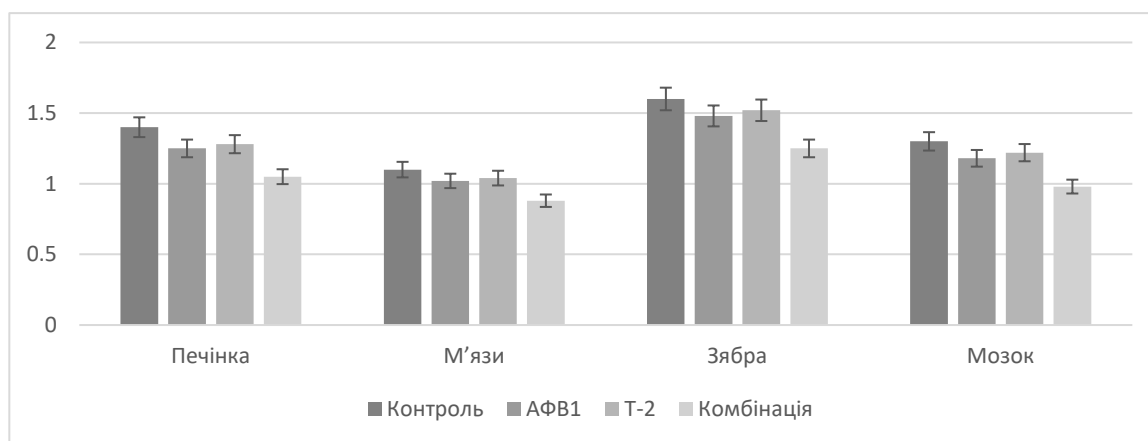


Рис. 1. Вміст ДНК у тканинах карася звичайного під впливом мікотоксинів (мг/г сирої маси, $M \pm m$)

Такий ефект свідчить про можливу комплексну взаємодію токсикантів на рівні ушкодження генетичного матеріалу. Найнижчі значення ДНК у комбінованій групі зафіксовані у печінці та мозку, що підтверджує їх високу метаболічну активність і вразливість. Отримані результати узгоджуються з даними про здатність мікотоксинів індукувати оксидативний стрес і фрагментацію ДНК. Загалом спостережувані зміни свідчать про дозо- та токсикант-залежний характер ушкодження нуклеїнових кислот. Таким чином, ДНК може розглядатися як чутливий маркер структурних порушень у клітинах риб під впливом мікотоксинів. Отримані модельні дані демонструють потенційне посилення

генотоксичного ефекту при комбінованій дії токсикантів. Це має важливе значення для оцінки екологічних ризиків у водних екосистемах.

Аналіз експериментальних даних свідчить про глибоке пригнічення нуклеїнового обміну в тканинах риб під впливом мікотоксинів, що виражається у суттєвому зниженні концентрації РНК порівняно з контрольними показниками. За умов ізольованої дії афлатоксину В1 (АФВ1) рівень РНК у печінці знижується на 20,0 %, у м'язах – на 18,0 %, у зябрах – на 20,8 %, а в мозку – на 18,6 %, що вказує на високу системну токсичність сполуки та її здатність блокувати транскрипційні процеси (Filonenko & Mekhed, 2025) (рис. 2).

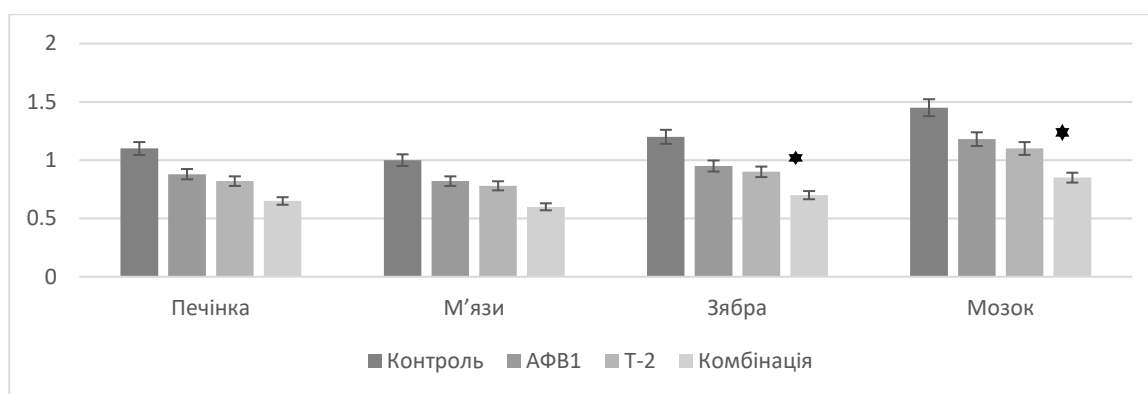


Рис. 2. Вміст РНК у тканинах карася звичайного під впливом мікотоксинів (мг/г сирої маси, $M \pm m$)

Цитологічним підґрунтям такого вираженого падіння є руйнування ультраструктури гепатоцитів та нейронів, зокрема деградація ядерців, відповідальних за збирання рибосомних субодиниць, та деструкція гранулярної ендоплазматичної сітки, на мембранах якої відбувається біосинтез білка. Генетичний механізм дії АФВ1 пов'язаний з його метаболічною активацією ферментами цитохрому до високореактивного епоксиду, який ковалентно зв'язується з молекулами нуклеїнових кислот, викликаючи структурні пошкодження матриці РНК та пригнічуючи синтез нових ланцюгів.

Дія Т-2 токсину спричиняла ще істотніше (суттєвіше) зниження вмісту РНК у досліджуваних органах: у печінці показник зменшується на 25,5 %, у м'язах – на 22,0 %, у зябрах – на 25,0 %, а в головному мозку – на 24,1 % відносно контролю. Цей трихотеносовий мікотоксин виявляє виражений

цитотоксичний ефект, оскільки є прямим та специфічним інгібітором пептидил-трансферазної активності еукаріотичних рибосом. Блокуючи стадії ініціації та елонгації трансляції, Т-2 токсин викликає швидку дисоціацію полісом, що запускає каскад внутрішньоклітинних сигналів риботоксичного стресу. На генетичному рівні цей процес супроводжується патологічною активацією клітинних нуклеаз, зокрема рибонуклеази (РНКази), активність якої зростає в 1,5 раза порівняно з нормою. Активовані ферменти інтенсифікують деградацію наявних пулів інформаційної та рибосомної РНК, що унеможливорює адекватну адаптивну відповідь клітин та блокує відновлювальні процеси.

Найбільш критичні зміни нуклеїнового метаболізму зафіксовані за комбінованого впливу АФВ1 та Т-2 токсину, що свідчить про

потужний ефект комплексної дії цих ксенобіотиків (Gruber-Dorninger et al., 2025). За умов мікст-токсикозу рівень РНК у печінці падає на 40,9 %, у м'язах – на 40,0 %, у зябрах – на 41,7 %, а в нервовій тканині мозку – на 41,4 % порівняно з контрольними значеннями. Сумісна дія токсинів призводить до тотального колапсу білоксинтезувального апарату клітини, викликаючи масові хромосомні аберації, фрагментацію ядер та індукцію генетично запрограмованої загибелі клітин. Цитологічно це проявляється вираженою вакуолізацією цитоплазми, каріолізісом та руйнуванням мітохондріальних мембран під дією вільнорадикального перекисного окиснення ліпідів. Одночасне зростання активності ферменту РНКаз до свого максимуму (в 1,8 раза вище за контроль) за комбінованого отруєння вказує на тотальний запуск лізису нуклеїнових кислот як фінальної стадії деструкції клітинних структур.

Важливим інтегральним показником інтенсивності пластичного обміну та функціонального стану клітин є коефіцієнт РНК/ДНК, який відображає потенціал біосинтезу білка на одиницю генетичного матеріалу. Проведені дослідження виявили чітку тенденцію до зниження цього співвідношення в усіх аналізованих тканинах риб під дією мікотоксинів, що свідчить про суттєве уповільнення росту та метаболічний регрес організму (Barany et al., 2021). За ізольованого введення афлатоксину В1 (АФВ1) коефіцієнт РНК/ДНК зменшується у печінці на 11,4 %, у м'язах – на 12,1 %, у зябрах – на 14,7 %, а в

головному мозку – на 10,7 % відносно рівня контролю (рис. 3).

З цитологічної точки зору таке падіння індексу відображає депресію білоксинтезувальної функції клітин на тлі відносного збереження стабільності ядерного геному. Пригнічення транскрипційної активності за дії АФВ1 генетично зумовлене блокуванням РНК-полімераза, внаслідок чого кількість копій інформаційних РНК зменшується порівняно зі сталою кількістю ДНК.

Вплив Т-2 токсину спричиняє ще більш глибоке падіння досліджуваного коефіцієнта: у печінці він знижується на 19,0 %, у скелетних м'язах – на 17,6 %, у зябровому епітелії – на 21,3 %, а в нервовій тканині – на 19,6 % порівняно з нормою. Цей ефект цитотоксично пов'язаний із прямою деструкцією рибосомального апарату клітини, через що швидкість розпаду РНК починає суттєво переважати над темпами її новоутворення. Максимальний негативний зсув пластичного балансу зафіксовано за комбінованої дії обох мікотоксинів, коли індекс РНК/ДНК падає на 21,5 % у печінці, на 25,3 % у м'язах, на 25,3 % у зябрах та на 22,3 % у мозку. Генетичним підґрунтям такого ефекту є поєднання блокування синтезу матриць епоксидами АФВ1 та одночасного рибосомального стресу під дією Т-2 токсину, що запускає каскадну деградацію макромолекул нуклеїнових кислот. Зниження коефіцієнта РНК/ДНК до таких критичних значень цитологічно супроводжується атрофічними змінами у клітинах, зменшенням об'єму цитоплазми та втратою здатності тканин до регенерації.

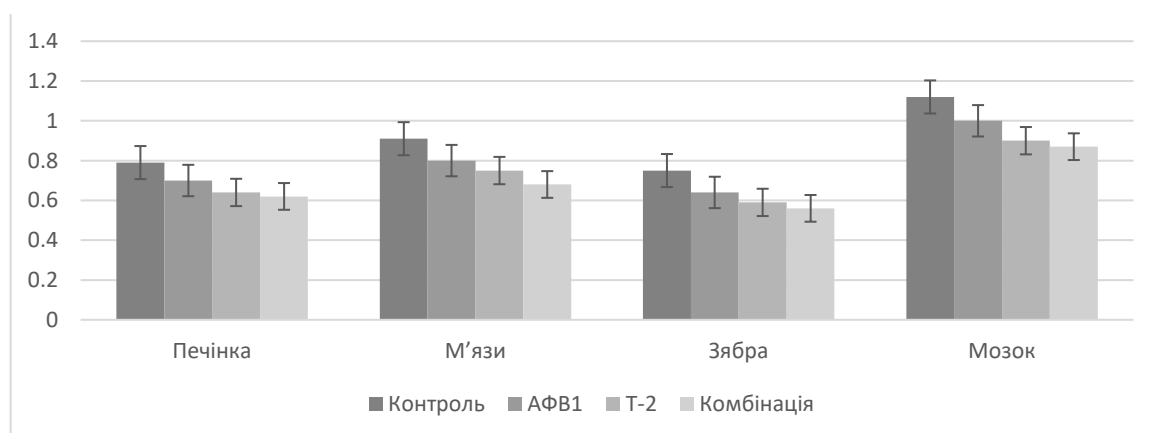


Рис. 3. Співвідношення РНК/ДНК у тканинах карася звичайного під впливом мікотоксинів ($M \pm m$)

Важливим молекулярно-генетичним фактором деструкції нуклеїнового обміну в клітинах риб за умов мікотоксикозів є різка активація гідролітичних ферментів – ДНКаз та РНКаз, які каталізують розщеплення фосфодієфірних зв'язків у макромолекулах. За умов ізольованої дії афлатоксину В1 спостерігається інтенсифікація катаболічних процесів: активність ДНКаз зростає на 50,0 %, а РНКаз – на 52,6 % порівняно з контрольними показниками. Генетичним механізмом такої

ферментативної активації є запуск вільнорадикальних процесів та окиснювального стресу, які пошкоджують лізосомальні мембрани, викликаючи вихід гідролаз у цитоплазму (Simonova & Mekhed, 2025b). Цитологічно цей процес супроводжується початковими етапами каріолізису та хроматинолізису, коли активована ДНКаз починає розщеплювати дезоксирибонуклеїнові кислоти, руйнуючи цілісність ядерного геному (рис. 4).

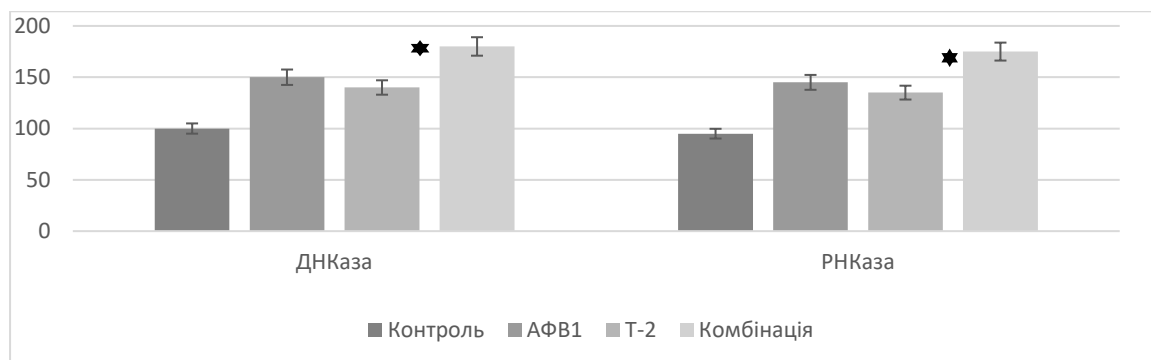


Рис. 4. Активність ферментів у тканинах карася звичайного під впливом микотоксинів (ум.од./г сирової маси, $M \pm m$)

При дії Т-2 токсину також фіксується стійке зростання активності нуклеаз, хоча й дещо менш виражене, ніж у випадку з АФВ1: рівень ДНКаз збільшується на 40,0 %, а РНКаз – на 42,1 % відносно норми. Цей зсув зумовлений специфічним риботоксичним стресом, що виникає внаслідок зв'язування Т-2 токсину з рибосомами, що слугує сигналом для клітини до активації внутрішніх систем деградації пошкоджених РНК-матриць. Найбільш руйнівний ефект виявлено за комбінованого впливу обох мікотоксинів, де чітко простежується комплексна взаємодія ксенобіотиків. За умов мікст-токсикозу активність ДНКаз зростає в 1,8 раза (на 80,0 %), а РНКаз – виростає у 1,84 раза (на 84,2 %) порівняно з чистим контролем. Такий істотний стрибок ферментативної активності свідчить про активацію генетично запрограмованої загибелі клітин чи некроз тканин. На цитологічному рівні надвисока активність нуклеаз призводить до суттєвої фрагментації ядерної ДНК і деградації всіх видів клітинних РНК, знижуючи здатність організму риб до репарації чи адаптації.

Висновки

Встановлено, що ізольований та встановлено, що ізольована та комбінована дія афлатоксину В1 (АФВ1) і Т-2 токсину супроводжується пригніченням нуклеїнового обміну в усіх досліджених тканинах карася звичайного (печінці, м'язах, зябрах та мозку), що проявляється зниженням вмісту РНК та співвідношення РНК/ДНК. Найбільш виражені зміни вмісту РНК зафіксовано за комбінованої дії токсикантів – на 40,0–41,7 % порівняно з контролем.

Співвідношення РНК/ДНК також знижувалося під впливом обох мікотоксинів. За дії Т-2 токсину зменшення становило 17,6–21,3 %, тоді як за комбінованого впливу АФВ1 і Т-2 токсину – 21,5–25,3 % залежно від досліджуваної тканини. Отримані результати свідчать про пригнічення пластичного обміну та зниження інтенсивності білоксинтезувальних процесів.

Виявлено підвищення активності ДНКаз та РНКаз за дії обох токсикантів. Найбільші зміни спостерігалися за комбінованого впливу, коли активність ДНКаз зростала на 80,0 %, а РНКаз – на

84,2 % порівняно з контролем. Це супроводжувалося найбільш вираженим зниженням вмісту РНК та співвідношення РНК/ДНК.

Таким чином, отримані результати підтверджують інформативність показників нуклеїнового обміну та активності нуклеаз для

оцінювання токсичного впливу АФВ1 і Т-2 токсину на організм риб. Водночас встановлення конкретних цитологічних і цитогенетичних механізмів виявлених змін потребує проведення спеціальних морфологічних, цитологічних та цитогенетичних досліджень.

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

Автор Ольга Мехед є членом редакційної колегії Biota. Human. Technology. Вона не брала участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийнятті цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Author Olha Mekhed is the member of the editorial board of Biota. Human. Technology. She was 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

Afanasyeva, K.S., & Chopei, M.I. (2024). Modern methods of molecular biology. Kyiv. (in Ukrainian).
Афанасьєва К.С., Чопей М.І. Сучасні методи молекулярної біології. Київ, 2024. 129 с.

Barany, A., Guilloto, M., Cosato, J., de Boevre, M., Oliva, M., de Saeger, S., Fuentes, J., Martínez-Rodríguez, G., & Mancera, J.M., (2021). Dietary aflatoxin B1 (AFB1) reduces growth performance, impacting growth axis, metabolism, and tissue integrity in juvenile gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 533, 736189.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.73>

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*, No. 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/ijis.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(12), 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>

Mekhed, O. B. (2013a). Effect of toxicants of different chemical nature on the nucleic acid content in carp of different ages. In V. V. Hrubinko (Ed.), *Proceedings of the VI International Ichthyological Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Theoretical and Practical Ichthyology"* (Ternopil, October 9–11, 2013) (pp. 203–205). Ternopil: Vektor. (in Ukrainian).

Мехед О. Б. Вплив токсикантів різної хімічної природи на вміст нуклеїнових кислот в організмі коропа різного віку. Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології : матеріали VI Міжнародної іхтіологічної науково-практичної конференції (м. Тернопіль, 9–11 жовтня 2013 р.) / за заг. ред. В. В. Грубінка. Тернопіль : Вектор, 2013. С. 203–205.

Mekhed, O. B. (2013b). Nucleic acid content in organs and tissues of carp depending on rearing conditions. *Scientific Notes of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*, 3(56), 73–78. (in Ukrainian).

Мехед О. Б. Вміст нуклеїнових кислот в органах та тканинах коропа залежно від умов утримання. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2013. № 3(56). С. 73–78.

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., et al. (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-Polihraf, 99–100. (in Ukrainian).

Ніколаєнко Т., Івашченко М., Івашченко 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>

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-токсиком. *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>

Radchenko, M. P., Gurianov, D. S., & Morderer, Y. Y. (2022). DNA fragmentation and endonuclease activity. *Fiziologiia Roslyn i Henetyka*, 54(5), 404–418. <https://doi.org/10.15407/frg2022.05.404>

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 корошових 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*, 4, 171–180. <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-4.22> (in Ukrainian)

Симонова Н. А., Мехед О. Б. Вплив токсикантів різної хімічної природи на інтенсивність перекисного окиснення ліпідів у печінці коропа лускатого (*Cyprinus carpio*). *Природнича освіта і наука*. 2025. Вип. 4. С. 171–180. <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-4.22>

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*, 2, 65–69. <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.8> (in Ukrainian)

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. <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.8>

Strosnider, H., Azziz-Baumgartner, E., Banziger, M., et al. (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: 30.06.2026. Accepted: 08.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Філоненко Д., Ячна М., Мехед О., Третяк О. Біохімічні показники та клітинно-генетичні аспекти обміну нуклеїнових кислоти у тканинах карася за дії мікотоксинів. *Biota. Human. Technology.* 2026. № 2. С. 165-175.

DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.13>

Cite this article in APA style as:

Filonenko, D., Yachna, M., Mekhed, O., Tretiak, O. (2026). Biokhimichni pokaznyky ta klitynnohenetychni aspekty obminu nukleinovyykh kysloty u tkanynakh karasia za dii mikotoksyniv [Biochemical parameters and cyto-genetic aspects of nucleic acid metabolism in crucian carp tissues under the influence of mycotoxins]. *Biota. Human. Technology*, (2), 165-175. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.13> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Filonenko D. [*in Ukrainian: Філоненко Д.*]¹, 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

Yachna M. [*in Ukrainian: Ячна М.*]², 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

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 ResearcherID: AAC-7333-2021

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

Tretiak A. [*in Ukrainian: Третяк О.*]⁴, Cand. Sc. (Biol.), Prof., email: alexandr.tretyak@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8989-1601

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.

³ Data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

⁴ Data collection, statistical analysis, manuscript preparation.



MAN AND HIS HEALTH
ЛЮДИНА ТА ЇЇ ЗДОРОВ'Я



UDC 582.673.42:615.32

DOI: 10.58407/bht.2.26.14



Copyright (c) 2026 Zbigniew Mazur, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk

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/).

Zbigniew Mazur, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk

CYNAMON CEJLOŃSKI (*CINNAMOMUM VERUM* J. PRESL) – WŁAŚCIWOŚCI
LECZNICZE, ZASTOSOWANIE I POTENCJAŁ TERAPEUTYCZNY

Zbigniew Mazur, Halina Tkaczenko, Natalia Kurhaluk

CEYLON CINNAMON (*CINNAMOMUM VERUM* J. PRESL) – MEDICINAL PROPERTIES,
USES, AND THERAPEUTIC POTENTIAL

STRESZCZENIE

Cel pracy. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie analizy prozdrowotnych właściwości cynamonu cejlońskiego (*Cinnamomum verum* J. Presl) oraz ocena jego wartości terapeutycznej w kontekście współczesnej medycyny i dietetyki. Zaprezentowano również potencjalne zastosowanie cynamonu w profilaktyce oraz wspomaganiu leczenia chorób metabolicznych, sercowo-naczyniowych, nowotworowych, neurodegeneracyjnych i infekcyjnych, a także zaburzeń układu pokarmowego i kostnego. Praca koncentruje się ponadto na ocenie bezpieczeństwa stosowania cynamonu w różnych formach farmaceutycznych i dietetycznych.

Metodologia. W celu uzyskania wszechstronnych informacji na temat właściwości leczniczych oraz potencjalnych zastosowań cynamonu cejlońskiego przeprowadzono przegląd dostępnej literatury naukowej. Analiza obejmowała bazy danych: PubMed Central, Scopus, ResearchGate, Web of Science, ScienceDirect, Ovid Technologies oraz Google Scholar. Do przeglądu włączono łącznie 139 artykułów naukowych oraz 8 monografii. Uwzględnione materiały obejmowały prace oryginalne, przeglądy systematyczne, metaanalizy oraz doniesienia eksperymentalne i kliniczne dotyczące wpływu związków chemicznych obecnych w cynamonie na jego właściwości terapeutyczne. Selekcji źródeł dokonywano na podstawie aktualności, jakości metodologicznej oraz znaczenia klinicznego uzyskanych wyników.

Nowatorstwo naukowe. Praca wnosi nowatorskie spojrzenie na korzyści zdrowotne wynikające ze stosowania *C. verum*, podkreślając jego rolę jako środka wspomagającego terapię chorób nowotworowych, metabolicznych, infekcyjnych oraz neurodegeneracyjnych. Artykuł prezentuje wyniki badań wskazujące na szerokie spektrum działania związków bioaktywnych występujących w cynamonie oraz ich potencjalne zastosowanie w praktyce klinicznej. Szczególną uwagę poświęcono mechanizmom molekularnym działania fitoskładników oraz wykorzystaniu nowoczesnych technologii zwiększających biodostępność i skuteczność terapeutyczną, takich jak nanocząsteczki czy żełe mukoadhezyjne. Interdyscyplinarne podejście, łączące wiedzę botaniczną, farmakologiczną i kliniczną, umożliwiło holistyczną ocenę potencjału terapeutycznego cynamonu cejlońskiego.

Wnioski. Cynamon od kilku tysięcy lat wykorzystywany jest w kuchni azjatyckiej nie tylko jako przyprawa, lecz także jako surowiec o właściwościach leczniczych. Charakteryzuje się bogatą fitochemią oraz szerokim spektrum działania prozdrowotnego. *C. verum* znajduje zastosowanie w łagodzeniu dolegliwości układu pokarmowego, moczowego i kostnego, a także wykazuje silne właściwości przeciwutleniające i przeciwzapalne. Dostępne dane wskazują, że dzięki zawartości przeciwutleniaczy i zdolności modulowania procesów zapalnych może on wspomagać leczenie wielu chorób, w tym nowotworów. Udokumentowano, że jego właściwości biologiczne – obejmujące działanie przeciwzapalne, przeciwwirusowe, przeciwbakteryjne, przeciwpasożytnicze, przeciwotyłociowe oraz przeciwneurodegeneracyjne – wywierają korzystny wpływ na zdrowie człowieka. Związki obecne w olejkach eterycznych cynamonu poprawiają wrażliwość tkanek na insulinę, obniżają poziom glukozy i lipidów we krwi oraz hamują rozwój procesów nowotworowych i infekcyjnych. Zastosowanie nowoczesnych systemów dostarczania substancji bioaktywnych, takich jak nanocząsteczki i żełe mukoadhezyjne, znacząco zwiększa biodostępność cynamonu i skuteczność terapeutyczną przy jednoczesnym ograniczeniu toksyczności wobec komórek prawidłowych. Ponadto wykazano, że suplementacja cynamonu w dawkach 1-6 g dziennie przynosi najkorzystniejsze efekty zdrowotne. Produkty otrzymywane z kory, liści i korzeni cynamonowca znajdują zastosowanie nie tylko w medycynie ziołowej, lecz także w kosmetyce oraz przemyśle spożywczym i napojowym.

Słowa kluczowe: cynamon cejloński, związki bioaktywne, działanie przeciwzapalne, aktywność antyoksydacyjna, zaburzenia metaboliczne, wrażliwość na insulinę, fitochemia

ABSTRACT

Purpose of the work. This article aims to analyse the health-promoting benefits of Ceylon cinnamon (*Cinnamomum verum* J. Presl) and evaluate its therapeutic value in contemporary medical and dietary contexts. It also discusses potential applications in preventing and supporting the treatment of metabolic, cardiovascular, neoplastic, neurodegenerative and infectious diseases, as well as digestive and skeletal system disorders. Additionally, the study assesses the safety of using cinnamon in various pharmaceutical and dietary forms.

Methodology. A review of the available scientific literature was conducted to obtain comprehensive information on the medicinal properties and potential applications of Ceylon cinnamon. The analysis included the following databases: PubMed Central, Scopus, ResearchGate, Web of Science, ScienceDirect, Ovid Technologies and Google Scholar. A total of 139 scientific articles and eight monographs were included in the review. The analysed materials comprised original research articles, systematic reviews, meta-analyses and experimental and clinical reports, which addressed the effects of the chemical compounds present in cinnamon on its therapeutic properties. Source selection was based on publication recency, methodological quality, and the clinical relevance of the reported findings.

Scientific novelty. This work offers a novel perspective on the health benefits of *C. verum*, highlighting its potential as an adjunctive therapy for cancer, metabolic, infectious and neurodegenerative diseases. The article presents research findings that indicate the broad spectrum of activity of the bioactive compounds found in cinnamon, and their potential application in clinical practice. Particular attention is given to the molecular mechanisms of phytochemical action and the use of modern technologies to enhance bioavailability and therapeutic efficacy, such as nanoparticles and mucoadhesive gels. Combining botanical, pharmacological, and clinical knowledge using an interdisciplinary approach enabled a holistic assessment of the therapeutic potential of Ceylon cinnamon.

Conclusions. Cinnamon has been used in Asian cuisine for several thousand years, not only as a spice, but also as a medicinal ingredient. It is characterised by its rich phytochemistry and wide range of health-promoting effects. *C. verum* alleviates disorders of the digestive, urinary and skeletal systems, and exhibits strong antioxidant and anti-inflammatory properties. Available data suggest that it may support the treatment of numerous diseases, including cancer, due to its antioxidant content and ability to modulate inflammatory processes. Its documented biological activities – anti-inflammatory, antiviral, antibacterial, antiparasitic, anti-obesity and antineurodegenerative – have a beneficial impact on human health. Compounds present in cinnamon essential oils improve tissue insulin sensitivity, reduce blood glucose and lipid levels, and inhibit the development of neoplastic and infectious processes. The use of modern delivery systems for bioactive substances, such as nanoparticles and mucoadhesive gels, can significantly increase the bioavailability and therapeutic efficacy of cinnamon while reducing its toxicity to normal cells. Furthermore, taking cinnamon supplements at doses of 1-6 g per day has been shown to have the most favourable health effects. Products derived from the bark, leaves and roots of the cinnamon tree are used in herbal medicine, cosmetology and the food and beverage industry.

Key words: Ceylon cinnamon, bioactive compounds, anti-inflammatory activity, antioxidant activity, metabolic disorders, insulin sensitivity, phytochemistry

Wprowadzenie

Cynamon cejloński (*Cinnamomum verum* J. Presl, syn. *C. zeylanicum* Blume) jest jedną z najbardziej cenionych przypraw korzennych na świecie. Uprawiany od wieków w krajach Azji Południowej, przede wszystkim na Sri Lance, a także w południowych Indiach i Indonezji, stanowi ważny element lokalnych tradycji kulinarnych i leczniczych (Pathak et al., 2021; Yadav et al., 2023). Jego zastosowanie sięga starożytnych cywilizacji Bliskiego Wschodu, Egiptu oraz Azji Południowej, gdzie wykorzystywano go nie tylko jako przyprawę, lecz także jako surowiec leczniczy oraz składnik praktyk rytualnych, w tym procesów mumifikacji (Ribeiro et al., 2020; Pathak et al., 2021). Bogata historia użycia cynamonu w tradycyjnych systemach medycznych, takich jak Ajurweda czy tradycyjna medycyna chińska, stanowi istotne tło dla współczesnych badań nad jego właściwościami biologicznymi.

W ostatnich latach, wraz ze wzrostem zainteresowania naturalnymi produktami wspierającymi zdrowie oraz żywnością funkcjonalną, cynamon cejloński stał się przedmiotem intensywnych badań naukowych dotyczących jego potencjalnych właściwości prozdrowotnych. W przeciwieństwie do powszechnie stosowanego cynamonu chińskiego (*Cinnamomum cassia* Siebold, syn. *C. burmanni*), zawiera on znacznie mniejsze ilości kumaryny – związku o potencjalnym działaniu hepatotoksycznym – co czyni go bezpieczniejszym do długotrwałego stosowania (Wong et al., 2014). Głównym składnikiem biologicznie aktywnym cynamonu cejlońskiego jest wysokiej jakości olejek eteryczny obecny w korze i liściach, zawierający nawet do 70 różnych związków chemicznych, takich jak aldehyd cynamonowy, eugenol czy linalol, wykazujących szerokie spektrum aktywności biologicznej (Wong et al., 2014; Pathak et al., 2021).

Liczne badania naukowe potwierdzają unikalne właściwości cynamonu cejlońskiego, obejmujące działanie przeciwzapalne, przeciwbakteryjne, przeciwutleniające oraz regulujące poziom glukozy we krwi (Muhammad et al., 2021; George et al., 2024). Wykazuje on również potencjał wspomagający leczenie chorób przewlekłych, takich jak nowotwory, cukrzyca typu 2, choroby układu sercowo-naczyniowego oraz zaburzenia metaboliczne (Gruenwald et al., 2010; Prabhuji et al., 2021). Ponadto udokumentowano jego skuteczność w redukcji liczebności nicieni oraz larw komarów, co wskazuje na możliwość zastosowania w biologicznych metodach kontroli szkodników (Pratibha et al., 2018).

Cynamon cejloński wpływa korzystnie na funkcjonowanie wielu układów organizmu człowieka. W obrębie układu pokarmowego wykazuje działanie żołądkowe, stymulujące wydzielanie insuliny, przeciwbiegunkowe oraz przeciwwzdęciowe (Pratibha et al., 2018; Gurel et al., 2022). W odniesieniu do układu nerwowego opisywane są jego właściwości neuroprotektoryjne i przeciwdepresyjne (Trifan et al., 2021). Ponadto oddziałuje pozytywnie na układ sercowo-naczyniowy poprzez rozszerzanie naczyń krwionośnych i poprawę krążenia (Maruthamuthu & Ramanathan, 2016), a także wykazuje działanie przeciwgorączkowe i przeciwbólowe (Pandey & Tripathi, 2018). Tak szerokie spektrum aktywności biologicznej sprawia, że cynamon cejloński postrzegany jest jako obiecujący surowiec roślinny o znacznym potencjale terapeutycznym.

Celem niniejszej publikacji jest przegląd aktualnej wiedzy na temat właściwości leczniczych cynamonu cejlońskiego oraz ocena jego realnej wartości terapeutycznej w kontekście współczesnej medycyny i dietetyki.

Pochodzenie ewolucyjne i ogólna charakterystyka cynamonu cejlońskiego

C. verum należy do bardzo starej rodziny Lauraceae (wawrzynowate), której pochodzenie datowane jest na erę mezozoiczną, a dokładniej na

późną kredę, około 84,9 mln lat temu (Song et al., 2024). Najstarsze skamieniałości przypominające przedstawicieli rodzaju *Cinnamomum* pochodzą właśnie z okresu kredowego, co potwierdza długą historię ewolucyjną tej grupy roślin (Jachowicz et al., 2003). Przodkowie rodzaju *Cinnamomum* wyewoluowali w pasie roślinności wieczniezielonej, charakterystycznej dla stref podzwrotnikowych i tropikalnych, które w tym okresie obejmowały znaczne obszary Ziemi (Szafer et al., 1962).

Wraz z rozpadem superkontynentu Gondwana nastąpiła izolacja poszczególnych linii ewolucyjnych na formujących się kontynentach, co miało kluczowe znaczenie dla dywersyfikacji rodzaju *Cinnamomum* (Chanderbali et al., 2001). Plemię *Cinnamomeae* (Lauraceae) powstało około 44,8 mln lat temu i stanowiło istotny element boreotropikalnej paleoflory Laurazji, obejmującej rozległe obszary półkuli północnej o ciepłym i wilgotnym klimacie (Huang et al., 2011). Najintensywniejsze procesy specjacyjne w obrębie rodzaju zachodziły od późnego eocenu do wczesnego miocenu, około 27,5 mln lat temu, co wiązano z dynamicznymi zmianami klimatycznymi i tektonicznymi (Xiao & Ge, 2022).

Postępujące ochłodzenie klimatu w późnym miocenie doprowadziło do zaniku wielu gatunków cynamonu w lasach położonych na wysokich szerokościach geograficznych półkuli północnej, ograniczając ich występowanie do stref cieplejszych (Kornaś & Medwecka-Kornaś, 2002; Huang et al., 2011). Obecnie rodzaj *Cinnamomum*, traktowany jako relikwit dawnej flory boreotropikalnej, obejmuje około 250 gatunków. Naturalny zasięg występowania endemicznego gatunku *C. verum* ogranicza się do Sri Lanki oraz południowo-zachodnich Indii, w szczególności do stanów Karnataka, Tamil Nadu i Kerala (ryc. 1) (Moragoda, 2021; Prabhuji et al., 2021; Ghosh, 2024).



Ryc. 1. Naturalny zasięg występowania *Cinnamomum verum*

W toku ewolucji *C. verum* przystosował się do stabilnych warunków klimatycznych wilgotnych lasów tropikalnych, charakteryzujących się wysoką temperaturą i dużą wilgotnością powietrza. Adaptacje te znajdują

odzwierciedlenie zarówno w cechach morfologicznych rośliny, takich jak skórzaste, wieczniezielone liście i gruba kora (ryc. 2), jak i w bogatym profilu związków chemicznych.



Ryc. 2. Cechy *Cinnamomum verum* przystosowujące do życia w wilgotnych lasach tropikalnych

Szczególną rolę odgrywają olejki eteryczne, których podstawową funkcją biologiczną jest odstraszanie roślinożerców oraz ograniczanie żerowania owadów. Zawarte w nich związki fitochemiczne wykazują działanie insektobójcze lub toksyczne wobec wielu gatunków owadów, zwiększając tym samym zdolność przetrwania rośliny w środowisku naturalnym (Narayanankutty et al., 2021).

Cynamon jako przyprawa i surowiec leczniczy w dziejach cywilizacji

Cynamon (*C. verum*), znany i ceniony od starożytności, należy do najstarszych przypraw wykorzystywanych przez człowieka. Jego wysoka wartość użytkowa, aromatyczna oraz symboliczna sprawiła, że od tysięcy lat odgrywał istotną rolę zarówno w kuchni, jak i w medycynie tradycyjnej wielu kultur. Pierwsze pisemne wzmianki o cynamonie jako przyprawie pochodzą z Chin sprzed ponad 4000 lat (Wong et al., 2014; Spence, 2024). W tradycyjnej medycynie chińskiej i japońskiej stosowany był jako środek przeciwgorączkowy, przeciwzapalny, wspomagający leczenie przeziębień i grypy, a także

poprawiający apetyt oraz funkcjonowanie układu trawiennego (Sztaba, 2009; Shen et al., 2012).

W starożytnym Egipcie cynamon wykorzystywano jako składnik kadzideł, mieszanek balsamujących oraz perfum, a także do aromatyzowania napojów, takich jak piwo i wino (Ravindran et al., 2003; Sztaba, 2009; Ribeiro et al., 2020; Yadav et al., 2023). Ze względu na silny i trwały zapach oraz właściwości konserwujące przyprawa ta odgrywała ważną rolę w obrzędach religijnych i funerarnych. Olejek cynamonowy należał do najcenniejszych aromatów starożytnego świata i był wymieniany w Starym Testamencie jako składnik olejów namaszczeniowych (Senderski, 2015).

Cynamon był również dobrze znany w starożytnej Grecji i Rzymie, gdzie stosowano go zarówno jako przyprawę, jak i surowiec leczniczy. Hipokrates oraz Dioskurides opisywali jego działanie rozgrzewające, pobudzające wydalanie moczu, odświeżające oddech, regulujące cykl menstruacyjny, poprawiające trawienie oraz wspomagające leczenie chorób skóry, układu oddechowego i wydalniczego. Przypisywano mu także właściwości neutralizujące skutki użądleń i ukąszeń jadowitych zwierząt (Farrell, 1985;

Yadav et al., 2023). W starożytnym Rzymie cynamon stosowano ponadto w praktykach ochronnych, okadzając nim domostwa w celu odpędzenia złych duchów i oczyszczenia przestrzeni (Kaławaj & Lemieszek, 2015).

W hinduskiej medycynie ludowej oraz w systemie Ajurwedy cynamon wykorzystywany był w leczeniu chorób żołądka, takich jak zapalenie błony śluzowej żołądka, zaburzeń krążenia krwi oraz schorzeń wątroby (Lee et al., 2005; Kaławaj & Lemieszek, 2015; Ribeiro et al., 2020). Zastosowania te wpisywały się w holistyczne podejście do zdrowia, łączące właściwości rozgrzewające przyprawy z regulacją procesów metabolicznych.

W średniowieczu stosowanie cynamonu zalecała m.in. św. Hildegarda z Bingen, która doceniała jego działanie wspomagające leczenie przeziębień, dolegliwości trawiennych, braku apetytu oraz nudności, a także jego właściwości łagodzące bóle menstruacyjne (Sztaba, 2009; Kaławaj et al., 2015). W tym okresie cynamon był jednocześnie przyprawą luksusową, dostępną głównie dla wyższych warstw społecznych, co dodatkowo podnosiło jego prestiż. Do Europy cynamon cejloński trafił na szerszą skalę za sprawą kupców portugalskich w XVI wieku, stając się ważnym towarem handlowym na rynkach europejskich (Pathak et al., 2021).

W XVIII wieku w Polsce cynamonowi przypisywano przede wszystkim właściwości rozgrzewające oraz wzmacniające pracę serca i żołądka, co znalazło odzwierciedlenie w ówczesnych zielnikach i poradnikach medycznych (Sztaba, 2009). Wiedza ta stanowiła pomost między tradycyjnym zastosowaniem przyprawy a współczesnymi badaniami nad jej właściwościami biologicznymi i terapeutycznymi.

Skład chemiczny i zmienność fitochemiczna cynamonu cejlońskiego

Cynamon cejloński (*C. verum*) stanowi źródło surowca roślinnego o wysoce zróżnicowanym składzie chemicznym, którego profil zależy od wielu czynników, takich jak warunki ekologiczne, rodzaj gleby, wiek drzewa, a także termin pozyskiwania kory. Szczególne znaczenie ma synchronizacja zbioru z cyklami monsunowymi, które wpływają na intensywność biosyntezy związków aromatycznych i bioaktywnych (Senanayake et al., 1978; Kaul et al.,

2003; Rajeswara et al., 2007; Barceloux, 2009; Wang et al., 2009; Fajar et al., 2019; Rawat et al., 2020). Najwyższą jakość surowca uzyskuje się przy zbiorach prowadzonych w okresach monsunowych, tj. w maju i listopadzie, co ma bezpośredni wpływ na zawartość i skład olejku eterycznego (Parry, 1969).

Głównymi składnikami bioaktywnymi cynamonu cejlońskiego są lotne olejki eteryczne, których skład jakościowy i ilościowy znacząco różni się w zależności od analizowanego organu rośliny. Dominującymi związkami olejku eterycznego są aldehyd cynamonowy (C_9H_8O), eugenol ($C_{10}H_{12}O_2$), kwas cynamonowy ($C_9H_8O_2$), aldehyd benzoowy (C_7H_6O), cynamonian metylu, a także liczne mono- i seskwiterpeny (Jayaprakasha et al., 2002; Kohlmünzer, 2007; El-Baroty et al., 2010; Behbahani et al., 2020). Związki te odpowiadają zarówno za charakterystyczne cechy sensoryczne surowca, jak i za jego aktywność biologiczną.

Profil chemiczny poszczególnych organów rośliny jest wyraźnie zróżnicowany. W olejku pozyskiwanym z kory dominuje aldehyd cynamonowy (65-97,7 %), linalol (ok. 3,9 %) oraz α -pinen (ok. 2,4 %). Natomiast olejek z liści charakteryzuje się przewagą eugenolu (81-87,3 %), a także znaczącą zawartością linalolu (do 67,6 %), cynamonianu metylu (17,3 %) oraz α -pinenu (2,7 %) (Mallavarapu, 1995; Kohlmünzer, 2007; Malsawmtluangi et al., 2016; Mehrpouri et al., 2020). Różnice te determinują odmienne zastosowania olejków z kory i liści w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym i kosmetycznym.

Łącznie w olejku eterycznym cynamonu cejlońskiego zidentyfikowano ponad 70 związków chemicznych, obejmujących monoterpeny, seskwiterpeny, fenylopropanoidy oraz benzenoidy (Mallavarapu et al., 2007). Zawartość olejku eterycznego w korze wynosi zazwyczaj 0,5-1,0 %, natomiast w liściach może sięgać 0,4-4,7 % (Mallavarapu & Rajeswara, 2007; Ghosh, 2024). Aldehyd cynamonowy, poza kluczową rolę w kształtowaniu aromatu i smaku, ulega procesom utleniania podczas przechowywania surowca, prowadząc do powstawania związków żywicznych, które wpływają na barwę oraz jakość sensoryczną cynamonu (Senanayake et al., 1978). Zjawisko to ma istotne znaczenie technologiczne i wymaga odpowiednich warunków magazynowania.



A



B

Foto 1. Porównanie kory *Cinnamomum cassia* (A) i *Cinnamomum verum* (B). Autor zdjęć: Zbigniew Mazur.

C. verum jest również cennym źródłem mikro- i makroelementów oraz składników odżywczych, takich jak węglowodany, błonnik pokarmowy, białko i tłuszcze, a także witaminy A, B, C, E i K oraz pierwiastki mineralne, w tym mangan, wapń, żelazo i magnez (Saeed et al., 2018; Goel & Mishra, 2020; Kowalska et al., 2021). Tak kompleksowy skład chemiczny sprzyja jego zastosowaniu nie tylko jako przyprawy, lecz również jako surowca funkcjonalnego i fitoterapeutycznego. Jednocześnie wysoka zmienność środowiskowa składu olejku eterycznego wymaga stosowania zaawansowanych technik analitycznych, takich jak GC-MS czy HPLC, w celu skutecznej standaryzacji jakości surowca oraz jego preparatów (Cheng & Yu, 1993; Li et al., 2013).

Średnia zawartość kumaryny w ekstraktach metanolowych z kory i liści *C. verum* wynosi odpowiednio 0,010 oraz 0,004 mg/g, natomiast w ekstraktach wodnych może osiągać poziom 4,8 mg/g (Liyanaage et al., 2021; Christiany et al., 2021). Niska zawartość kumaryny stanowi istotną cechę odróżniającą cynamon cejloński od innych gatunków z rodzaju *Cinnamomum*, zwłaszcza *C. cassia*.

Cynamon cejloński jest często mylony z cynamonem chińskim (*C. cassia*) lub fałszowany poprzez dodatek liści i kory pochodzących od innych gatunków z rodzaju *Cinnamomum* (Narayana et al., 2019). Zjawisko to może prowadzić do istotnych różnic w składzie chemicznym oraz bezpieczeństwie stosowania surowca. Szczegółowe różnice morfologiczne i chemiczne pomiędzy tymi gatunkami (Foto 1) zostały omówione w przeglądzie Oketch-Rabah et al. (2018).

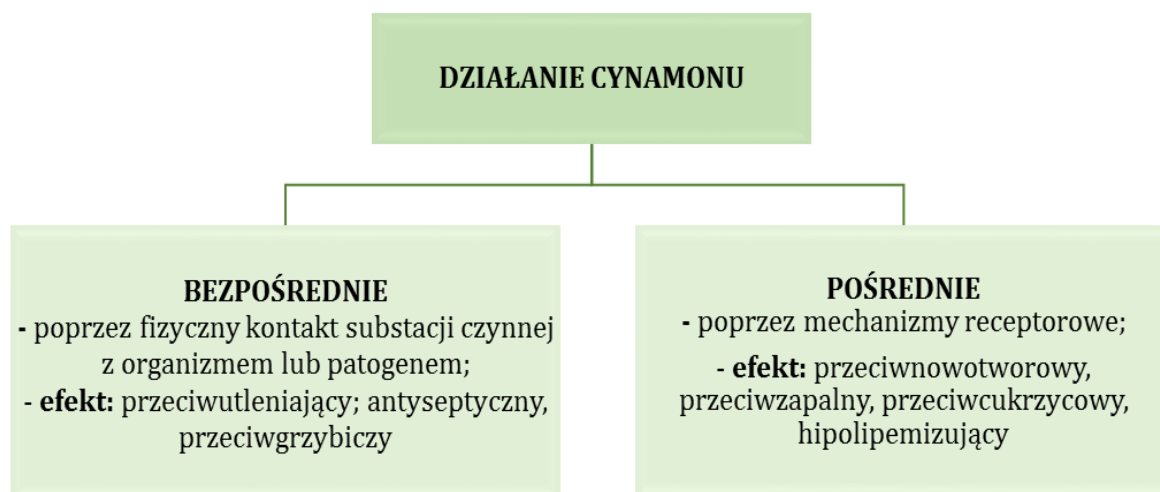
Mechanizmy działania cynamonu

Cynamon jest jedną z najbardziej popularnych przypraw kulinarnych na świecie. Ze względu na

bogaty i zróżnicowany skład fitochemiczny może być również wykorzystywany jako środek wspomagający leczenie niektórych chorób oraz profilaktykę zdrowotną. Jego działanie biologiczne wynika z obecności licznych związków bioaktywnych, w tym aldehydu cynamonowego, eugenolu, polifenoli oraz olejków eterycznych, które wykazują aktywność przeciwzapalną, przeciwutleniającą i metaboliczną. Wyróżnia się dwa podstawowe mechanizmy oddziaływania terapeutycznego cynamonu na organizm człowieka (Ryc. 3): działanie bezpośrednie, polegające na interakcji z komórkami i enzymami, oraz działanie pośrednie, związane z modulacją szlaków metabolicznych i sygnalizacyjnych (Rao & Gan, 2014).

Aktywność przeciwnowotworowa związków bioaktywnych cynamonu cejlońskiego.

Przegląd literatury wskazuje, że większość badań dotyczących właściwości przeciwnowotworowych związków aktywnych obecnych w cynamonie została dotychczas przeprowadzona w modelach *in vitro*, ujawniając obiecujący potencjał terapeutyczny tych substancji (Anderson et al., 2024). Badania te koncentrują się głównie na analizie mechanizmów molekularnych, takich jak indukcja apoptozy, zahamowanie proliferacji komórek nowotworowych oraz modulacja szlaków sygnalizacyjnych związanych ze stresem oksydacyjnym i zapaleniem. W wielu pracach podkreśla się również zależność obserwowanych efektów od dawki oraz czasu ekspozycji na badane związki. Jednocześnie zwraca się uwagę na konieczność dalszych badań *in vivo*, które pozwoliłyby na lepsze zrozumienie ich biodostępności i potencjalnej skuteczności terapeutycznej w warunkach fizjologicznych.



Ryc. 3. Sposoby oddziaływania cynamonu na organizm

Związki bioaktywne zawarte w *C. verum* wykazują szerokie spektrum działania przeciwnowotworowego, obejmujące liczne linie komórkowe nowotworów pochodzenia nabłonkowego i mezenchymalnego (Khedkar et al., 2023; George et al., 2024). Skuteczność ta została udokumentowana w badaniach prowadzonych na różnych typach nowotworów, co zestawiono w tabeli 1, stanowiącej

syntetyczne podsumowanie dotychczasowych wyników badań eksperymentalnych.

Wyniki te wskazują na istotne zróżnicowanie odpowiedzi komórkowych w zależności od rodzaju zastosowanego ekstraktu oraz jego składu fitochemicznego. Ponadto obserwowane efekty przeciwnowotworowe często korelują z warunkami hodowli komórkowej oraz zastosowanym modelem eksperymentalnym.

Tabela 1

Aktywność cytotoksyczna i wartość IC_{50} różnych preparatów na bazie *Cinnamomum verum*

Badanie	Związek/ Skład	Linia komórkowa (typ nowotworu)	Wartość IC_{50}	Źródło
1	2	3	4	5
<i>in vitro</i> <i>in vivo</i>	Aldehyd cynamonowy	NCI-H520 (płaskonabłonkowy rak płuc)	33.29 μ M	Yang et al., 2016
<i>in vitro</i>	Wodny ekstrakt	A431 (rak kolczystokomórkowy skóry)	57.92 $\pm$ 0,25 μ g/ml	Joshi et al., 2025
<i>in vitro</i>	NP3 (AgNPs z ekstraktu)	A431 (rak kolczystokomórkowy skóry)	45.30 $\pm$ 0,72 μ g/ml	Joshi et al., 2025
<i>in vitro</i>	Ekstrakt Soxhleta	MCF-7 (rak piersi)	58 μ g/ml (24 h)	Widya et al., 2017
<i>in vitro</i>	Wodny ekstrakt	MCF-7 (rak piersi)	9 μ g/ml (24 h)	Widya et al., 2017
<i>in vitro</i>	Olejek eteryczny	PC-3 (rak prostaty)	13.56 μ g/ml	Mohanty et al., 2025
<i>in vitro</i>	Nanocząstki chitozanu (olejek)	A-375 (czerniak)	79 μ g/ml	Khoshnevisan et al., 2022
<i>in vitro</i>	Nanocząstki chitozanu (olejek)	MDA-MB-468 (rak piersi)	112 μ g/ml	Khoshnevisan et al., 2022
<i>in vitro</i>	Nanocząstki chitozanu (aldehyd)	A-375 (czerniak)	135 μ g/ml	Khoshnevisan et al., 2022

Ciąg dalszy Tabeli 1

1	2	3	4	5
<i>in vitro</i>	Nanocząstki chitozanu (aldehyd)	MDA-MB-468 (rak piersi)	166 µg/ml	Khoshnevisan et al., 2022
<i>in vitro</i>	Ekstrakt z cynamonu	U-87 MG (wielopostaciowy glejak)	0.729 mg/100 µl	George et al., 2024
<i>in vitro</i> , <i>in vivo</i>	Aldehyd kuminowy	COLO 205 (rak jelita grubego)	16.31 µM (48 h)	Tsai et al., 2016
<i>in vitro</i>	Ekstrakt cynamonu	K562 (białaczka)	50-75 µM (72 h)	Guan et al., 2016
<i>in vitro</i>	Aldehyd cynamonowy	A549, H-1650, H-1975, HUVEC (rak płuc)	<50 mg/100 µl	Khan et al., 2023
<i>in vitro</i>	Ekstrakt z cynamonu	SCC-9 (rak jamy ustnej)	100 µg/ml (48h), 75 µg/ml (72 h)	Aggarwal et al., 2022
		SCC-25 (rak jamy ustnej)	30 µg/ml (48 h), 85 µg/ml (72 h)	
<i>in vitro</i>	Aldehyd cynamonowy	SCC-9 (rak jamy ustnej)	120 µM (24 h), 35 µM (72 h)	Aggarwal et al., 2022
		SCC-25 (rak jamy ustnej)	250 µM (48 h), 37 µg/ml (72 h)	
<i>in vitro</i>	Eugenol	OSCC-25 (rak jamy ustnej)	24.71 µM	Varadarajan et al., 2020
<i>in vitro</i>	Nanocząsteczki tlenku cynku CV-ZnONPs	KB (rak jamy ustnej)	20 µg/ml	Shanmugam et al., 2022
<i>in vitro</i> <i>in vivo</i>	Żel molekuloadhezyjny	OSCC (rak płaskonabłonkowy jamy ustnej)	200 µg/ml przy pH 6	Ahmad et al., 2025
<i>in vitro</i>	Nanocząsteczki CV-AgNPs	MCF-7 (rak piersi)	55,6 ± 3,51 µg/ml	Alanazi, 2024
<i>in vitro</i>	Nanocząsteczki CV-AgNPs	HeLa (rak szyjki macicy)	74,6 ± 7,43 µg/ml	Alanazi, 2024

Opisano kilka mechanizmów przeciwnowotworowego oddziaływania ekstraktów roślinnych, olejków eterycznych, wyizolowanych czystych związków bioaktywnych oraz nanocząsteczek otrzymanych na bazie *C. verum* (tabela 2). Mechanizmy te obejmują m.in. indukcję apoptozy i autofagii,

hamowanie proliferacji komórek nowotworowych, modulację szlaków sygnalizacyjnych związanych z procesami zapalnymi i stresem oksydacyjnym, a także zaburzenie angiogenezy i potencjału migracyjnego komórek nowotworowych.

Tabela 2

Mechanizmy działania przeciwnowotworowego preparatów na bazie *Cinnamomum verum*

Mechanizm działania	Opis obserwacji	Źródła
1	2	3
Indukcja apoptozy	Aktywacja kaspaz 3/9, ↓MMP, ↑Bax/Bak, ↓Bcl-2/Bcl-XL, fragmentacja DNA	Sadeghi et al., 2019; Tsai et al., 2016; Yang et al., 2016; Varadarajan et al., 2020
Zatrzymanie cyklu komórkowego	Zatrzymanie w fazie G1 (białaczka) i fazie G2/M (rak prostaty)	Guan et al., 2016; Mohanty et al., 2025

Ciąg dalszy Tabeli 2

1	2	3
Stres oksydacyjny	Zwiększenie poziomu reaktywnych form tlenu (ROS)	Shanmugam et al., 2022; Caserta et al., 2023
Hamowanie angiogenezy	Zmniejszenie tworzenia się naczyń krwionośnych w modelu <i>in vivo</i>	Hatte et al., 2025
Hamowanie topoizomerazy	Inhibicja aktywności topoizomerazy I i II	Yang et al., 2016
Modulacja szlaków sygnałowych	Hamowanie szlaków PI3K-AKT i MAPK	Mohanty et al., 2025

Wśród poznanych mechanizmów przeciwnowotworowego działania cynamonu najlepiej scharakteryzowana jest indukcja apoptozy, zachodząca przede wszystkim poprzez mitochondrialny (wewnętrzny) szlak apoptotyczny (Sadeghi et al., 2019). Aldehyd cynamonowy prowadzi do utraty potencjału błony mitochondrialnej (MMP), uwolnienia cytochromu c do cytoplazmy oraz aktywacji kaskady kaspaz, w tym kaspazy-3 i -7 (Yang et al., 2016; Varadarajan et al., 2020). Procesowi temu towarzyszą zmiany w ekspresji białek regulatorowych z rodziny Bcl-2, obejmujące wzrost ekspresji białek proapoptotycznych (Bax, Bak) oraz jednoczesny spadek ekspresji białek antyapoptotycznych (Bcl-2, Bcl-xL) (Varadarajan et al., 2020). Co istotne, podawanie aldehydu cynamonowego myszom skutkowało istotnym zmniejszeniem masy przeszczepionych guzów nowotworowych (Yang et al., 2016). Podobne efekty obserwowano w modelu raka piersi u szczurów, gdzie dieta wzbogacona o 1 % sproszkowanej kory cynamonu prowadziła do redukcji objętości guza o 44 % oraz zmniejszenia wskaźnika mitotycznego o 45,5 % (Kubatka et al., 2020).

Oprócz indukcji apoptozy składniki fitochemiczne cynamonu wykazują również zdolność do zatrzymania cyklu komórkowego na różnych jego etapach. W komórkach białaczki obserwowano zatrzymanie cyklu w fazie G1 (Guan et al., 2016), natomiast w komórkach raka prostaty (linia PC-3) – w fazie G2/M (Widya et al., 2017; Mohanty et al., 2025). Istotnym uzupełnieniem tych mechanizmów jest hamowanie aktywności topoizomerazy I i II, enzymów kluczowych dla replikacji DNA i podziału komórkowego, które stanowią cele

wielu klasycznych leków przeciwnowotworowych (Yang et al., 2016).

Kolejnym ważnym obszarem badań są właściwości antyoksydacyjne cynamonu. Badania nad olejkami eterycznymi potwierdziły ich silne właściwości redukujące oraz zdolność do neutralizacji wolnych rodników. Analiza korelacyjna wykazała istotny związek pomiędzy całkowitą zawartością związków fenolowych a potencjałem antyoksydacyjnym tych preparatów (Trifan et al., 2021). Jednocześnie liczne doniesienia wskazują, że aldehyd cynamonowy może wywoływać wzrost wewnątrzkomórkowego stężenia reaktywnych form tlenu (ROS), co w nadmiarze prowadzi do uszkodzeń lipidów, białek oraz DNA, skutkując destabilizacją komórki i aktywacją mechanizmów apoptotycznych w komórkach nowotworowych (Shanmugam et al., 2022; Mohanty et al., 2025).

Równolegle wykazano, że ekstrakty z *C. verum* hamują proliferację, migrację i inwazję komórek nowotworowych, przy jednoczesnej selektywności działania oraz ograniczonej cytotoksyczności wobec komórek prawidłowych (Wu et al., 2018; Mohanty et al., 2024). W przypadku nowotworów hematologicznych wodne ekstrakty z cynamonu zmniejszały stres oksydacyjny oraz wspomagały aktywność układu immunologicznego w rozpoznawaniu komórek nowotworowych jako obcych (Caserta et al., 2023).

Dodatkowe mechanizmy cytotoksyczne opisano w badaniach nad aldehydem kumarowym pochodzącym z kory *C. verum*. Zaobserwowano m.in. indukcję wakuolizacji lizosomalnej oraz zwiększenie objętości przedziałów kwaśnych (VAC) (Yang et al., 2016). Ponadto ekstrakty z *C. verum* wykazywały zdolność do hamowania angiogenezy *in vivo* w modelu błony

kosmówkowo-omoczniowej kurcząt, poprzez ograniczenie tworzenia nowych naczyń krwionośnych zaopatrujących guz nowotworowy (Hatte et al., 2025).

W ostatnich latach szczególne zainteresowanie budzą również nanocząsteczki przygotowane na bazie cynamonu (m.in. ZnO-NPs, nanocząstki srebra oraz chitozanu), które wykazują zwiększoną skuteczność przeciwnowotworową przy jednoczesnym obniżeniu toksyczności systemowej, m.in. w terapii nowotworów jamy ustnej, skóry i piersi (Shanmugam et al., 2022; Alanazi, 2024; Joshi et al., 2025). Nanocząstki te charakteryzują się wyższą aktywnością cytotoksyczną wobec komórek nowotworowych (niższe wartości IC_{50}) w porównaniu z wolnymi ekstraktami, przy zachowaniu niskiej toksyczności wobec komórek prawidłowych (Khoshnevisan et al., 2022; Alanazi, 2024). Innowacyjnym podejściem terapeutycznym jest ponadto opracowanie żelu mukoadhezyjnego zawierającego bioaktywne związki z *C. verum* oraz goździka (*Eugenia caryophyllata*) do miejscowego leczenia raka jamy ustnej, który zapewnia przedłużone uwalnianie substancji czynnych i zwiększa efekt terapeutyczny (Ahmad et al., 2025).

Podsumowując, cynamon i jego bioaktywne składniki wykazują wielokierunkowe działanie przeciwnowotworowe, obejmujące indukcję apoptozy, zatrzymanie cyklu komórkowego, hamowanie angiogenezy oraz modulację stresu oksydacyjnego. Efekty te potwierdzono zarówno w badaniach *in vitro*, jak i *in vivo*, przy jednoczesnej względnej selektywności wobec komórek nowotworowych i ograniczonej cytotoksyczności względem komórek prawidłowych. Szczególnie obiecujące wyniki uzyskano dla nowoczesnych formułacji, takich jak nanocząsteczki i układy mukoadhezyjne, które zwiększają biodostępność i skuteczność terapeutyczną związków pochodzących z *C. verum*. Zgromadzone dane wskazują, że cynamon może stanowić wartościowe uzupełnienie strategii przeciwnowotworowych, wymagające jednak dalszych, dobrze zaprojektowanych badań klinicznych.

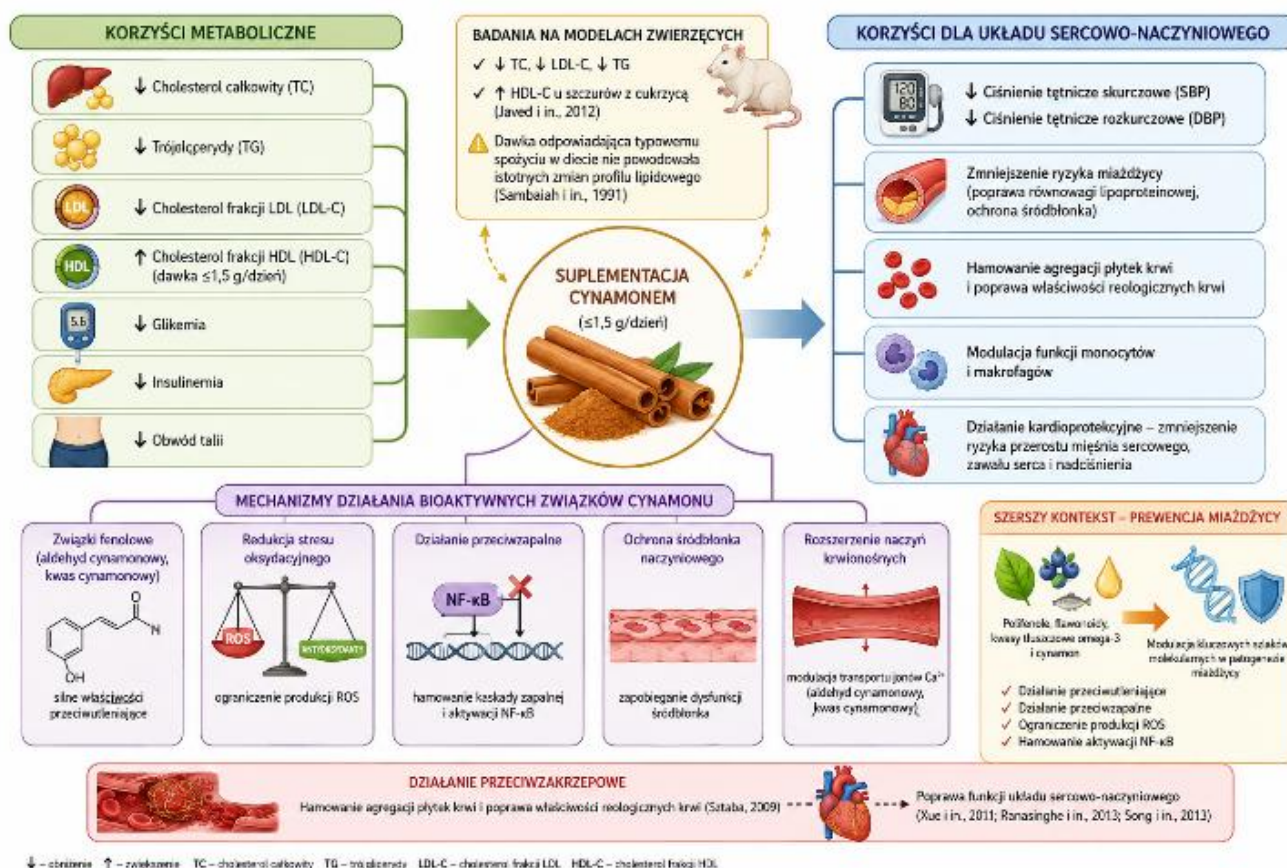
Wpływ suplementacji cynamonem na metabolizm i układ sercowo-naczyniowy. Wyniki badań wskazują, że suplementacja cynamonem wywiera istotny wpływ na zdrowie metaboliczne oraz sercowo-naczyniowe (ryc.

4). Do głównych korzyści należą redukcja kluczowych markerów ryzyka kardio-metabolicznego, takich jak cholesterol całkowity (TC), trójglicerydy (TG) oraz cholesterol frakcji LDL (LDL-C), a także obniżenie glikemii i insulinemii. Dodatkowo obserwowano zmniejszenie obwodu talii oraz korzystny wpływ na wartości skurczowego i rozkurczowego ciśnienia tętniczego. Co istotne, suplementacja w dawce $\leq 1,5$ g/dzień sprzyjała również wzrostowi stężenia cholesterolu frakcji HDL (HDL-C), co wskazuje na potencjalną poprawę równowagi lipoproteinowej i zmniejszenie ryzyka rozwoju miażdżycy (Kutbi et al., 2021).

Dane z badań na modelach zwierzęcych potwierdzają te obserwacje. Wykazano, że cynamon obniża stężenie cholesterolu całkowitego, cholesterolu LDL oraz trójglicerydów, jednocześnie zwiększając poziom HDL u szczurów z cukrzycą (Javed et al., 2012). Warto jednak podkreślić, że dawka odpowiadająca typowemu spożyciu cynamonu w diecie człowieka nie powodowała istotnych zmian profilu lipidowego u zwierząt doświadczalnych (Sambaiah et al., 1991), co sugeruje zależność efektu od wielkości dawki.

W badaniach eksperymentalnych wykazano ponadto, że wodny ekstrakt z cynamonu może hamować nadmierną aktywność płytek krwi oraz modulować funkcje monocytów i makrofagów, co ma istotne znaczenie w patogenezie miażdżycy. Efekty przeciwzapalne i przeciwmiażdżycowe wynikają prawdopodobnie z regulacji aktywności komórek żernych oraz wpływu na stabilność blaszek miażdżycowych (Kang et al., 2014).

Istotną rolę w działaniu kardioprotekcyjnym odgrywają również związki fenolowe obecne w korze cynamonu, w tym aldehyd cynamonowy i kwas cynamonowy. Wykazują one silne właściwości przeciwutleniające, redukują stres oksydacyjny, hamują kaskadę zapalną oraz chronią śródbłonek naczyń przed dysfunkcją. Dzięki temu cynamon może ograniczać ryzyko przerostu mięśnia sercowego, zawału serca oraz rozwoju zaburzeń metabolicznych, takich jak cukrzyca, otyłość, hiperlipidemia i nadciśnienie tętnicze, uznawanych za główne czynniki ryzyka chorób sercowo-naczyniowych (Mohammadabadi et al., 2024; Roşian et al., 2025).



Ryc. 4. Wpływ suplementacji cynamonem na metabolizm i układ sercowo-naczyniowy

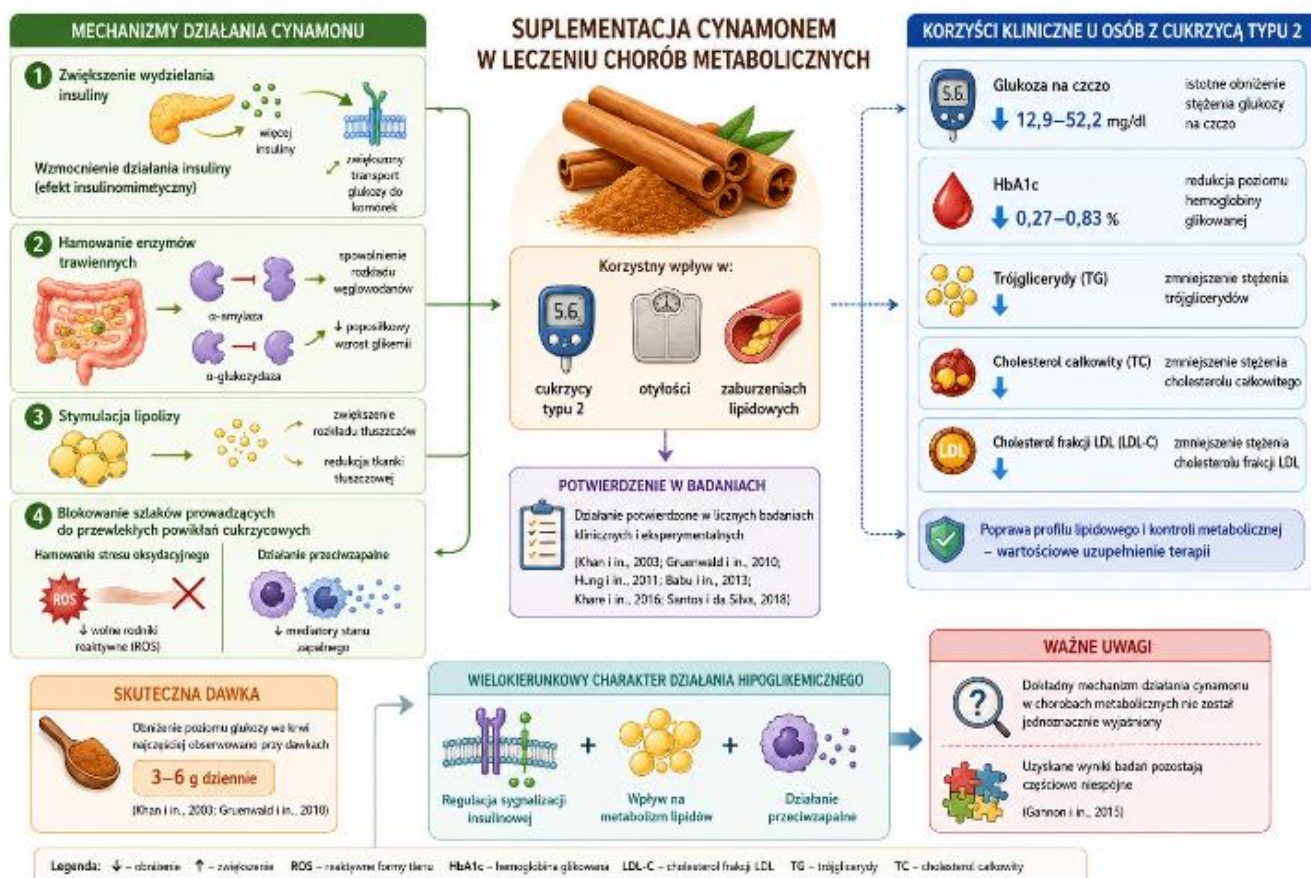
Powyższe obserwacje wpisują się w szerszy nurt badań nad rolą bioaktywnych składników diety w prewencji i leczeniu miażdżycy. Autorzy podkreślają, że naturalne związki o działaniu przeciwutleniającym i przeciwzapalnym – w tym polifenole, flawonoidy oraz kwasy tłuszczowe omega-3 – modulują kluczowe szlaki molekularne związane z patogenezą miażdżycy, m.in. poprzez ograniczenie produkcji ROS oraz hamowanie aktywacji czynnika transkrypcyjnego NF- κ B. Włączenie cynamonu do tej grupy bioaktywnych składników wydaje się uzasadnione zarówno z perspektywy klinicznej, jak i molekularnej (Roşian et al., 2025).

Cynamon wykazuje ponadto działanie przeciwzakrzepowe, hamując agregację płytek krwi i wpływając na właściwości reologiczne krwi (Sztaba, 2009). Badania *in vivo* na szczurach wykazały, że kwas cynamonowy oraz aldehyd cynamonowy, poprzez modulację transportu jonów wapnia, powodują rozszerzenie naczyń krwionośnych, co dodatkowo sprzyja poprawie funkcji układu sercowo-naczyniowego (Xue et al., 2011; Ranasinghe et al., 2013; Song et al., 2013).

Potencjał przeciwcukrzycowy i metaboliczny cynamonu. Badania naukowe wykazują, że suplementacja cynamonem może

wywierać korzystny wpływ w leczeniu cukrzycy typu 2, otyłości oraz zaburzeń lipidowych. Jego działanie obejmuje kilka uzupełniających się mechanizmów: zwiększenie wydzielania insuliny oraz wzmocnienie jej działania na poziomie komórkowym (efekt insulinomimetyczny), hamowanie aktywności enzymów trawiennych (α -amylazy i α -glukozydazy), co prowadzi do spowolnienia rozkładu węglowodanów i ograniczenia popołykowego wzrostu glikemii, a także stymulację lipolizy oraz blokowanie szlaków metabolicznych odpowiedzialnych za rozwój przewlekłych powikłań cukrzycowych, w tym stresu oksydacyjnego i stanu zapalnego (Khan et al., 2003; Gruenwald et al., 2010; Hung et al., 2011; Babu et al., 2013; Khare et al., 2016; Santos i da Silva, 2018).

Kliniczne korzyści obserwowane u osób z cukrzycą typu 2 obejmowały istotne obniżenie stężenia glukozy na czczo (spadek o 12,9-52,2 mg/dl), redukcję poziomu hemoglobiny glikowanej HbA1c (o 0,27-0,83 %) oraz poprawę profilu lipidowego, w tym zmniejszenie stężenia trójglicerydów, cholesterolu całkowitego i cholesterolu frakcji LDL (Santos & da Silva, 2018). Wyniki te wskazują, że cynamon może stanowić wartościowe uzupełnienie terapii metabolicznych zaburzeń glikemii (ryc. 5).



Ryc. 5. Mechanizmy hipoglikemiczne cynamonu

Obniżenie poziomu glukozy we krwi obserwowano najczęściej przy dawkach cynamonu wynoszących 3-6 g dziennie (Khan et al., 2003; Gruenwald et al., 2010). Pomimo licznych doniesień klinicznych i eksperymentalnych dokładny mechanizm działania cynamonu w chorobach metabolicznych nie został jednak jednoznacznie wyjaśniony, a uzyskane wyniki pozostają częściowo niespójne (Gannon et al., 2015). Część autorów podkreśla wielokierunkowy charakter działania hipoglikemicznego, obejmujący zarówno regulację sygnalizacji insulinowej, jak i wpływ na metabolizm lipidów oraz procesy zapalne (ryc. 5).

Właściwości przeciwzapalne i przeciwdrobnoustrojowe cynamonu.

Cynamon, ze względu na złożony skład chemiczny, wykazuje szerokie spektrum właściwości przeciwzapalnych i przeciwdrobnoustrojowych. Działanie to jest wynikiem synergii licznych związków bioaktywnych, w szczególności aldehydu cynamonowego, eugenolu oraz polifenoli.

Przedstawione poniżej wyniki badań wskazują na kluczowe mechanizmy molekularne i kliniczne, a także na potencjalne znaczenie terapeutyczne tych substancji.

Mechanizmy te obejmują m.in. hamowanie aktywacji szlaków sygnałowych związanych z odpowiedzią zapalną, takich jak NF-κB i MAPK, oraz ograniczenie produkcji prozapalnych cytokin i mediatorów stanu zapalnego. Jednocześnie związki zawarte w cynamonie wykazują zdolność do destabilizacji błon komórkowych drobnoustrojów, zaburzenia ich metabolizmu oraz hamowania tworzenia biofilmów. Efekty te obserwowano zarówno w badaniach *in vitro*, jak i *in vivo*, co potwierdza biologiczną istotność opisywanych mechanizmów. W konsekwencji cynamon postrzegany jest jako obiecujący naturalny czynnik wspomagający profilaktykę i terapię chorób o podłożu zapalnym i infekcyjnym (Tabela 3).

Mechanizmy przeciwzapalne cynamonu

Mechanizm działania	Opis działania	Źródła
Spowolnienie szlaku NF-κB	Ekstrakty hamują aktywację i translokację do jądra czynnika transkrypcyjnego NF-κB, kontrolujący ekspresję genów zapalnych	Youn et al., 2008
Hamowanie enzymów zapalnych	Obniżają produkcję i aktywność enzymów: (iNOS; COX-2), co prowadzi do zmniejszenia produkcji tlenku azotu (NO) i prostaglandyn (PGE2)	Lee et al., 2005; Hwang et al., 2009
Redukcja cytokin	Obniżają poziom i ekspresję mRNA prozapalnych cytokin (TNF-α, IL-1β, IL-6)	Yu et al., 2012
Wpływ na receptory (TLR)	Hamowanie oligomeryzacji receptora TLR4, blokując inicjację sygnału zapalnego na bardzo wczesnym etapie	Youn et al., 2008
Wpływ na kinazy	Ekstrakty hamują aktywność kinaz (Syk, Src), które są zaangażowane w kaskadę sygnałową prowadzącą do aktywacji NF-κB	Yu et al., 2012

Badania przeprowadzone na modelach mysich wykazały, że trans-cynamaldehyd istotnie redukuje kolonizację antybiotyko-opornych szczepów *Escherichia coli* w pęcherzu moczowym i cewce moczowej, co wskazuje na możliwość jego zastosowania w profilaktyce oraz wspomaganiu leczenia zakażeń dróg moczowych (Narayanan, 2017). Ponadto ekstrakty z kory cynamonowca obniżają ekspresję genów prozapalnych w mikrogleju stymulowanym lipopolisacharydem (LPS), co sugeruje potencjalne zastosowanie w terapii chorób neurozapalnych i neurodegeneracyjnych (Hwang, 2009).

Wyniki badań klinicznych potwierdzają właściwości przeciwzapalne cynamonu. Suplementacja prowadziła do istotnego obniżenia stężenia białka C-reaktywnego (CRP) w surowicy krwi, zwłaszcza u osób z wyjściowo podwyższonym poziomem markerów zapalnych (>3 mg/dl) oraz w przypadku długotrwałej suplementacji trwającej ponad 12 tygodni (Vallianou, 2019).

Dodatkowo, w modelach mysich zapalenia okrzężnicy wykazano, że niektóre związki chemiczne obecne w ekstrakcie z cynamonu, które indywidualnie nie wykazują działania przeciwzapalnego, w połączeniu wywołują efekt synergistyczny, wzmacniając ogólne właściwości przeciwzapalne ekstraktu (Schink et al., 2018). Wyniki te podkreślają znaczenie

złożonego składu fitochemicznego cynamonu oraz jego potencjał jako naturalnego środka modulującego odpowiedź zapalną.

Neuroprotektoryjne właściwości cynamonu. Cynamon wykazuje również działanie neuroprotektoryjne, przyczyniając się do zmniejszenia ryzyka rozwoju chorób neurodegeneracyjnych, w tym demencji oraz chorób Alzheimera i Parkinsona (Angelopoulou et al., 2021). W przebiegu tych schorzeń dochodzi do postępującego uszkodzenia neuronów oraz zaburzeń transmisji synaptycznej, co prowadzi do upośledzenia funkcji poznawczych, motorycznych i behawioralnych (Pitton Rissardo et al., 2025). Związki bioaktywne obecne w cynamonie hamują gromadzenie się w mózgu białka tau, którego patologiczna agregacja odpowiada za dysfunkcję i degenerację komórek nerwowych (Momtaz et al., 2018). Dodatkowo wykazują zdolność do zapobiegania powstawaniu oraz akumulacji β-amyloidu, tworzącego blaszki amyloidowe o udokumentowanym działaniu neurotoksycznym (Frydman-Marom et al., 2011).

Badania przeprowadzone na modelach mysich wykazały, że doustne podawanie sproszkowanego cynamonu prowadziło do powstawania benzoesu sodu we krwi i tkance mózgowej. Związek ten chronił neurony dopaminergiczne, normalizował poziom

neuroprzekazników oraz poprawiał funkcje motoryczne zwierząt (Khasnavis et al., 2014). Ponadto wykazano, że ekstrakty z cynamonu mogą nie tylko ograniczać tworzenie się toksycznych agregatów białkowych, lecz także sprzyjać rozpuszczaniu już istniejących złogów amyloidowych, co ma szczególne znaczenie w kontekście terapii choroby Alzheimera (Peterson et al., 2009; Frydman-Marom et al., 2011; Ranasinghe et al., 2013).

Coraz liczniejsze dowody wskazują, że bioaktywne składniki cynamonu, takie jak kwas cynamonowy, aldehyd cynamonowy oraz polimery procyanidyn typu A, wywierają korzystny wpływ na różne schorzenia neurologiczne. Obejmuje to m.in. modulację procesów neurozapalnych, ograniczenie stresu oksydacyjnego oraz ochronę neuronów przed apoptozą, co znajduje odzwierciedlenie w potencjalnym zastosowaniu cynamonu we wspomaganiu leczenia choroby Parkinsona, choroby Alzheimera, stwardnienia rozsianego, udaru mózgu, migreny, nadpobudliwości psychoruchowej oraz innych zaburzeń neurodegeneracyjnych i neurozapalnych (Ahmadi et al., 2022).

Działanie przeciwdrobnoustrojowe i przeciwgrzybicze cynamonu. Cynamon jest jednym z bardziej skutecznych naturalnych antyseptyków. Wykazuje działanie bakteriobójcze, szczególnie wobec bakterii Gram-dodatnich, takich jak *Listeria innocua*, *Staphylococcus aureus* czy *Bacillus cereus*, a także hamuje wzrost mniej wrażliwych bakterii Gram-ujemnych, m.in. *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* i *Salmonella typhi*. Dzięki temu może wspomagać leczenie próchnicy, chorób przyzębia oraz infekcji dróg oddechowych (Dhore i Jha, 2019; Behbahani et al., 2020; Yanakiev et al., 2020).

Aldehyd cynamonowy zwalcza skutecznie zarówno wrażliwe, jak i odporne szczepy *Helicobacter pylori* (Yu et al., 2023; Li et al., 2024), a także lekooporne szczepy *Mycobacterium tuberculosis* i *Mycobacterium bovis*, przy minimalnych stężeniach wynoszących 12,5-25 µg/ml (Mota et al., 2019). Wyniki te podkreślają potencjał cynamonu jako naturalnego środka wspierającego terapię zakażeń trudnych w leczeniu.

Cynamon wykazuje również silne działanie przeciwgrzybicze. Skutecznie niszczy grzyby pleśniowe, m.in. z rodzajów *Aspergillus* i *Penicillium*, oraz drożdżaki, co może wspierać

leczenie kandydozy, w tym w obrębie jamy ustnej (Singh et al., 2007; Yanakiev et al., 2020). Minimalne stężenia hamujące rozwój grzybów z gatunku *Malassezia* sp., odpowiedzialnych za powstawanie łupieżu u ludzi, wynoszą 0,5-2 mg/ml (Mariappan et al., 2013).

Mechanizm działania przeciwdrobnoustrojowego i przeciwgrzybiczego cynamonu polega przede wszystkim na uszkodzaniu błony komórkowej bakterii i grzybów, co prowadzi do wycieku zawartości komórki i w konsekwencji jej śmierci (Singh i Shrivastava, 2015; Behbahani et al., 2020). Choć w bezpośrednim porównaniu z antybiotykami skuteczność ekstraktów cynamonu jest niższa, mogą one stanowić cenne uzupełnienie terapii lub alternatywę w przypadkach oporności lub przeciwwskazań do leczenia konwencjonalnego (Dhore i Jha, 2019).

Mechanizmy osteoprotekcyjne cynamonu. Aldehyd cynamonowy wykazuje właściwości terapeutyczne w przypadku różnych chorób kości. W badaniach na modelach mysich wykazano, że jego podawanie poprawia wytrzymałość kości, nie wpływając jednocześnie na masę ciała ani poziom glukozy we krwi, co jest szczególnie istotne w kontekście leczenia osteoporozy cukrzycowej (Songjie et al., 2024).

Zarówno badania *in vitro* (na liniach komórkowych), jak i *in vivo* (na zwierzętach) potwierdziły, że kwas cynamonowy stymuluje aktywność osteoblastów – komórek odpowiedzialnych za tworzenie macierzy kostnej i procesy regeneracyjne. Wskazuje to na jego potencjalną rolę w terapii osteoporozy oraz zaburzeń przebudowy kości (Hong et al., 2022).

Mechanizm działania aldehydu cynamonowego obejmuje utrzymanie prawidłowego poziomu białka netryny-1 oraz jego receptorów, które odgrywają kluczową rolę w ochronie tkanki kostnej. Dodatkowo związek ten hamuje aktywność osteoklastów oraz tłumi działanie katepsyny K – enzymu odpowiedzialnego za degradację macierzy kostnej, co sprzyja zachowaniu równowagi między resorpcją a tworzeniem kości (Yu et al., 2023; Songjie et al., 2024).

Cynamon w profilaktyce i terapii chorób jamy ustnej. Aby złagodzić ból zęba, można przyłożyć wacik nasączony olejkami cynamonowymi, który wykazuje działanie przeciwbólowe i antyseptyczne. Ponadto liście cynamonu mogą być stosowane w higienie jamy

ustnej, wspomagając oczyszczanie zębów oraz poprawę ich koloru, co może przyczyniać się do ich naturalnego wybielenia (Rawat et al., 2020).

Wpływ cynamonu na funkcjonowanie jelit i mikrobiom jelitowy. Związki bioaktywne zawarte w cynamonie pozytywnie wpływają na funkcjonowanie jelit. Ekstrakt z cynamonu zmniejsza przepuszczalność połączeń ścisłych między komórkami nabłonka jelitowego, jednocześnie stymulując produkcję śluzu (mucyn) oraz białek odpowiedzialnych za utrzymanie integralności bariery jelitowej (Qi et al., 2021; Hong et al., 2022).

Wodny ekstrakt cynamonu redukuje także częstotliwość wypróżnień oraz nadwrażliwość na ból poprzez hamowanie ekspresji genu *Tph1* (hydroksylaza tryptofanu 1) w jelicie grubym. W efekcie prowadzi to do obniżenia poziomu serotoniny, której nadmiar w jelicie odpowiada za ból i biegunki charakterystyczne dla zespołu jelita drażliwego z przewagą biegunki (IBS-D) (Yu et al., 2023).

Dodatkowo suplementacja aldehydu cynamonowego łagodzi stany zapalne i sprzyja korzystnej przebudowie mikrobiomu jelitowego. Zwiększa liczebność pożytecznych bakterii, takich jak *Akkermansia*, *Bacteroides*, *Clostridium* III, *Psychrobacter* i *Intestinimonas*, przy jednoczesnym zmniejszeniu populacji *Ruminococcus* oraz *Escherichia/Shigella* (Qi et al., 2021). Wyniki te wskazują na wielokierunkowy, modulujący wpływ cynamonu na zdrowie jelit.

Wpływ cynamonu na funkcjonowanie nerek i ochronę przed nefropatią cukrzycową. Związki bioaktywne zawarte w cynamonie mogą wpływać na mechanizmy patofizjologiczne związane z rozwojem przewlekłej choroby nerek, w tym stres oksydacyjny, przewlekły stan zapalny, cukrzycę, dyslipidemię oraz zaburzenia mikrobioty jelitowej (de Souza Gouveia Moreira et al., 2023). Chociaż badania przedkliniczne sugerują działanie ochronne – przykładowo olejek z kory *C. verum* neutralizował wolne rodniki i chronił nerki przed uszkodzeniem wywołanym ekspozycją na chloroform (Bellassoued et al., 2019) – nadal brakuje jednoznacznych dowodów klinicznych potwierdzających skuteczność ekstraktów cynamonu jako interwencji terapeutycznej w przewlekłej chorobie nerek (de Souza Gouveia Moreira et al., 2023).

Olejek z liści i kory *C. verum* wykazuje silną aktywność przeciwdrobnoustrojową wobec

najczęstszych patogenów układu moczowego, w tym *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Proteus* spp. oraz *Pseudomonas aeruginosa* (Dhore i Jha, 2019; Das, 2020). Zarówno badania *in vitro*, jak i *in vivo* wskazują, że trans-cynamaldehyd redukuje kolonizację dróg moczowych przez patogenne *E. coli*, a także hamuje tworzenie biofilmu – kluczowego czynnika utrudniającego leczenie zakażeń związanych z cewnikowaniem (Das, 2020; de Souza Gouveia Moreira et al., 2023).

Co istotne, zastosowanie trans-cynamaldehydu jako roztworu do udrażniania cewnika lub jako powłoki antybakteryjnej pozwala skutecznie ograniczać tworzenie biofilmu, nie wywołując jednocześnie cytotoksyczności wobec komórek nabłonka pęcherza. Dodatkowo hamowanie ekspresji genów odpowiedzialnych za przyleganie i inwazję bakterii do komórek gospodarza wskazuje na potencjalne wykorzystanie cynamonu jako naturalnej strategii przeciwbakteryjnej (Das, 2020).

Cukrzyca jest jedną z głównych przyczyn przewlekłej choroby nerek (nefropatii cukrzycowej), a ekstrakty *C. verum* wykazują obiecujące właściwości metaboliczne: obniżają poziom glukozy, poprawiają insulinowrażliwość oraz łagodzą uszkodzenia nerek związane z przewlekłą hiperglikemią. Badania sugerują, że długotrwałe stosowanie ekstraktu z *C. verum* może działać ochronnie na nerki u osób z cukrzycą (de Souza Gouveia Moreira et al., 2023).

Działanie antypasożytnicze związków bioaktywnych cynamonu. *C. verum* wykazuje silne działanie przeciwpasożytnicze (Salama et al., 2021). W badaniach na królikach zakażonych świerzmem *Psoroptes cuniculi* stosowano miejscowo 2,5 ml olejku eterycznego rozcieńczonego w stężeniach od 10 % do 0,03 % w oleju parafinowym, uzyskując 100 % skuteczność terapii (Fichi et al., 2007).

Skuteczność przeciwpasożytnicza potwierdzono również w modelach nicieni. Leczenie ekstraktem z cynamonu myszy zakażonych włośnicą (trychinozą) spowodowało redukcję liczby dorosłych pasożytów o 68 % oraz larw o 54,6 % (Salama et al., 2021). Wrażliwe na działanie aldehydu cynamonowego okazały się także larwy innych nicieni, takich jak *Trichuris suis* i *Oesophagostomum dentatum* (Williams et al., 2015). Obiecujące wyniki uzyskano również w terapii zakażeń *Toxoplasma gondii*, gdzie metanolowy ekstrakt *C. verum* znacząco

redukował liczbę pasożytów zarówno *in vitro*, jak i *in vivo* (Alanazi et al., 2022).

Jednym z aktywnych składników cynamonu jest linalol, który wykazuje silne działanie terapeutyczne przeciwko przywrmie *Schistosoma japonicum* ($IC_{50} = 0,07$ mg/L) oraz jej żywicielowi pośredniemu, ślimakowi *Oncomelania hupensis* ($IC_{50} = 0,25$ mg/L) (Yang et al., 2014). Ekstrakty z cynamonu mogą również stanowić alternatywę dla klasycznej chemioterapii w zwalczaniu piroplazmozy koni (*Babesia caballi*, *Theileria equi*), piroplazmozy bydła (*B. bovis*, *B. bigemina*, *B. divergens*) oraz ludzkiej babeszjozy (El-Saber Batiha et al., 2020).

Wysoką aktywność przeciwprzywrotniczą wykazuje także frakcja dichlorometanowa z kory cynamonowca. W badaniach *in vitro* wykazano jej silne działanie wobec *Leishmania donovani* ($IC_{50} = 33,6$ µg/ml), związane z indukcją apoptozy. Badania *in vivo* potwierdziły wysoki stopień ochrony u myszy (80,91 % w wątrobie i 82,92 % w śledzionie) oraz u chomików (odpowiednio 75,61 % i 78,93 %) (Afrin et al., 2019).

Aldehyd cynamonowy podawany myszom w dawce 50 µg/ml powodował całkowitą redukcję larw *Echinococcus granulosus sensu lato* w ciągu 8 dni (Fabbri et al., 2020). Ponadto ekstrakty z *C. verum* okazały się skuteczne w zwalczaniu doświadczalnej infekcji *Cryptosporidium parvum* u myszy (Abu El Ezzet et al., 2011).

Warto podkreślić, że mimo obiecujących wyników badań przedklinicznych konieczne są dalsze badania kliniczne, aby ocenić bezpieczeństwo i skuteczność stosowania cynamonu w terapii przeciw pasożytniczej u ludzi, ponieważ większość dostępnych danych pochodzi z badań *in vitro* oraz modeli zwierzęcych.

Działanie przeciwalergiczne i przeciwzapalne ekstraktów *C. verum*. Ekstrakt z kory cynamonowca wykazuje korzystny wpływ w leczeniu alergii i stanów zapalnych. Badania wskazują, że może on wspomagać terapię alergicznego nieżytu nosa, choć dotychczas przeprowadzono je na stosunkowo niewielkich grupach uczestników (Scachetti et al., 2020).

Komórki tuczne (mastocyty), poprzez uwalnianie histaminy, odgrywają kluczową rolę w rozwoju reakcji alergicznych. Ekstrakty z kory i liści *C. verum* hamują wydzielanie histaminy przez mastocyty, co łagodzi typowe objawy alergiczne, takie jak katar sienny, świąd czy pokrzywka (Hagenlocher et al., 2013; Badger-Emeka et al.,

2020). Donosowe podanie ekstraktu wpływa również na odpowiedź immunologiczną poprzez hamowanie dojrzewania komórek dendrycznych oraz proliferacji limfocytów T, co zmniejsza stan zapalny w obrębie dróg oddechowych i ogranicza ryzyko wystąpienia anafilaksji (Ose et al., 2019; Steels et al., 2019).

Kliniczne zastosowanie sprayu donosowego zawierającego ekstrakt z kory *C. verum*, bogaty w polifenole typu A, okazało się bezpieczne i skuteczne u pacjentów z ostrym sezonowym alergicznym nieżytem nosa, przyczyniając się do poprawy jakości życia (Walanj et al., 2014).

Działanie przeciwzapalne ekstraktu cynamonu nie ogranicza się jednak wyłącznie do dróg oddechowych. W obrębie jelit wykazuje on działanie ochronne, zwiększając oporność elektryczną i szczelność połączeń ścisłych między komórkami nabłonka, a także redukując poziom mediatorów zapalnych, takich jak tlenek azotu i cytokiny prozapalne (Hagenlocher et al., 2013; Kim et al., 2017).

Warto podkreślić, że choć dotychczasowe wyniki badań są obiecujące, konieczne są dalsze, dobrze zaprojektowane badania kliniczne na większych populacjach pacjentów, aby jednoznacznie potwierdzić skuteczność i bezpieczeństwo stosowania ekstraktu cynamonu w terapii alergii i stanów zapalnych.

Dawkowanie cynamonu

Cynamon może wspomagać poprawę stanu zdrowia pacjentów (Gu et al., 2021), jednak jego stosowanie powinno odbywać się w odpowiednio dobranych ilościach i formach. Dodanie jednej czubatej łyżeczki cynamonu (ok. 6 g) do posiłku, np. płatków owsianych z mlekiem, istotnie zmniejsza poposiłkowy wzrost stężenia glukozy we krwi (Wang et al., 2020).

Przyjmowanie co najmniej 1,5 g cynamonu dziennie obniża poziom trójglicerydów, cholesterolu całkowitego oraz cholesterolu LDL u osób z chorobą metaboliczną (Kutbi et al., 2021). Suplementacja prowadzona przez minimum 8 tygodni powoduje również znaczące obniżenie ciśnienia tętniczego (Hadi et al., 2020). Dawka w zakresie 1-6 g cynamonu dziennie, najczęściej w postaci proszku, wydaje się być skuteczną terapią wspomagającą w cukrzycy typu 2 oraz innych zaburzeniach glikemii (Khan et al., 2003; Santos et al., 2018).

W badaniach przeprowadzonych u osób z cukrzycą typu 2, które przyjmowały proszek

cynamonowy w trzech różnych dawkach (1, 3 i 6 g dziennie przez 40 dni), odnotowano obniżenie średniego poziomu glukozy na czczo o 18-29 %, trójglicerydów o 23-30 %, cholesterolu LDL o 7-27 % oraz cholesterolu całkowitego o 12-26 % (Blevins et al., 2007). Dodatkowo w przypadku przebiegów stosowanie dawki 2,5 g cynamonu trzy razy dziennie wykazało działanie przeciwwgorączkowe (Rawat et al., 2020).

Działania niepożądane obserwowane u ludzi i przeciwwskazania stosowania cynamonu

Niestety, cynamon ze względu na swoje silne działanie alergizujące nie jest przyprawą polecaną każdemu (Tabela 4). Zalicza się go zarówno do alergenów kontaktowych, jak i pokarmowych, co oznacza, że może wywoływać objawy alergiczne w obrębie czerwieni wargowej, dziąseł oraz skóry dłoni (Kaławaj et al., 2015).

Powszechne stosowanie cynamonu doprowadziło do licznych doniesień o działaniach niepożądanych związanych zarówno z krótkotrwałym, jak i długotrwałym spożyciem. Najczęściej obserwowano zaburzenia ze strony przewodu pokarmowego (żołądka i jelit) oraz

reakcje alergiczne, które w większości przypadków miały charakter samoograniczający się. Chociaż cynamon uznawany jest za bezpieczny jako przyprawa i substancja aromatyzująca, jego długotrwałe lub nadmierne stosowanie może stanowić zagrożenie dla zdrowia, dlatego w zastosowaniach leczniczych powinno podlegać kontroli klinicznej (Hajimonfarednejad et al., 2019).

Cynamon może powodować wysychanie i podrażnienie jamy ustnej oraz gardła, prowadząc do kaszlu, odruchów wymiotnych, wymiotów, a w przypadku aspiracji proszku – do podrażnienia dróg oddechowych, trudności w oddychaniu oraz zwiększonego ryzyka zapalenia płuc, a nawet zapadnięcia się płuca (Grant-Alfieri et al., 2013). Szczególną jednostką kliniczną jest tzw. cynamonowe kontaktowe zapalenie jamy ustnej (ang. *cinnamon contact stomatitis*, CCS), które może występować sporadycznie po spożyciu produktów zawierających sztuczne aromaty cynamonowe. Lekarze zajmujący się chorobami jamy ustnej powinni być świadomi istnienia CCS, aby umożliwić prawidłową diagnostykę i wdrożenie właściwego postępowania terapeutycznego (Georgakopoulou, 2010).

Tabela 4

Działanie niepożądane, alergiczne i ryzyka związane z przyjmowaniem *Cinnamomum* spp.

Działanie niepożądane	Obserwacja	Grupa	Źródło
1	2	3	4
Wpływ na cykl menstruacyjny	Wcześniejsze wystąpienie miesiączki, dłuższe i obfitsze krwawienia	Kobiety w wieku rozrodczym o regularnych cyklach	de Bosque-Plata et al., 2025
Krwawienie z nosa	Codziennie spożywanie cynamonu kulinarnego	Obserwacje kliniczne	Bosque-Plata et al., 2025
Ryzyko krwawienia przy interakcjach lekowych	Nasilenie działania przeciwzakrzepowego i przeciwplatekowego; możliwe interakcje z niesterydowymi lekami przeciwzapalnymi (NLPZ)	Pacjenci leczeni aspiryną, warfaryną, NLPZ	Gu et al., 2021
Podrażnienie skóry	Olejek z liści cynamonowca drażniący; konieczne rozcieńczanie przy stosowaniu zewnętrznym	Stosowanie dermatologiczne	Rawat et al., 2020

Ciąg dalszy Tabeli 4

1	2	3	4
Reakcje kontaktowe i alergiczne skóry	Objawy: podrażnienie skóry i błon śluzowych	Pacjenci dermatologiczni	Campbell et al., 2008
Egzemowe i pęcherzowe zapalenie skóry po kąpieli błotnej z olejkim cynamonowym	Rozległe zmiany zapalne skóry po ekspozycji; potwierdzone testami płatkowymi (eugenol, aldehyd cynamonowy)	Kobieta, 74 lata	Garcia-Abujeta et al., 2005
Toksyczność płucna i ryzyko teratogenne	Ekstrakt i czysty aldehyd cynamonowy mogą uszkadzać płuca w wysokich dawkach; potencjalne ryzyko dla płodu	Modele zwierzęce; wnioski dotyczące ciąży	Khan et al., 2023
Anafilaksja/reakcje natychmiastowe na aldehyd	Po posiłku; testy punktowe dodatnie u osób ekspozowanych na dym z dodatkiem aldehydu cynamonowego	Pacjent + grupa kontrolna (n = 18)	Jensen-Jarolim et al., 2016
Wpływ olejku eterycznego z kory na fibroblasty	Działanie antyproliferacyjne, hamowanie markerów zapalnych; modulacja ekspresji genów	Badania <i>in vitro</i> na fibroblastach ludzkich	Han i Parker, 2017

Wysokie stężenia kumaryny oraz aldehydu cynamonowego wiązane są z powstawaniem owrzodzeń jamy ustnej (Vivas & Migliari, 2015). Ponadto nadmierne ilości tych związków mogą korelować z uszkodzeniem wątroby oraz epizodami hipoglikemii (Deng, 2012). Doniesienia sugerują również, że bardzo wysokie dawki mogą zwiększać ryzyko nowotworów, zaburzeń oddychania oraz interakcji z niektórymi lekami, co podkreśla konieczność ostrożności w suplementacji (Abraham et al., 2010).

Zmiany w jamie ustnej wywołane reakcją na substancje aromatyzujące cynamonu są rzadko rozpoznawane i prawdopodobnie niedoszacowane w praktyce klinicznej. Najczęściej zgłaszanym objawem jest uczucie pieczenia. Klinicznie zmiany manifestują się jako rumieniowe plamy o różnym stopniu nasilenia, często z towarzyszącą hiperkeratozą lub owrzodzeniem. Zmiany te zwykle ograniczają się do błony śluzowej policzków oraz bocznych powierzchni języka. Najczęściej identyfikowanym czynnikiem wywołującym była guma do żucia o smaku cynamonowym, a objawy ustępowały zazwyczaj w ciągu 1-2 dni

od zaprzestania stosowania produktu zawierającego cynamon (Allen & Blozis, 1988).

Zastosowanie cynamonu

Przetworzona kora cynamonu jest jedną z najpopularniejszych przypraw stosowanych na całym świecie, nie tylko w kuchni, lecz także w wielu gałęziach przemysłu. Wykorzystuje się ją m.in. w produkcji wypieków, słodczy, gum do żucia, mieszanek przyprawowych, napojów, cukierków, past do zębów, perfum, kosmetyków, artykułów toaletowych oraz szpitalnych środków dezynfekujących (Goel & Mishra, 2020; Trifan et al., 2021).

Kora cynamonu jest powszechnie wykorzystywana jako przyprawa, a jej podstawowym zastosowaniem pozostaje użycie kulinarne – jako dodatek smakowy i aromatyczny do potraw (ryc. 6). Cynamon znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle spożywczym, m.in. w produkcji czekolady, szczególnie w Meksyku, który należy do największych importerów cynamonu cejlońskiego. Dodawany jest również do deserów, takich jak szarlotka, pączki czy bułeczki cynamonowe, a także do słodczy pikantnych, herbaty, gorącej czekolady oraz

likierów. W kuchni cukierniczej preferuje się cynamon cejloński ze względu na jego delikatniejszy aromat i niższą zawartość kumaryny, co czyni go bezpieczniejszym przy regularnym spożyciu (Kowalska et al., 2021).

W kuchniach Bliskiego Wschodu cynamon jest często stosowany również w potrawach wytrawnych, zwłaszcza z mięsa drobiowego i jagnięciny, gdzie pełni funkcję przyprawy nadającej głębi smaku. Z kolei w Stanach Zjednoczonych cynamon powszechnie

wykorzystywany jest jako dodatek aromatyzujący do płatków śniadaniowych, wypieków oraz owoców, szczególnie jabłek; popularna jest także gotowa mieszanka cynamonu z cukrem dostępna w sklepach spożywczych. Istotnym, choć rzadziej opisywanym zastosowaniem kulinarnym cynamonu jest jego wykorzystanie w procesach marynowania i konserwowania żywności, co wynika z jego właściwości przeciwbakteryjnych (Kowalska et al., 2021).



Ryc. 6. Zastosowanie cynamonu

Kora cynamonu należy do nielicznych przypraw, które mogą być spożywane bezpośrednio. Od wieków sproszkowany cynamon stanowi ważny element kuchni perskiej, gdzie dodawany jest do gęstych zup, napojów oraz wyrobów cukierniczych. Często łączy się go z wodą różaną lub innymi przyprawami w celu przygotowania aromatycznych mieszanek wykorzystywanych do dań duszonych lub jako posypka do deserów (Kowalska et al., 2021). Tak szerokie zastosowanie kulinarne świadczy nie tylko o wyjątkowych walorach sensorycznych cynamonu, lecz także o jego znaczeniu kulturowym i tradycyjnym w różnych regionach świata.

Oprócz zastosowań kulinarnych cynamon znajduje również miejsce w medycynie tradycyjnej

i współczesnych badaniach naukowych. Stosuje się go w leczeniu astmy, zapalenia oskrzeli, biegunki, bólów głowy, stanów zapalnych oraz chorób serca (Singh et al., 2020). Ekstrakt z cynamonu wykazuje wysoki potencjał antyinfekcyjny przy jednoczesnym braku toksyczności wobec prawidłowych komórek płuc, co sugeruje możliwość jego wykorzystania jako uzupełnienia chemioterapii, zwiększającego skuteczność terapii konwencjonalnej (Wu et al., 2018).

W badaniach na świnkach morskich wykazano, że miejscowo aplikowany kwas cynamonowy zmniejszał zawartość melaniny w skórze o 29 % bez wywoływania działań niepożądanych, co wskazuje na potencjalne zastosowanie cynamonu w kosmetykach o działaniu rozjaśniającym (Yadav et al., 2023). Biorąc pod uwagę jego właściwości

прzeciwwirusowe, niektórzy badacze sugerują również, że cynamon może łagodzić powikłania w ciężkich przypadkach COVID-19 (Horby et al., 2020) oraz zmniejszać skutki uboczne stosowania deksametazonu w miazdżycy (Nayak et al., 2017).

Związki bioaktywne obecne w cynamonie mogą być wykorzystywane w terapiach o działaniu przeciwtleniającym, antyseptycznym, przeciwzapalnym, przeciwnowotworowym, przeciwcukrzycowym, wspomagającym gojenie ran, a także przeciwwirusowym (w tym przeciw HIV), przeciwlękowym i przeciwdepresyjnym. Dzięki tak szerokiemu spektrum aktywności cynamon może wspierać leczenie wielu chorób człowieka (Singh et al., 2020).

Podsumowanie

Cynamon cejloński jest bogatym źródłem licznych związków biochemicznych o wysokiej wartości farmakologicznej. Zawarte w nim fitoskładniki, takie jak aldehyd cynamonowy, eugenol czy kwas cynamonowy, mogą być stosowane wspomagająco w terapii wielu schorzeń, w tym zaburzeń układu pokarmowego, nowotworów, chorób sercowo-naczyniowych oraz chorób neurodegeneracyjnych.

Substancje bioaktywne obecne w cynamonie wykazują zdolność blokowania ekspresji genów

stymulujących rozwój niektórych chorób, a także działają cytotoksycznie wobec komórek nowotworowych, patogenów oraz pasożytów. Mechanizmy te obejmują m.in. działanie przeciwtleniające, przeciwzapalne oraz modulujące szlaki sygnałowe komórek. Bogactwo fitoskładników sprawia, że cynamon wywiera wielokierunkowy, korzystny wpływ na organizm człowieka.

Istotnym aspektem bezpieczeństwa jego stosowania jest niska zawartość kumaryny, charakterystyczna dla cynamonu cejlońskiego, co odróżnia go od innych gatunków, takich jak *Cinnamomum cassia*. Niska zawartość tego związku minimalizuje ryzyko hepatotoksyczności, szczególnie przy długotrwałym stosowaniu.

Na podstawie dostępnych danych literaturowych można wnioskować, że cynamon cejloński stanowi potencjalną alternatywę lub uzupełnienie terapii u osób cierpiących na liczne schorzenia. Jego stosowanie uznawane jest za względnie bezpieczne i może oferować wymierne korzyści zdrowotne zarówno obecnie, jak i w przyszłości. Należy jednak podkreślić, że ze względu na możliwość wystąpienia reakcji alergicznych u osób wrażliwych, cynamon nie powinien być stosowany bez indywidualnej oceny tolerancji.

Збігнєв Мазур, Галина Ткаченко, Наталія Кургалюк

ЦЕЙЛОНСЬКА КОРИЦЯ (CINNAMOMUM VERUM J. PRESL) – ЛІКУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ, ВИКОРИСТАННЯ ТА ТЕРАПЕВТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Ця стаття має на меті проаналізувати користь цейлонської кориці (*Cinnamomum verum* J. Presl) для здоров'я та оцінити її терапевтичну цінність у сучасному медичному та дієтичному контексті. У ній також обговорюються потенційні застосування для профілактики та підтримки лікування метаболічних, серцево-судинних, неопластичних, нейродегенеративних та інфекційних захворювань, а також розладів травної та скелетної систем. Крім того, дослідження оцінює безпеку використання кориці в різних фармацевтичних та дієтичних формах.

Методологія. Було проведено огляд доступної наукової літератури для отримання вичерпної інформації про лікувальні властивості та потенційне застосування цейлонської кориці. Аналіз включав такі бази даних: PubMed Central, Scopus, ResearchGate, Web of Science, ScienceDirect, Ovid Technologies та Google Scholar. Загалом до огляду було включено 139 наукових статей та вісім монографій. Проаналізовані матеріали включали оригінальні дослідницькі статті, систематичні огляди, метааналізи та експериментальні та клінічні звіти, в яких розглядався вплив хімічних сполук, присутніх у кориці, на її терапевтичні властивості. Вибір джерел базувався на новизні публікацій, методологічній якості та клінічній значущості отриманих результатів.

Наукова новизна. Ця робота пропонує новий погляд на користь *C. verum* для здоров'я, підкреслюючи її потенціал як допоміжної терапії раку, метаболічних, інфекційних та нейродегенеративних захворювань. У статті представлені результати дослідження, які вказують на широкий спектр активності біоактивних сполук, що містяться в кориці, та їх потенційне застосування в клінічній практиці. Особлива увага приділяється молекулярним механізмам фітохімічної дії та використанню сучасних технологій для підвищення біодоступності та терапевтичної ефективності, таких як наночастинки та мукоадгезивні гелі. Поєднання ботанічних, фармакологічних та клінічних знань з використанням міждисциплінарного підходу дозволило провести цілісну оцінку терапевтичного потенціалу цейлонської кориці.

Висновки. Кориця використовується в азійській кухні вже кілька тисяч років не лише як спеція, але й як лікарський інгредієнт. Вона характеризується багатоманітністю фітохімічної та широким спектром оздоровчих ефектів. *C. verum* полегшує розлади травної, сечовидільної та скелетної систем, а також проявляє сильні антиоксидантні та

протизапальні властивості. Наявні дані свідчать про те, що вона може сприяти лікуванню численних захворювань, включаючи рак, завдяки своєму вмісту антиоксидантів та здатності модулювати запальні процеси. Його задокументована біологічна активність – протизапальна, противірусна, антибактеріальна, протипаразитарна, протиожирова та протинейродегенеративна – має позитивний вплив на здоров'я людини. Сполуки, присутні в ефірних оліях кориці, покращують чутливість тканин до інсуліну, знижують рівень глюкози та ліпідів у крові, а також пригнічують розвиток неопластичних та інфекційних процесів. Використання сучасних систем доставки біоактивних речовин, таких як наночастинки та мукоадгезивні гелі, може значно підвищити біодоступність та терапевтичну ефективність кориці, одночасно знижуючи її токсичність для нормальних клітин. Крім того, було показано, що прийом добавок кориці в дозах 1-6 г на день має найсприятливіший вплив на здоров'я. Продукти, отримані з кори, листя та коренів коричного дерева, використовуються в фітотерапії, косметології та харчовій промисловості.

Ключові слова: цейлонська кориця, біоактивні сполуки, протизапальна активність, антиоксидантна активність, порушення обміну речовин, чутливість до інсуліну, фітохімія

Finansowanie / Funding / Фінансування

Niniejsze badanie nie otrzymało zewnętrznego finansowania / Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Oświadczenia o dostępności danych / Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Badanie nie wygenerowało nowych danych, opiera się na analizie teoretycznej / The study did not generate new data, it is based on theoretical analysis / Дослідження не створювало нових даних, базується на теоретичному аналізі

Oświadczenie instytucjonalnej komisji rewizyjnej / Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Nie dotyczy / Не застосовується / Not applicable.

Oświadczenie o świadomej zgodzie / Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Nie dotyczy / Не застосовується / Not applicable.

Konflikt interesów / Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Autorka, Halina Tkaczenko, jest członkinią rady redakcyjnej czasopisma „Biota. Human. Technology”. Nie brała udziału w procesie decyzyjnym, recenzowaniu ani akceptacji niniejszego manuskryptu. Autorzy nie zgłaszają żadnych innych konfliktów interesów / Автор Галина Ткаченко є членом редакційної колегії Biota. Human. Technology. Вона не брала участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийнятті цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Author Halina Tkaczenko is the member of the editorial board of Biota. Human. Technology. She was 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.

Oświadczenie dotyczące wykorzystania generatywnej sztucznej inteligencji i technologii opartych na AI w procesie tworzenia tekstu / 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

W niniejszym badaniu nie wykorzystano generatywnej sztucznej inteligencji ani technologii opartych na AI do zbierania, analizy czy interpretacji danych / 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.

Bibliografia

- Abraham, K., Wöhrlin, F., Lindtner, O., Heinemeyer, G., & Lampen, A. (2010). Toxicology and risk assessment of coumarin: focus on human data. *Molecular nutrition & food research*, 54(2), 228–239. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200900281>
- Abu El Ezz, N. M. T., Khalil, F. A. M., & Shaapan, R. M. (2011). Therapeutic effect of onion (*Allium cepa*) and cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) oils on cryptosporidiosis in experimentally infected mice. *Global Veterinaria*, 7(2), 179–183. <https://www.researchgate.net/publication/286031888>
- Afrin, F., Chouhan, G., Islamuddin, M., Want, M. Y., Ozbak, H. A., & Hemeg, H. A. (2019). *Cinnamomum cassia* exhibits antileishmanial activity against *Leishmania donovani* infection *in vitro* and *in vivo*. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 13(5), e0007227. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007227>
- Aggarwal, S., Bhadana, K., Singh, B., Rawat, M., Mohammad, T., Al-Keridis, L. A., Alshammari, N., Hassan, A. I., & Das, S. N. (2022). *Cinnamomum zeylanicum* extract and its bioactive component cinnamaldehyde show anti-tumor effects via inhibition of multiple cellular pathways. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 918479. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.918479>
- Ahmad, M. G., Chakravarthi, S., Bhagwart, P., Daharia, A., Sarsan, S., Sudhakarmeesala, Arora, N., Guria, T., Matta, Y., & Kumar, A. (2025). Formulation and *in-vitro* and *in-vivo* evaluation of a mucoadhesive gel containing *Eugenia caryophyllata* and *Cinnamomum verum* for treatment of oral cancer. *Journal of Neonatal Surgery*, 14(12s), 677–683. <https://doi.org/10.52783/jns.v14.3297>
- Ahmadi, A., Naziri, M., Fallahpour, F., Gholami, K., Arabpour, J., Pezeshgare, F., Akbarzadeh, D., Ansari, A., Sabri, H., & Deravi, N. (2022). Therapeutic potential of cinnamon for neurological disorders: A mini-review. *Neurology Asia*, 27(1), 1–17. <https://doi.org/10.54029/2022uxk>
- Alanazi, A. D., & Almohammed, H. I. (2022). Therapeutic potential and safety of the *Cinnamomum zeylanicum* methanolic extract against chronic *Toxoplasma gondii* infection in mice. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12, 900046. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.900046>
- Alanazi, M. M. (2024). Utilizing *Cinnamomum verum* extract for green synthesis of silver nanoparticles: Exploring optical properties, morphology, and potential applications. *Journal of King Saud University – Science*, 36(8), 103312. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103312>
- Allen, C. M., & Blozis, G. G. (1988). Oral mucosal reactions to cinnamon-flavored chewing gum. *Journal of the American Dental Association* (1939), 116(6), 664–667. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1988.0003>
- Anderson, M., Hrivnak, W., Prak, K., & Stockert, A. (2024). Effects of cinnamon on cancer prevention and progression. *Qeios*, 1–15. <https://doi.org/10.32388/EVIQDP>
- Angelopoulou, E., Nath Paudel, Y., Piperi, C., & Mishra, A. (2021). Neuroprotective potential of cinnamon and its metabolites in Parkinson's disease: Mechanistic insights, limitations, and novel therapeutic opportunities. *Journal of biochemical and molecular toxicology*, e22711. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/jbt.22711>
- Babu, P. V., Liu, D., & Gilbert, E. R. (2013). Recent advances in understanding the anti-diabetic actions of dietary flavonoids. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 24(11), 1777–1789. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2013.06.003>

- Badger-Emeka, L., Emeka, P. M., Thirugnanasambantham, K., & Ibrahim, H. I. M. (2020). Anti-allergic potential of cinnamaldehyde via the inhibitory effect of histidine decarboxylase (HDC) producing *Klebsiella pneumoniae*. *Molecules*, 25(23), 5580. <https://doi.org/10.3390/molecules25235580>
- Barceloux, D. G. (2009). Cinnamon (*Cinnamomum* species). *Disease-a-Month*, 55(6), 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.disamonth.2009.03.003>
- Behbahani, B. A., Falah, F., Lavi Arab, F., Vasiee, M., & Yazdi, F. T. (2020). Chemical composition and antioxidant, antimicrobial, and antiproliferative activities of *Cinnamomum zeylanicum* bark essential oil. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2020, 5190603. <https://doi.org/10.1155/2020/5190603>
- Bellassoued, K., Ghrab, F., Hamed, H., Kallel, R., van Pelt, J., Lahyani, A., Ayadi, F. M., & El Feki, A. (2019). Protective effect of essential oil of *Cinnamomum verum* bark on hepatic and renal toxicity induced by carbon tetrachloride in rats. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 44(6), 606–618. <https://doi.org/10.1139/apnm-2018-0246>
- Blevins, S. M., Leyva, M. J., Brown, J., Wright, J., Scofield, R. H., & Aston, C. E. (2007). Effect of cinnamon on glucose and lipid levels in non–insulin-dependent type 2 diabetes. *Diabetes Care*, 30(9), 2236–2237. <https://doi.org/10.2337/dc07-0098>
- Campbell, T. M., Neems, R., & Moore, J. (2008). Severe exacerbation of rosacea induced by cinnamon supplements. *Journal of Drugs in Dermatology*, 7(6), 586–587. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18561592>
- Caserta, S., Genovese, C., Cicero, N., Gangemi, S., & Allegra, A. (2023). The anti-cancer effect of cinnamon aqueous extract: A focus on hematological malignancies. *Life (Basel, Switzerland)*, 13(5), 1176. <https://doi.org/10.3390/life13051176>
- Chanderbali, A. S., van der Werff, H., & Renner, S. S. (2001). Phylogeny and historical biogeography of Lauraceae: Evidence from the chloroplast and nuclear genomes. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 88(1), 104–134. <https://doi.org/10.2307/2666133>
- Cheng, B. Q., & Yu, X. J. (1993). Cultivation of Ceylon cinnamon and chemical components of its essential oil. *Zhongcaoyao*, 14, 134–137.
- Christiany, C., Sudrajat, S. E., & Rahayu, I. (2021). The potency of *Cinnamomum zeylanicum* to prevent diseases: A review. *Eureka Herba Indonesia*, 2(1), 49–58. <https://doi.org/10.37275/ehi.v2i1.11>
- Das, S. (2020). Natural therapeutics for urinary tract infections – A review. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 6, 64. <https://doi.org/10.1186/s43094-020-00086-2>
- de Souza Gouveia Moreira, L., de Souza da Costa Brum, I., de Vargas Reis, D. C. M., Trugilho, L., Chermut, T. R., Esgalhado, M., Cardozo, L. F. M. F., Stenvinkel, P., Shiels, P. G., & Mafra, D. (2023). Cinnamon: An aromatic condiment applicable to chronic kidney disease. *Kidney Research and Clinical Practice*, 42(1), 4–26. <https://doi.org/10.23876/j.krcp.22.111>
- del Bosque-Plata, L., & Gragnoli, C. (2025). Cinnamon treatment shows promise for glycemic control but may cause adverse effects in some people. *Clinical Nutrition Open Science*, 59, 184–188. <https://doi.org/10.1016/j.nutos.2025.01.003>
- Deng R. (2012). A review of the hypoglycemic effects of five commonly used herbal food supplements. *Recent patents on food, nutrition & agriculture*, 4(1), 50–60. <https://doi.org/10.2174/2212798411204010050>

- Dhore, M. R., & Jha, A. R. (2019). Antimicrobial activity of *Allium cepa* and *Cinnamomum zeylanicum* against common bacteria causing urinary tract infections: *In vitro* study. *International Journal of Basic & Clinical Pharmacology*, 8(6), 1185–1191. <http://dx.doi.org/10.18203/2319-2003.ijbcp20192182>
- El-Baroty, G. S., Abd El-Baky, H. H., Farag, R. S., & Saleh, M. A. (2010). Characterization of antioxidant and antimicrobial compounds of cinnamon and ginger essential oils. *African Journal of Biochemistry Research*, 4(6), 167–174.
- El-Saber Batiha, G., Beshbishy, A. M., Guswanto, A., Nugraha, A., Munkhjargal, T., Abdel-Daim, M. M., Mosqueda, J., & Igarashi, I. (2020). Phytochemical characterization and chemotherapeutic potential of *Cinnamomum verum* extracts on the multiplication of protozoan parasites *in vitro* and *in vivo*. *Molecules*, 25(4), 996. <https://doi.org/10.3390/molecules25040996>
- Fabbri, J., Maggiore, M. A., Pensel, P. E., Denegri, G. M., & Elissondo, M. C. (2020). *In vitro* efficacy study of *Cinnamomum zeylanicum* essential oil and cinnamaldehyde against the larval stage of *Echinococcus granulosus*. *Experimental Parasitology*, 214, 107904. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2020.107904>
- Fajar, A., Ammar, G. A., Hamzah, M., Manurung, R., & Adbuh, M. Y. (2019). Effect of tree age on the yield, productivity, and chemical composition of essential oil from *Cinnamomum burmannii*. *Current Research on Biosciences and Biotechnology*, 1(1), 17–22. <https://doi.org/10.5614/crbb.2019.1.1>
- Farrell, K. T. (1985). Spices, condiments, and seasonings (2nd ed.). Aspen Publishers.
- Fichi, G., Flamini, G., Zaralli, L. J., & Perrucci, S. (2007). Efficacy of an essential oil of *Cinnamomum zeylanicum* against *Psoroptes cuniculi*. *Phytomedicine: international journal of phytotherapy and phytopharmacology*, 14(2-3), 227–231. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2006.01.004>
- Frydman-Marom, A., Levin, A., Farfara, D., Benromano, T., Scherzer-Attali, R., Peled, S., Vassar, R., Segal, D., Gazit, E., Frenkel, D., & Ovadia, M. (2011). Orally administrated cinnamon extract reduces β -amyloid oligomerization and corrects cognitive impairment in Alzheimer's disease animal models. *PLoS ONE*, 6(1), e16564. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016564>
- Gannon, N. P., Schnuck, J. K., Mermier, C. M., Conn, C. A., & Vaughan, R. A. (2015). trans-Cinnamaldehyde stimulates mitochondrial biogenesis through PGC-1 α and PPAR β/δ leading to enhanced GLUT4 expression. *Biochimie*, 119, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.10.001>
- Garcia-Abujeta, J. L., de Larramendi, C. H., Berna, J. P., & Palomino, E. M. (2005). Mud bath dermatitis due to cinnamon oil. *Contact dermatitis*, 52(4), 234. <https://doi.org/10.1111/j.0105-1873.2005.0566h.x>
- Georgakopoulou E. A. (2010). Cinnamon contact stomatitis. *Journal of dermatological case reports*, 4(2), 28–29. <https://doi.org/10.3315/jdcr.2010.1047>
- George, T. M., Prabha, M., Patil, M. S., Sakshi, S., & Shifa. (2024). Investigation of anticancer properties of cinnamon phytochemicals on protein expression in glioblastoma multiforme cell lines (U87-MG). *IP Indian Journal of Neurosciences*, 10(1), 30–39. <https://doi.org/10.18231/j.ijn.2024.006>
- Ghosh, D. (2024). Modern medicinal use of cinnamon. *Journal of Nutritional Disorders & Therapy*, 14(3), 298. <https://doi.org/10.35248/2161-0509.24.14.298>
- Goel, B., & Mishra, S. (2020). Medicinal and nutritional perspective of cinnamon: A mini-review. *European Journal of Medicinal Plants*, 31(3), 10–16. <https://doi.org/10.9734/ejmp/2020/v31i330218>

- Grant-Alfieri, A., Schaechter, J., & Lipshultz, S. E. (2013). Ingesting and aspirating dry cinnamon by children and adolescents: the "cinnamon challenge". *Pediatrics*, 131(5), 833–835. <https://doi.org/10.1542/peds.2012-3418>
- Gruenwald, J., Freder, J., & Armbruster, N. (2010). Cinnamon and health. *Food Science and Nutrition*, 50(9), 822–834. <https://doi.org/10.1080/10408390902773052>
- Gu, D. T., Tung, T. H., Jiesibieke, Z. L., Chien, C. W., & Liu, W. Y. (2021). Safety of cinnamon: An umbrella review of meta-analyses and systematic reviews of randomized clinical trials. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 790901. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.790901>
- Guan, X., Su, M. C., Zhao, R. B., Ouyang, H. M., Dong, X. D., Pei, Q., Lu, J., Li, Z. F., Zhang, C. R., & Yang, T.-H. (2016). Cinnamon effectively inhibits the activity of leukemia stem cells. *Genetics and Molecular Research*, 15(3), 10.4238/gmr.15037662. <https://doi.org/10.4238/gmr.15037662>
- Gurel, A., Turk, A., Aydin, H., Genc, F., & Yalcin, Y. (2022). Cinnamon's effect on apoptosis, inflammation and TRPM2 channels in methotrexate-induced renal damage. *International Journal of Advanced Research in Medicine*, 4(2), 6–10. <https://doi.org/10.22271/27069567.2022.v4.i2a.387>
- Hadi, A., Campbell, M. S., Hassani, B., Pourmasoumi, M., Salehi-Sahlabadi, A., & Hosseini, S. A. (2020). The effect of cinnamon supplementation on blood pressure in adults: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical nutrition ESPEN*, 36, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2020.01.002>
- Hagenlocher, Y., Bergheim, I., Zacheja, S., Schäffer, M., Bischoff, S. C., & Lorentz, A. (2013). Cinnamon extract inhibits degranulation and *de novo* synthesis of inflammatory mediators in mast cells. *Allergy*, 68(4), 490–497. <https://doi.org/10.1111/all.12122>
- Hajimonfarednejad, M., Ostovar, M., Raee, M. J., Hashempur, M. H., Mayer, J. G., & Heydari, M. (2019). Cinnamon: A systematic review of adverse events. *Clinical nutrition (Edinburgh, Scotland)*, 38(2), 594–602. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2018.03.013>
- Han, X., & Parker, T. L. (2017). Antiinflammatory activity of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) bark essential oil in a human skin disease model. *Phytotherapy research: PTR*, 31(7), 1034–1038. <https://doi.org/10.1002/ptr.5822>
- Hatte, S., Mandave, P., & Jadhav, A. (2025). Evaluation of anticancer activity of *Cinnamomum zeylanicum* against blood cancer cell line. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 14(4), e11729. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.11729>
- Hong, S., Cha, K. H., Park, J. H., Jung, D. S., Choi, J. H., Yoo, G., & Nho, C. W. (2022). Cinnamic acid suppresses bone loss via induction of osteoblast differentiation with alteration of gut microbiota. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 101, 108900. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2021.108900>
- Horby, P., Lim, W. S., Emberson, J. R., Mafham, M., Bell, J. L., Linsell, L., Staplin, N., Brightling, C., Ustianowski, A., Elmahi, E., Prudon, B., Green, C., Felton, T., Chadwick, D., Rege, K., Fegan, C., Chappell, L. C., Faust, S. N., Jaki, T., Jeffery, K., Montgomery, A., Rowan, K., Juszczak, E., Baillie, J. K., Haynes, R., & Landray, M. J. (2020). Dexamethasone in hospitalized patients with Covid-19. *The New England Journal of Medicine*, 384(8), 693–704. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2021436>

- Huang, B., Yuan, H. D., Kim, D. Y., Quan, H. Y., & Chung, S. H. (2011). Cinnamaldehyde prevents adipocyte differentiation and adipogenesis via regulation of peroxisome proliferator-activated receptor- γ (PPAR γ) and AMP-activated protein kinase (AMPK) pathways. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 3666–3673. <https://doi.org/10.1021/jf104814t>
- Hwang, S. H., Choi, Y. G., Jeong, M. Y., Hong, Y. M., Lee, J. H., & Lim, S. (2009). Microarray analysis of gene expression profile by treatment of *Cinnamomi ramulus* in lipopolysaccharide-stimulated BV-2 cells. *Gene*, 443(1–2), 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2009.04.024>
- Jachowicz, A., & Dybowa-Jachowicz, S. (2003). *Paleobotanika*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Javed, I., Faisal, I., Zia Ur, R., Khan, M. Z., Muhammad, F., Aslam, B., Ahmad, M., & Shahzadi, A. (2012). Lipid lowering effect of *Cinnamomum zeylanicum* in hyperlipidaemic albino rabbits. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 25(1), 141–147.
- Jayaprakasha, G. K., Rao, L. J., & Sakariah, K. K. (2002). Chemical composition of volatile oil from *Cinnamomum zeylanicum* buds. *Zeitschrift fur Naturforschung. C, Journal of biosciences*, 57(11-12), 990–993. <https://doi.org/10.1515/znc-2002-11-1206>
- Jensen-Jarolim, E., Roth-Walter, F., Leitner, E., Buchleitner, S., Vogelsang, H., & Kinaciyan, T. (2016). Prime and boost aerosol exposure via fog machine or shisha smoke followed by cinnamon hypersensitivity and anaphylaxis to spiced food. *World Allergy Organization Journal*, 9(4), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s40413-016-0091-6>
- Joshi, K., Awati, S., Desai, A., Halakatti, P., Irappanavar, S., Vijapur, L., & Metre, A. (2025). *Cinnamomum verum*: Biogenic synthesis of silver nanoparticles and in vitro anticancer activity on A-431 cell lines. *Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy*, 45(2), 131–145. <https://doi.org/10.52794/hujpharm.1625482>
- Kaławaj, K., & Lemieszek, M. K. (2015). Prozdrowotne właściwości cynamonu. *Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu*, 21(3), 328–331. <https://doi.org/10.5604/20834543.1165362>
- Kang, H., Park, S. H., Yun, J. M., Nam, T. G., Kim, Y. E., & Kim, D. O. (2014). Effect of cinnamon water extract on monocyte-to-macrophage differentiation and scavenger receptor activity. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 14, 90. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-14-90>
- Kaul, P. N., Bhattacharya, A. K., Rajeswara Rao, B. R., Syamasundar, K. V., & Ramesh, S. (2003). Volatile constituents of essential oils isolated from different parts of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum* Blume). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, 53–55. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1277>
- Khan, A., Safdar, M., Ali Khan, M. M., Khattak, K. N., & Anderson, R. A. (2003). Cinnamon improves glucose and lipids of people with type 2 diabetes. *Diabetes care*, 26(12), 3215–3218. <https://doi.org/10.2337/diacare.26.12.3215>
- Khan, M. F., Charbaji, A. M. Y., Baabbad, A. A., Almoutiri, N. D., & Wadaan, M. A. M. (2023). Investigating the role of *Cinnamomum verum* in zebrafish swim bladder development and anti-cancer activity in human lung cancer cell lines. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(12), 105361. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105361>
- Khare, P., Jagtap, S., Jain, Y., Baboota, R. K., Mangal, P., & Boparai, R. K. (2016). Cinnamaldehyde supplementation prevents fasting-induced hyperphagia, lipid accumulation, and inflammation in high-fat diet-fed mice. *Biofactors*, 42(2), 201–211. <https://doi.org/10.1002/biof.1265>

- Khasanavis, S., & Pahan, K. (2014). Cinnamon treatment upregulates neuroprotective proteins Parkin and DJ-1 and protects dopaminergic neurons in a mouse model of Parkinson's disease. *Journal of neuroimmune pharmacology: the official journal of the Society on NeuroImmune Pharmacology*, 9(4), 569–581. <https://doi.org/10.1007/s11481-014-9552-2>
- Khedkar, S., & Khan, M. A. (2023). Aqueous extract of cinnamon (*Cinnamomum* spp.): Role in cancer and inflammation. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2023, 5467342. <https://doi.org/10.1155/2023/5467342>
- Khoshnevisan, K., Alipanah, H., Baharifar, H., Ranjbar, N., & Osanloo, M. (2022). Chitosan nanoparticles containing *Cinnamomum verum* J. Presl essential oil and cinnamaldehyde: Preparation, characterization and anticancer effects against melanoma and breast cancer cells. *Traditional and Integrative Medicine*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.18502/tim.v7i1.9058>
- Kim, M. S., & Kim, J. Y. (2017). Intestinal anti-inflammatory effects of cinnamon extracts in a co-culture model of intestinal epithelial Caco-2 cells and RAW264.7 macrophages. *Applied Biological Chemistry*, 60(5), 553–561. <https://doi.org/10.1007/s13765-017-0311-y>
- Kohlmünzer, S. (2007). *Farmakognozja. Podręcznik dla studentów farmacji*. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa.
- Kornaś, J., & Medwecka-Kornaś, A. (2002). *Geografia roślin*. Warszawa.
- Kowalska, J., Tyburski, J., Matysiak, K., Jakubowska, M., Łukaszyk, J., & Krzymińska, J. (2021). Cinnamon as a Useful Preventive Substance for the Care of Human and Plant Health. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(17), 5299. <https://doi.org/10.3390/molecules26175299>
- Kubatka, P., Kello, M., Kajo, K., Samec, M., Jasek, K., Vybohova, D., Uramova, S., Liskova, A., Sadlonova, V., Koklesova, L., Murin, R., Adamkov, M., Smejkal, K., Svajdlenka, E., Solar, P., Samuel, S. M., Kassayova, M., Kwon, T. K., Zubor, P., Pec, M., Danko, J., Büsselberg, D., & Mojzis, J. (2020). Chemopreventive and therapeutic efficacy of *Cinnamomum zeylanicum* L. bark in experimental breast carcinoma: Mechanistic *in vivo* and *in vitro* analyses. *Molecules*, 25(6), 1399. <https://doi.org/10.3390/molecules25061399>
- Kutbi, E. H., Sohoul, M. H., Fatahi, S., Lari, A., Shidfar, F., Aljhdali, M. M., Alhoshan, F. M., Elahi, S. S., Almusa, A. A., & Abu-Zaid, A. (2021). The beneficial effects of cinnamon among patients with metabolic diseases: A systematic review and dose-response meta-analysis of randomized controlled trials. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(22), 6113–6131. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1896473>
- Lee, R., & Balick, M. J. (2005). Sweet wood – Cinnamon and its importance as a spice and medicine. *Explore: The Journal of Science and Healing*, 1(1), 61–64. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2004.10.011>
- Lee, S. H., Lee, S. Y., Son, D. J., Lee, H., Yoo, H. S., Song, S., Oh, K. W., Han, D. C., Kwon, B. M., & Hong, J. T. (2005). Inhibitory effect of 2'-hydroxycinnamaldehyde on nitric oxide production through inhibition of NF- κ B activation in RAW 264.7 cells. *Biochemical Pharmacology*, 69(5), 791–799. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2004.11.013>
- Li, C.-Y., Liao, L.-J., Yang, S.-X., Wang, L.-Y., Chen, H., Luo, P., Huang, G.-R., & Huang, Y.-Q. (2024). Cinnamaldehyde: An effective component of *Cinnamomum cassia* inhibiting *Helicobacter pylori*. *Journal of Ethnopharmacology*, 330, 118222. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118222>

- Li, Y.-G., Kong, D.-X., & Wu, H. (2013). Analysis and evaluation of essential oil components of cinnamon barks using GC–MS and FTIR spectroscopy. *Industrial Crops and Products*, 41, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.056>
- Liyanage, N. M. N., Bandusekara, B. S., Kanchanamala, R. W. M. K., Hathurusinghe, H. A. B. M., Rathnayaka, A. M. R. W. S. D., Gamini Pushpakumara, D. K. N., Samita, S., Wijesinghe, K. G. G., Jayasinghe, G. G., Liyanage, W. K., & Bandaranayake, P. C. G. (2021). Identification of superior *Cinnamomum zeylanicum* Blume germplasm for future true cinnamon breeding in the world. *Journal of Food Composition and Analysis*, 96, 103747. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103747>
- Mallavarapu, G. R., & Rajeswara Rao, B. R. (2007). Chemical constituents and uses of *Cinnamomum zeylanicum* Blume. In: L. Jitrovetz, N. X. Dung, & V. K. Varshney (Eds.), *Aromatic plants from Asia: Their chemistry and application in food and therapy* (pp. 49–75). Har Krishan Bhalla & Sons, Dehradun, India.
- Mallavarapu, G. R., Ramesh, S., Chandrasekhara, R. S., Rajeswara Rao, B. R., Kaul, P. N., & Bhattacharya, A. K. (1995). Investigation of the essential oil of cinnamon leaf grown at Bangalore and Hyderabad. *Flavour and Fragrance Journal*, 10(4), 239–242. <https://doi.org/10.1002/ffj.2730100403>
- Malsawmtluangi, L., Nautiyal, B. P., Hazarika, T., Chauhan, R. S., & Tava, A. (2016). Essential oil composition of bark and leaves of *Cinnamomum verum* Bertch & Presl from Mizoram, North East India. *Journal of Essential Oil Research*, 28(6), 551–556. <https://doi.org/10.1080/10412905.2016.1167131>
- Mariappan, P. M., Sabesan, G., Koilpillai, B., Janakiraman, S., & Sharma, N. K. (2013). Chemical characterisation and antifungal activity of methanolic extract of *Cinnamomum verum* J. Presl bark against *Malassezia* spp. *Pharmacognosy Journal*, 5(5), 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.phcgj.2013.09.001>
- Maruthamuthu, R., & Ramanathan, K. (2016). Phytochemical analysis of bark extract of *Cinnamomum verum*: A medicinal herb used for the treatment of coronary heart disease in Malayali tribes, Pachamalai hills, Tamil Nadu, India. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research*, 8(7), 1218–1222.
- Mehrpouri, M., Hamidpour, R., & Hamidpour, M. (2020). Cinnamon inhibits platelet function and improves cardiovascular system. *Journal of Medicinal Plants*, 19(73), 1–11. <https://doi.org/10.29252/jmp.1.73.1>
- Mohammadabadi, T., & Jain, R. (2024). Cinnamon: A nutraceutical supplement for the cardiovascular system. *Archives of Medical Science*, 9, 72–81. <https://doi.org/10.5114/amsad/184245>
- Mohanty, D., Padhee, S., Priyadarshini, A., Champati, B. B., Das, P. K., Jena, S., Sahoo, A., Panda, P. C., Nayak, S., & Ray, A. (2024). Elucidating the anti-cancer potential of *Cinnamomum tamala* essential oil against non-small cell lung cancer: A multifaceted approach involving GC-MS profiling, network pharmacology, and molecular dynamics simulations. *Heliyon*, 10(6), e28026. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28026>
- Mohanty, D., Padhee, S., Priyadarshini, A., Kerry, R. G., Dash, B., Sahoo, A., Jena, S., Panda, P.-C., Khan, H. A., Nayak, S., & Ray, A. (2025). Integrative approach to decipher pharmacological mechanism of *Cinnamomum zeylanicum* essential oil in prostate cancer. *Medical oncology (Northwood, London, England)*, 42(4), 100. <https://doi.org/10.1007/s12032-025-02665-w>

- Momtaz, S., Hassani, S., Khan, F., Ziaee, M., & Abdollahi, M. (2018). Cinnamon, a promising prospect towards Alzheimer's disease. *Pharmacological research*, 130, 241–258. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2017.12.011>
- Moragoda, J. (2021). *Cinnamomum zeylanicum*: Continuing voyages of discovery. In: M. McWilliams (Ed.), *Proceedings of the Oxford Symposium on Food and Cookery, 2020* (pp. 250–262). Prospect Books. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100858>
- Mota, A. P. P., Campelo, T. A., & Frota, C. C. (2019). Evaluation of the antimicrobial activity of *Cinnamomum zeylanicum* essential oil and trans-cinnamaldehyde against resistant *Mycobacterium tuberculosis*. *Bioscience Journal*, 35(1), 296–306. <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v35n1a2019-41710>
- Muhammad, D. R. A., Tuentner, E., Patria, G. D., Foubert, K., Pieters, L., & Dewettinck, K. (2021). Phytochemical composition and antioxidant activity of *Cinnamomum burmannii* Blume extracts and their potential application in white chocolate. *Food Chemistry*, 340, 127983. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127983>
- Narayana, S. K. K., Gopi, D. K., Rubeena, M., & Parameswaran, S. R. (2019). Macro-micro-morphological diagnosis of leaves of two species of *Cinnamomum* (*C. sulphuratum* and *C. verum*) used as resource of bay leaf. *AYU: An International Quarterly Journal of Research in Ayurveda*, 40(3), 196–203. https://doi.org/10.4103/ayu.AYU_194_17
- Narayanan, A., Muiyarakandy, M. S., Mooyottu, S., Venkitanarayanan, K., & Amalaradjou, M. A. R. (2017). Oral supplementation of trans-cinnamaldehyde reduces uropathogenic *Escherichia coli* colonization in a mouse model. *Letters in Applied Microbiology*, 64(3), 192–197. <https://doi.org/10.1111/lam.12713>
- Narayanankutty, A., Kunnath, K., Alfarhan, A., Rajagopal, R., & Ramesh, V. (2021). Chemical composition of *Cinnamomum verum* leaf and flower essential oils and analysis of their antibacterial, insecticidal, and larvicidal properties. *Molecules*, 26(20), 6303. <https://doi.org/10.3390/molecules26206303>
- Nayak, I. N., Rajasekhar, C. H., & Jetty, R. (2017). Anti-atherosclerotic potential of aqueous extract of *Cinnamomum zeylanicum* bark against glucocorticoid-induced atherosclerosis in Wistar rats. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 11(5), 19–23. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/23910.9864>
- Oketch-Rabah, H. A., Marles, R. J., & Brinckmann, J. A. (2018). Cinnamon and Cassia Nomenclature Confusion: A Challenge to the Applicability of Clinical Data. *Clinical pharmacology and therapeutics*, 104(3), 435–445. <https://doi.org/10.1002/cpt.1162>
- Ose, R., Tu, J., Schink, A., Maxeiner, J., Schuster, P., Lucas, K., Saloga, J., & Bellinghausen, I. (2019). Cinnamon extract inhibits allergen-specific immune responses in human and murine allergy models. *Clinical and Experimental Allergy*, 50(1), 41–50. <https://doi.org/10.1111/cea.13507>
- Pandey, A., & Tripathi, S. (2018). Concept of standardization, extraction and pre-phytochemical screening strategies for herbal drug. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2(5), 115–119.
- Parry, J. W. (1969). *Spices: Morphology, histology, chemistry* (Vol. II). Chemical Publishing. <https://archive.org/details/parry-1969-spices/page/n181/mode/2up>
- Pathak, R., & Sharma, H. (2021). A review on medicinal uses of *Cinnamomum verum* (cinnamon). *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 11(6-S), 161–166. <http://dx.doi.org/10.22270/jddt.v11i6-S.5145>

- Peterson, D. W., George, R. C., Scaramozzino, F., Lapointe, N. E., Anderson, R. A., Graves, D. J., & Lew, J. (2009). Cinnamon extract inhibits tau aggregation associated with Alzheimer's disease *in vitro*. *Journal of Alzheimer's Disease*, 17(3), 585–597. <https://doi.org/10.3233/JAD-2009-1083>
- Pitton Rissardo, J., McGarry, A., Shi, Y., Fornari Caprara, A. L., & Kannarkat, G. T. (2025). Alpha-Synuclein Neurobiology in Parkinson's Disease: A Comprehensive Review of Its Role, Mechanisms, and Therapeutic Perspectives. *Brain Sciences*, 15(12), 1260. <https://doi.org/10.3390/brainsci15121260>
- Prabhuji, S. K., Rao, G. P., Pande, S., Richa, Srivastava, G. K., & Srivastava, A. K. (2021). *Cinnamomum* species: Spices of immense medicinal and pharmacological values. *Medicinal Plants*, 13(2), 202–220. <https://doi.org/10.5958/0975-6892.2021.00024.1>
- Pratibha, Yadav, S. S., Bhandari, U., & Naik, G. (2018). Antioxidant properties and phytochemical screening of commercial cinnamon bark. *European Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, 5(2), 964–970.
- Qi, L., Mao, H., Lu, X., Shi, T., & Wang, J. (2021). Cinnamaldehyde promotes intestinal barrier functions and reshapes gut microbiome in early-weaned rats. *Frontiers in Nutrition*, 8, 748503. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.748503>
- Rajeswara Rao, B. R., Rajput, D. K., & Bhattacharya, A. K. (2007). Essential oil composition of petiole of *Cinnamomum verum* Bercht. & Presl. *Journal of Spices and Aromatic Crops*, 16(1), 38–41. <https://www.researchgate.net/publication/269166602>
- Ranasinghe, P., Pigera, S., Premakumara, G. A. S., Galappaththy, P., Constantine, G. R., & Katulanda, P. (2013). Medicinal properties of “true” cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*): A systematic review. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 13, 275. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-13-275>
- Rao, P. V., & Gan, S. H. (2014). Cinnamon: A multifaceted medicinal plant. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014, 642942. <https://doi.org/10.1155/2014/642942>
- Ravindran, P. N., Nirmal-Babu, K., & Shylaja, M. (Eds.). (2003). Cinnamon and cassia: The genus *Cinnamomum* (1st ed.). CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780203590874>
- Rawat, I., Verma, N., & Joshi, K. (2020). Cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*). In: Medicinal plants in India: Importance and cultivation (pp. 164–177). Jaya Publishing House, New Delhi.
- Ribeiro, P. R. E., Montero, I. F., Saravia, S. A. M., Ferraz, V. P., Santos, R. A., Marcía, J. A. F., & Linhares, B. M. (2020). Chemical composition and antioxidant activity in the essential oil of *Cinnamomum zeylanicum* Nees with medicinal interest. *Journal of Medicinal Plants Research*, 14(7), 326–330. <https://doi.org/10.5897/JMPR2020.6966>
- Roşian, S., Boarescu, I., & Boarescu, P.-M. (2025). Antioxidant and anti-inflammatory effects of bioactive compounds in atherosclerosis. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(3), 1379. <https://doi.org/10.3390/ijms26031379>
- Sadeghi, S., Davoodvandi, A., Pourhanifeh, M. H., Sharifi, N., ArefNezhad, R., Sahebnaasagh, R., Moghadam, S. A., Sahebkar, A., & Mirzaei, H. (2019). Anti-cancer effects of cinnamon: Insights into its apoptosis effects. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 178, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2019.05.067>

- Saeed, M., Kamboh, A. A., Syed, S. F., Babazadeh, D., Suheryani, I., Shah, Q. A., Umar, M., Kakar, I., Naveed, M., & Abd El-Hack, M. E. (2018). Phytochemistry and beneficial impacts of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) as a dietary supplement in poultry diets. *World's Poultry Science Journal*, 74(2), 331–346. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000235>
- Salama, M. A. M., Mostafa, N. E., Abd El-Aal, N. F., Moawad, H. S. F., Hammad, S. K., Adel, R., & Mostafa, E. M. (2021). Efficacy of *Zingiber officinale* and *Cinnamomum zeylanicum* extracts against experimental *Trichinella spiralis* infection. *Journal of Parasitic Diseases*, 46(1), 24–36. <https://doi.org/10.1007/s12639-021-01412-y>
- Sambaiah, K., & Srinivasan, K. (1991). Effect of cumin, cinnamon, ginger, mustard and tamarind in induced hypercholesterolemic rats. *Die Nahrung*, 35(1), 47–51. <https://doi.org/10.1002/food.19910350112>
- Santos, H. O., & da Silva, G. A. R. (2018). To what extent does cinnamon administration improve the glycemic and lipid profiles? *Clinical Nutrition ESPEN*, 27, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2018.07.011>
- Scachetti, G., Person, O. C., Soares, B. G., Porpino, R., Bogar, P., & Angélico Júnio, F. V. (2020). Effectiveness of cinnamon bark extract in the treatment of allergic rhinitis. *Revista Brasileira de Saúde Global*, 1(1), 57.
- Schink, A., Naumoska, K., Kitanovski, Z., Kampf, C. J., Fröhlich-Nowoisky, J., Thines, E., Pöschl, U., Schuppan, D., & Lucas, K. (2018). Anti-inflammatory effects of cinnamon extract and identification of active compounds influencing the TLR2 and TLR4 signaling pathways. *Food & Function*, 9, 5950–5964.
- Senanayake, U. M., Lee, T. H., & Willis, R. B. H. (1978). Volatile constituents of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum* Blume). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 26, 822–824. <https://doi.org/10.1021/jf60218a031>
- Senderski, M. E. (2015). *Prawie wszystko o ziołach i ziołolecznictwie*. Wydawnictwo Mateusz E. Senderski.
- Shanmugam, K., Sellappan, S., Alahmadi, T. A., Almoallim, H. S., Natarajan, N., & Veeraraghavan, V. P. (2022). Green synthesized zinc oxide nanoparticles from *Cinnamomum verum* bark extract inhibited cell growth and induced caspase-mediated apoptosis in oral cancer KB cells. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 74, 103577. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103577>
- Shen, Y., Jia, L. N., Honma, N., Hosono, T., Ariga, T., & Seki, R. (2012). Beneficial effects of cinnamon on the metabolic syndrome, inflammation, and pain, and mechanisms underlying these effects: A review. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 2, 27–32. [https://doi.org/10.1016/S2225-4110\(16\)30067-0](https://doi.org/10.1016/S2225-4110(16)30067-0)
- Singh, G., Maurya, S., DeLampasona, M. P., & Catalan, C. A. (2007). A comparison of chemical, antioxidant and antimicrobial studies of cinnamon leaf and bark volatile oils, oleoresins and their constituents. *Food and Chemical Toxicology*, 45(9), 1650–1661. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.02.031>
- Singh, N., Rao, A. S., Nandal, A., Kumar, S., Yadav, S. S., Ganaie, S. A., & Narasimhan, B. (2020). Phytochemical and pharmacological review of *Cinnamomum verum* J. Presl – A versatile spice used in food and nutrition. *Food Chemistry*, 127773. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127773>
- Singh, R. T., & Shrivastava, V. (2015). *In-vitro* efficacy evaluation of ethanolic extract of *Cinnamomum zeylanicum* as a potential antimicrobial agent against clinical isolates. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 6(5), 2201–2204.
- Song, F., Li, H., Sun, J., & Wang, S. (2013). Protective effects of cinnamic acid and cinnamic aldehyde on isoproterenol-induced acute myocardial ischemia in rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 150(1), 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.08.019>

- Song, Y., Yu, Q.-F., Zhang, D., Chen, L.-G., Tan, Y.-H., Zhu, W., Su, H.-L., Yao, X., Liu, C., & Corlett, R. T. (2024). New insights into the phylogenetic relationships within the Lauraceae from mitogenomes. *BMC Biology*, 22(1), 241. <https://doi.org/10.1186/s12915-024-02040-7>
- Songjie, J., Zhao, B., Gao, Y., Xie, J., Han, H., Wu, Q., & Yang, D. (2024). Cinnamaldehyde attenuates streptozocin-induced diabetic osteoporosis in a rat model by modulating netrin-1/DCC-UNC5B signal transduction. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1367806. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1367806>
- Spence, C. (2024). Cinnamon: The historic spice, medicinal uses, and flavour chemistry. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 35, 100858. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100858>
- Steels, E., Steels, E., Deshpande, P., Thakurdesai, P., Dighe, S., & Collet, T. (2019). A randomized, double-blind placebo-controlled study of intranasal standardized cinnamon bark extract for seasonal allergic rhinitis. *Complementary Therapies in Medicine*, 47, 102198. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2019.102198>
- Szafer, W., & Kostyniuk, M. (1962). *Zarys paleobotaniki*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Sztaba, D. (2009). Barwa szafranu, aromat cynamonu, smak kaparów – właściwości lecznicze biblijnych przypraw. *Farmacja Polska*, 69(1), 29–32.
- Trifan, A., Zengin, G., Brebu, M., Skalicka-Woźniak, K., & Luca, S. V. (2021). Phytochemical characterization and evaluation of the antioxidant and anti-enzymatic activity of five common spices: Focus on their essential oils and spent material extractives. *Plants*, 10(12), 2692. <https://doi.org/10.3390/plants10122692>
- Tsai, K.-D., Liu, Y.-H., Chen, T.-W., Yang, S.-M., Cherng, J., Chou, K.-S., & Cherng, J.-M. (2016). Cuminaldehyde from *Cinnamomum verum* induces cell death through targeting topoisomerase 1 and 2 in human colorectal adenocarcinoma COLO 205 cells. *Nutrients*, 8(6), 318. <https://doi.org/10.3390/nu8060318>
- Vallianou, N., Tsang, C., Taghizadeh, M., Davoodvandi, A., & Jafarnejad, S. (2019). Effect of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) supplementation on serum C-reactive protein concentrations: A meta-analysis and systematic review. *Complementary Therapies in Medicine*, 42, 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2018.12.005>
- Varadarajan, S., Narasimhan, M., Balaji, T. M., Chamundeeswari, D. P., & Sakthisekaran, D. (2020). *In vitro* anticancer effects of *Cinnamomum verum* J. Presl, cinnamaldehyde, 4-hydroxycinnamic acid and eugenol on an oral squamous cell carcinoma cell line. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, 21(9), 1027–1033. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-2922>
- Vivas, A. P., & Migliari, D. A. (2015). Cinnamon-induced Oral Mucosal Contact Reaction. *The open dentistry journal*, 9, 257–259. <https://doi.org/10.2174/1874210601509010257>
- Walanj, S., Walanj, A. P., Mohan, V., & Thakurdesai, P. A. (2014). Efficacy and safety of the topical use of intranasal cinnamon bark extract in seasonal allergic rhinitis patients: A double-blind placebo-controlled pilot study. *Journal of Herbal Medicine*, 4(1), 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2013.12.002>
- Wang, J., Wang, S., Yang, J., Henning, S. M., Ezzat-Zadeh, A., Woo, S. L., Qin, T., Pan, Y., Tseng, C. H., Heber, D., & Li, Z. (2020). Acute effects of cinnamon spice on post-prandial glucose and insulin in normal weight and overweight/obese subjects: A pilot study. *Frontiers in Nutrition*, 7, 619782. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.619782>

- Wang, R., Wang, R., & Yang, B. (2009). Extraction of essential oils from five cinnamon leaves and identification of their volatile compound compositions. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(2), 289–292. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.12.004>
- Widya, A. W., & Ainatun, N. A. (2017). The investigation of cytotoxic effect of *Cinnamomum zeylanicum* extracts on human breast cancer cell line (MCF-7). *Science Heritage Journal*, 1(2), 23–28. <https://doi.org/10.26480/gws.02.2017.23.28>
- Williams, A. R., Ramsay, A., Hansen, T. V. A., Ropiak, H. M., Mejer, H., Nejsun, P., Mueller-Harvey, I., & Thamsborg, S. M. (2015). Anthelmintic activity of trans-cinnamaldehyde and A- and B-type proanthocyanidins derived from cinnamon (*Cinnamomum verum*). *Scientific Reports*, 5, 14791. <https://doi.org/10.1038/srep14791>
- Wong, Y. C., Ahmad-Mudzaqir, M. Y., & Wan-Nurdiyana, W. A. (2014). Extraction of essential oil from cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*). *Oriental Journal of Chemistry*, 30(1), 37–47. <https://doi.org/10.13005/ojc/300105>
- Wu, H. C., Horng, C. T., Lee, Y. L., Chen, P. N., Lin, C. Y., Liao, C. Y., Hsieh, Y. S., & Chu, S. C. (2018). *Cinnamomum Cassia* Extracts Suppress Human Lung Cancer Cells Invasion by Reducing u-PA/MMP Expression through the FAK to ERK Pathways. *International journal of medical sciences*, 15(2), 115–123. <https://doi.org/10.7150/ijms.22293>
- Xiao, T. W., & Ge, X. J. (2022). Plastome structure, phylogenomics, and divergence times of tribe *Cinnamomeae* (Lauraceae). *BMC Genomics*, 23(1), 642. <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08855-4>
- Xue, Y. L., Shi, H. X., Murad, F., & Bian, K. (2011). Vasodilatory effects of cinnamaldehyde and its mechanism of action in the rat aorta. *Vascular Health and Risk Management*, 7, 273–280. <https://doi.org/10.2147/VHRM.S15429>
- Yadav, A., Gupta, A., & Maurya, J. K. (2023). A review on cinnamon with their varieties and pharmacological action. *International Journal of Novel Research and Development*, 8(12), c881–c888. <https://ijnrd.org/papers/IJNRD2312286.pdf>
- Yanakiev, S. (2020). Effects of cinnamon (*Cinnamomum* spp.) in dentistry: A review. *Molecules*, 25(18), 4184. <https://doi.org/10.3390/molecules25184184>
- Yang, F., Long, E., Wen, J., Cao, L., Zhu, C., Hu, H., Ruan, Y., Okanurak, K., Hu, H., Wei, X., Yang, X., Wang, C., Zhang, L., Wang, X., Ji, P., Zheng, H., Wu, Z., & Lv, Z. (2014). Linalool, derived from *Cinnamomum camphora* (L.) Presl leaf extracts, possesses molluscicidal activity against *Oncomelania hupensis* and inhibits infection of *Schistosoma japonicum*. *Parasites & vectors*, 7, 407. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-7-407>
- Yang, S. M., Tsai, K. D., Wong, H. Y., Liu, Y. H., Chen, T. W., Cherng, J., Hsu, K. C., Ang, Y. U., & Cherng, J. M. (2016). Molecular Mechanism of *Cinnamomum verum* Component Cuminaldehyde Inhibits Cell Growth and Induces Cell Death in Human Lung Squamous Cell Carcinoma NCI-H520 Cells *In Vitro* and *In Vivo*. *Journal of Cancer*, 7(3), 251–261. <https://doi.org/10.7150/jca.13689>
- Youn, H. S., Lee, J. K., Choi, Y. J., Saitoh, S. I., Miyake, K., Hwang, D. H., & Lee, J. Y. (2008). Cinnamaldehyde suppresses toll-like receptor 4 activation mediated through the inhibition of receptor oligomerization. *Biochemical pharmacology*, 75(2), 494–502. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2007.08.033>
- Yu, L., Huang, C., Yang, W., Ren, Z., Li, L., Cheng, H., Lin, C., Zhai, L., Ning, Z., Wong, H. X., Han, Q., Jia, W., Bian, Z., & Zhao, L. (2023). Aqueous cinnamon extract ameliorates bowel dysfunction and enteric 5-HT synthesis in IBS rats. *Frontiers in pharmacology*, 13, 1010484. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1010484>

Yu, T., Lee, S., Yang, W. S., Jang, H.-J., Lee, Y. J., Kim, T. W., Kim, S. Y., Lee, J., & Cho, J. Y. (2012). The ability of an ethanol extract of *Cinnamomum cassia* to inhibit Src and spleen tyrosine kinase activity contributes to its anti-inflammatory action. *Journal of Ethnopharmacology*, 139(2), 566–573. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.11.051>

Received: 07.04.2026. **Accepted:** 19.06.2026. **Published:** 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Mazur Z., Tkaczenko H., Kurhaluk N. Cynamon cejloński (*Cinnamomum verum* J. Presl) – właściwości lecznicze, zastosowanie i potencjał terapeutyczny. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. S. 177-210. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.14>

Cite this article in APA style as:

Mazur, Z., Tkaczenko, H., & Kurhaluk, N. (2026). Cynamon cejloński (*Cinnamomum verum* J. Presl) – właściwości lecznicze, zastosowanie i potencjał terapeutyczny. *Biota. Human. Technology*. (2), 177-210. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.14> (in Polish)

Information about the authors:

Mazur Z. [in Ukrainian: **Мазур З.**] ¹, Postgraduate Student, email: zbigniewmazur1@wp.pl
ORCID: 0009-0007-4076-3300
Institute of Biology, Pomeranian University in Słupsk
22B Arciszewskiego Street, Słupsk, 76-200, Poland

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, funds collection.

³ Study design, data collection, manuscript preparation, funds collection.

UDC 614.2:351.77:502.131.1

DOI: 10.58407/bht.2.26.15



Copyright (c) 2026 Mykola Deikun

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/).

Микола Дейкун

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я: ВІД ЕКОСИСТЕМНОГО ДО ЦИВІЛІЗАЦІЙНОГО ПІДХОДУ



Mykola Deikun

GLOBAL ARCHITECTURE OF THE PUBLIC HEALTH SYSTEM: FROM AN ECOSYSTEM TO A CIVILISATIONAL APPROACH

АНОТАЦІЯ

Метою роботи є обґрунтування та пропозиція глобальної архітектури системи громадського здоров'я, що інтегрує «Єдине здоров'я», «Здоров'я у всіх політиках», СДЗ та ЦСР через перехід від екосистемного (зоонозоцентричного) до цивілізаційного підходу з фокусом на неінфекційні захворювання як головний об'єкт превентивного управління.

Методологія дослідження. Дослідження ґрунтується на системному підході до аналізу архітектури системи громадського здоров'я. Застосовано системний аналіз міжнародних нормативно-стратегічних документів (One Health, Health in All Policies, соціальні детермінанти здоров'я, Цілі сталого розвитку), метод перехресного впливу для оцінювання системної значущості індикаторів ЦСР, кейс-аналіз впровадження концепції One Health в Україні та порівняльно-концептуальний аналіз, що обґрунтовує перехід від екосистемного до цивілізаційного підходу в проектуванні архітектури системи громадського здоров'я.

Наукова новизна. Уперше запропоновано інтегративну чотирирівневу модель глобальної архітектури системи громадського здоров'я, що поєднує концепції One Health, соціальних детермінант здоров'я, Health in All Policies та Цілей сталого розвитку. Введено поняття «Єдине здоров'я-фільтр» як інструмент ідентифікації міжсекторальних ризиків.

Висновки. Запропонована глобальна архітектура системи громадського здоров'я, що інтегрує концепцію «Єдине здоров'я» (біоекологічне ядро), соціальні детермінанти здоров'я (соціально-економічний рівень), стратегію «Здоров'я у всіх політиках» (управлінський механізм) та Цілі сталого розвитку (нормативно-цільова рамка), дозволяє обґрунтувати перехід від екосистемного (орієнтованого переважно на зооносні інфекції) до цивілізаційного підходу, де головним об'єктом превентивного управління стають неінфекційні захворювання (90 % глобального тягаря), зумовлені антропогенними змінами планетарного масштабу. Для України, з урахуванням воєнної деградації довкілля, демографічної кризи та зростання психічних розладів, пріоритетом є впровадження інструменту «Єдине здоров'я-фільтр», інтеграція епіднагляду, екологічного моніторингу та ветеринарної безпеки в єдину аналітико-управлінську платформу з використанням визначених ТОП-5 пріоритетних завдань ЦСР (3.d, 2.4, 6.3, 11.6, 15.5), що забезпечить перехід від реагування на хвороби до превентивного управління цивілізаційними детермінантами здоров'я.

Ключові слова: громадське здоров'я, неінфекційні захворювання, соціальні детермінанти здоров'я, Цілі сталого розвитку, екологічні детермінанти

ABSTRACT

Purpose of the work is to substantiate and propose a global architecture of the public health system that integrates "One Health", "Health in All Policies", SDGs and SDGs through the transition from an ecosystem (zoonosecentric) to a civilizational approach with a focus on non-communicable diseases as the main object of preventive management.

Research methodology. The study is based on a systemic approach to the analysis of the architecture of the public health system. A systemic analysis of international regulatory and strategic documents (One Health, Health in All Policies, social determinants of health, Sustainable Development Goals), a cross-influence method for assessing the systemic significance of SDG indicators, a case analysis of the implementation of the One Health concept in Ukraine and a comparative conceptual analysis that justifies the transition from an ecosystem to a civilizational approach in the design of the architecture of the public health system were applied.

Scientific novelty. For the first time, an integrative four-level model of the global architecture of the public health system is proposed, combining the concepts of One Health, social determinants of health, Health in All Policies and Sustainable Development Goals. The concept of “One Health-filter” is introduced as a tool for identifying intersectoral risks.

Conclusions. The proposed global architecture of the public health system, which integrates the concept of “One Health” (bioecological core), social determinants of health (socio-economic level), the strategy “Health in All Policies” (management mechanism) and the Sustainable Development Goals (normative and target framework), allows us to justify the transition from an ecosystem-based (focused mainly on zoonotic infections) to a civilization-based approach, where the main object of preventive management is non-communicable diseases (90 % of the global burden), caused by anthropogenic changes on a planetary scale. For Ukraine, taking into account the war-related environmental degradation, demographic crisis and the growth of mental disorders, the priority is to implement the “One Health Filter” tool, integrate epidemiological surveillance, environmental monitoring and veterinary safety into a single analytical and management platform using the identified TOP-5 priority tasks of the SDGs (3.d, 2.4, 6.3, 11.6, 15.5), which will ensure the transition from disease response to preventive management of civilizational determinants of health.

Keywords: public health, non-communicable diseases, social determinants of health, Sustainable Development Goals, environmental determinants

Вступ

Глобальний тягар хвороб у XXI столітті визначається переважно неінфекційними захворюваннями (НІЗ), які спричиняють близько 90 % смертності та втрат здоров'я у світі, тоді як частка інфекційних хвороб (включаючи зоонози та нові патогени) не перевищує 10 %. Проте існуюча система громадського здоров'я як в Україні, так і в більшості країн світу зберігає застарілу «медико-санітарну» архітектуру, орієнтовану переважно на інфекційну загрозу, тоді як НІЗ (серцево-судинні, онкологічні, респіраторні, метаболічні, психічні розлади) мають своїми детермінантами екологічну деградацію, хімічне та фізичне забруднення довкілля, зміну клімату, порушення харчування, поведінку людини, малорухомий спосіб життя, соціально-економічну нерівність, хронічний стрес (включаючи воєнний).

Сучасна концепція «Єдине здоров'я» виникла як відповідь на зоонозні інфекції, однак її потенціал є значно ширшим. Вона охоплює також неінфекційні ризики, що виникають на межі «людина – тварина – екосистеми»: забруднення води важкими металами, пестицидами, фармацевтичними залишками (включаючи антибіотики та гормони), деградацію ґрунтів (що впливає на мікроелементний склад їжі), забруднення повітря, зміну клімату, втрату біорізноманіття. Саме ці екологічні детермінанти формують епідемію НІЗ у масштабах цивілізації.

В Україні ситуація посилюється наслідками воєнної агресії: руйнування

промислової та комунальної інфраструктури, забруднення ґрунтів і вод вибуховими речовинами, нафтопродуктами, важкими металами, зростання психічних розладів (ПТСР, депресія, тривожність), погіршення харчування, міграція, втрата доступу до чистої води та зелених зон. (Deikun, 2025a; Blashchuk, 2025) Демографічна криза (низька народжуваність, висока смертність, старіння населення) прямо корелює з поширеністю НІЗ, що, у свою чергу, знижує економічну продуктивність та обороноздатність країни.

Водночас чотири глобальні концептуальні підходи – «Єдине здоров'я» (ОН), «Здоров'я у всіх політиках» (HiAP), соціальні детермінанти здоров'я (СДЗ) та Цілі сталого розвитку (ЦСР) – досі розвиваються паралельно, без системної інтеграції ні на глобальному, ні на національному рівнях (FAO et al., 2022; WHO, 2014; United Nations, 2015; Lekhan et al., 2023). Відсутність єдиної архітектури призводить до того, що екологічні та соціальні детермінанти НІЗ залишаються поза межами пріоритетів системи громадського здоров'я. HiAP залишається декларацією без механізмів реалізації, СДЗ – переважно аналітичною рамкою, а ЦСР – набором індикаторів, які слабо корелюють з операційною діяльністю системи громадського здоров'я.

Таким чином, актуальним є перехід від екосистемного (який все ще часто ототожнюється лише з інфекційними зоонозами) до системного підходу до громадського здоров'я, де здоров'я населення розглядається як інтегральна функція стійкості біологічних, екологічних, соці-

альних, економічних, політичних та інституційних систем, а НІЗ є головним об'єктом превентивного управління. У рамках цього дослідження пропонується нова глобальна архітектура системи громадського здоров'я, яка забезпечує синергію ОН, HiAP, СДЗ та ЦСР через:

- спільні індикатори ризиків на межі «екосистеми – соціум – інфраструктура»;

- міжсекторальні механізми прийняття рішень (від місцевого до національного рівня);

- переорієнтацію фінансування з лікування наслідків НІЗ на усунення їхніх цивілізаційних детермінант.

Мета дослідження – обґрунтувати та запропонувати глобальну архітектуру системи громадського здоров'я, що інтегрує «Єдине здоров'я», «Здоров'я у всіх політиках», СДЗ та ЦСР через перехід від екосистемного (зоонозоцентричного) до планетарного здоров'я з фокусом на неінфекційні захворювання як головний об'єкт превентивного управління.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати концептуальні розриви між чотирма глобальними підходами та існуючою «медико-санітарною» архітектурою системи громадського здоров'я, яка зберігає пріоритет інфекційних загроз (10 % тягаря) над неінфекційними (90 % тягаря).

2. Визначити спільні детермінанти НІЗ, що лежать на перетині екосистемних (забруднення води, ґрунтів, повітря, зміна клімату, втрата біорізноманіття) та соціальних (нерівність, стрес, харчування, урбанізація, воєнні наслідки) факторів, які можуть стати основою для уніфікованих індикаторів ризику.

3. Запропонувати структурну модель глобальної архітектури системи громадського здоров'я, що включає:

- спільну платформу моніторингу ризиків (екосистемні + соціальні + + інфраструктурні індикатори);

- міжсекторальні механізми прийняття рішень (на рівні місцевих громад, регіонів, держави);

- переорієнтацію фінансових потоків з лікування наслідків НІЗ на усунення їхніх цивілізаційних детермінант.

4. Обґрунтувати перехід від екосистемного до планетарного здоров'я,

показавши, що здоров'я населення є інтегральною функцією стійкості біологічних, екологічних, освітніх, соціальних, економічних, політичних та інституційних систем.

5. Оцінити специфіку України як кейсу воєнної та повоєнної трансформації: руйнування інфраструктури, забруднення довкілля, міграція, психічне здоров'я, демографічна криза – та визначити пріоритетні точки входження запропонованої архітектури.

6. Сформулювати рекомендації щодо імплементації запропонованої архітектури на національному рівні (з адаптацією до ресурсних обмежень) та міжнародному рівні (уніфікація індикаторів, транскордонне співробітництво).

Наукова новизна полягає в тому, що:

1. Дістала подальшого розвитку та систематизації інтегративна чотирирівнева модель глобальної архітектури системи громадського здоров'я, де, з огляду на специфіку умов та потреб системи громадського здоров'я України:

- «Єдине здоров'я» – біоекологічне ядро (відповідає за передбачення ризиків на межі «людина–тварина–екосистеми»);

- соціальні детермінанти здоров'я – соціально-економічний рівень (відповідає за структуру нерівності, харчування, урбанізацію, стрес);

- «Здоров'я у всіх політиках» – управлінський механізм (відповідає за міжсекторальну координацію);

- Цілі сталого розвитку – нормативно-цільова рамка (відповідає за стратегічне планування та індикатори).

2. Введено поняття «Єдине здоров'я-фільтр» – інструмент ідентифікації міжсекторальних індикаторів на перетині «людина – тварина – довкілля», який дозволяє системі громадського здоров'я виявляти ризики, що не належать виключно до жодного з секторів (наприклад, залишки антибіотиків у воді, важкі метали в ґрунтах, зменшення біорізноманіття як передвісник нових патогенів).

3. Обґрунтовано перехід від екосистемного до цивілізаційного підходу в архітектурі системи громадського здоров'я, що передбачає:

- розширення об'єкта управління з інфекційних зоонозів до неінфекційних

захворювань (НІЗ) як головного глобального тягаря;

- включення до системи моніторингу цивілізаційних детермінант (зміна клімату, воєнна деградація довкілля, хімічне забруднення);

- заміну лінійно-галузевої логіки багаторівневою системною архітектурою з контурами зворотного зв'язку.

4. Уперше сформульовано вимоги до системи громадського здоров'я в умовах цивілізаційного переходу: здатність управляти ризиками на біологічному, екологічному, соціальному, економічному, політичному та інституційному рівнях одночасно.

Теоретичне значення полягає в тому, що:

1. Розширено концептуальне поле громадського здоров'я за рахунок системної інтеграції чотирьох глобальних стратегій («Єдине здоров'я», «Здоров'я у всіх політиках», соціальні детермінанти здоров'я та Цілі сталого розвитку), які досі розвивалися паралельно. Запропоновано їхнє функціональне розмежування в межах єдиної архітектури системи:

- «Єдине здоров'я» → виявлення ризиків («сенсорна система»);

- соціальні детермінанти здоров'я → аналіз вразливості («аналітична підсистема»);

- «Здоров'я у всіх політиках» → координація рішень («управлінська підсистема»);

- Цілі сталого розвитку → цільові індикатори («нормативно-регуляторна підсистема»).

2. Сформульовано парадигму «цивілізаційного здоров'я» як функції стійкості трьох доменів:

- екосистемна стійкість (якість води, ґрунтів, повітря, біорізноманіття, клімат);

- соціальна справедливість (доступ до детермінант здоров'я, зменшення нерівності);

- інституційна спроможність (здатність системи громадського здоров'я до міжсекторальної координації, особливо в умовах воєнних та постраваматичних викликів).

3. Запропоновано трирівневу ієрархію ЦСР як теоретичну альтернативу лінійному ранжуванню, що дозволяє враховувати системні ефекти в архітектурі громадського здоров'я (тут і надалі нумерація використовується на основі Цілей сталого розвитку ООН).

Практичне значення полягає в тому, що:

1. Визначено ТОП-5 пріоритетних завдань ЦСР для України в межах запропонованої системної архітектури:

- ЦСР 3.d (потенціал раннього попередження, зменшення ризиків) – ключова підсистема моніторингу;

- ЦСР 2.4 (стійке виробництво харчів) – детермінанта харчування та ризик АМР;

- ЦСР 6.3 (якість води) – найбільш чутливий індикатор (доведено методом перехресного впливу);

- ЦСР 11.6 (екологічний вплив міст) – урбаністичні детермінанти НІЗ;

- ЦСР 15.5 (збереження біорізноманіття) – передвісник екосистемної дестабілізації.

2. Запропоновано конкретні індикатори для стратегічного моніторингу в межах оновленої архітектури системи:

- поширеність антимікробної резистентності (AMR) у довкіллі (вода, ґрунт);

- якість води та ґрунтів за хімічними (важкі метали, пестициди, залишки антибіотиків) та мікробіологічними показниками;

- поширеність зоонозів та індикаторних видів патогенів;

- стан біорізноманіття (індикатори втрати видів, фрагментації середовищ);

- безпечність харчових систем (від первинного виробництва до споживання).

3. Результати можуть бути використані для:

- оновлення регіональних програм громадського здоров'я (зокрема, пілотна апробація у Чернігівській області, що зазнала значної воєнної деградації довкілля);

- приведення національної системи громадського здоров'я України до стандартів, сумісних з ЄС (в рамках євроінтеграційних зобов'язань);

- розробки міжсекторальних механізмів реагування на ризики, що лежать на перетині екології, безпеки, сільського господарства та охорони здоров'я.

Матеріали і методи дослідження

Застосовано системний аналіз міжнародних нормативно-стратегічних документів (Манхеттенські принципи, Оттавська хартія, Аделаїдська/Гельсінська заяви, Резолюція ООН A/RES/70/1, Спільний план дій як чотирирівневу модель глобальної архі-

текстури громадського здоров'я 2022–2026). Використано метод перехресного впливу (оцінка за критеріями чутливості, важеля та керованості). Для українського контексту залучено дані впровадження британської моделі біобезпеки (2023–2024) та результати вітчизняних досліджень (Wildlife Conservation Society, 2004; WHO, 1986; WHO & Government of South Australia, 2010; WHO, 2014; United Nations, 2015; FAO et al., 2022).

Постановка проблеми. Вітчизняна система громадського здоров'я досі зберігає залишкову «медико-санітарну» архітектуру, орієнтовану переважно на реагування на інфекційні загрози (зоонози, спалахи, біобезпеку), тоді як глобальний тягар хвороб у XXI столітті визначається переважно неінфекційними захворюваннями (серцево-судинні, онкологічні, респіраторні, метаболічні, психічні розлади). Детермінантами цих НІЗ є екологічна деградація, хімічне та фізичне забруднення довкілля, зміна клімату, порушення харчування, малорухомий спосіб життя, соціально-економічна нерівність та хронічний стрес (включаючи військовий). Міжнародна спільнота декларує перехід до міжсекторальних стратегій, проте чотири глобальні концептуальні підходи – ОН, НіАР, СДЗ та ЦСР – досі розвиваються паралельно, без системної інтеграції ні на глобальному, ні на національному рівнях (WHO, 2014; Kokkinen et al., 2019; Lekhan et al., 2023). Наслідком цього є дублювання функцій, розпорошення ресурсів, відсутність спільних індикаторів ризику та низька ефективність превентивних втручань щодо неінфекційних захворювань, які формують основну частку втрат здоров'я населення.

Крім того, система громадського здоров'я України функціонує в умовах подвійного тиску: по-перше, наслідків воєнної агресії (руйнування промислової та комунальної інфраструктури, вимушена міграція, забруднення ґрунтів і вод вибуховими речовинами, нафтопродуктами та важкими металами, деградація сільськогосподарських земель, пошкодження систем водопостачання та каналізації); по-друге, глобальних викликів, що набули хронічного характеру (поширення анти-мікробної резистентності у довкіллі, зміна клімату, втрата біорізноманіття, хімічне та

фармацевтичне забруднення вод і ґрунтів, поява нових зоонозів). Демографічна ситуація в країні характеризується депопуляцією, високою смертністю населення працездатного віку (переважно внаслідок неінфекційних захворювань, на які припадає близько 90 % глобального тягаря втрат здоров'я), погіршенням показників репродуктивного здоров'я та зростанням поширеності психічних розладів (ПТСР, депресія, тривожність), зумовлених військовим стресом. Економічні втрати від передчасної смертності та захворюваності оцінюються в мільярди гривень щорічно, що безпосередньо впливає на обороноздатність країни через зменшення мобілізаційного ресурсу, зниження продуктивності праці та зростання видатків на соціальну підтримку.

Таким чином, проблема дослідження полягає у концептуальній та інституційній невідповідності існуючої глобальної та національної архітектури системи громадського здоров'я сучасним викликам, що вимагає обґрунтованого переходу від екосистемного підходу (який історично сформувався навколо зоонозних інфекцій та обмежується тріадою «людина – тварина – довкілля») до цивілізаційного підходу, де здоров'я населення розглядається як інтегральна функція стійкості біологічних, екологічних, соціальних, поведінкових, економічних, політичних та інституційних систем. Вирішення цієї проблеми передбачає розробку такої глобальної архітектури системи громадського здоров'я, яка забезпечує синергію підходів «Єдине здоров'я», «Здоров'я у всіх політиках», соціальні детермінанти здоров'я та Цілі сталого розвитку, а для України – враховує специфіку воєнної та повоєнної трансформації, включаючи руйнування інфраструктури, забруднення довкілля, демографічну кризу та потребу в інтеграції у європейський простір громадського здоров'я.

Результати дослідження та обговорення

Інституційний аспект глобальної архітектури системи громадського здоров'я передбачає створення багаторівневої мережі формальних та неформальних інституцій, здатних забезпечити горизонтальну та вертикальну координацію між секторами охорони здоров'я, екології, ветеринарії,

аграрної політики, соціального захисту та економічного розвитку. Ключову роль у цьому процесі відіграють ООН, ВООЗ, Продовольча та сільськогосподарська організація ООН, Міжнародна організація праці як інституційний носій соціальних детермінант здоров'я, а також національні міжвідомчі структури, які імплементують принципи ОН, HiAP, СДЗ та ЦСР у мандати цих інституцій, - усі ці суб'єкти спільно забезпечують легітимацію міжсекторальних рішень та формують нормативно-правове підґрунтя для подолання розривів між політиками, що впливають на здоров'я населення (St-Pierre et al., 2018; Lekhan et al., 2023). Важливою передумовою ефективності такої міжсекторальної взаємодії є забезпечення доброчесності сучасних біомедичних та екологічних досліджень, оскільки якість і достовірність доказової бази безпосередньо визначають обґрунтованість управлінських рішень (Lukash et al., 2025).

Організаційний та функціональний аспекти виявляються через створення спільних координаційних механізмів, міжвідомчих робочих груп та платформ для обміну даними, які забезпечують одночасне врахування чотирьох концептуальних рівнів запропонованої архітектури (FAO et al., 2022; World Bank, 2018):

- біоекологічного (принципи ОН – циркуляція патогенів, антимікробна резистентність, стан екосистем);
- соціально-економічного (СДЗ – нерівність, харчування, урбанізація, стрес, освіта);
- управлінського (HiAP – міжсекторальна координація, політична воля, механізми прийняття рішень);
- нормативно-цільового (ЦСР – індикатори сталого розвитку, глобальні зобов'язання, моніторинг прогресу).

Забезпечення якості таких даних має супроводжуватися дотриманням принципів дослідницької доброчесності та коректним застосуванням статистичних методів у медико-біологічних та екологічних дослідженнях (Lukash et al., 2025; Lukash et al., 2026).

Функціональна модель передбачає не лише моніторинг захворюваності та демографічних процесів, а й прогнозування довгострокової динаміки цих процесів в

залежності від кліматичних змін, урбанізації, міжнародної торгівлі, міграційних потоків та соціально-економічних трансформацій.

Така архітектура реалізує перехід від екосистемного підходу (який фокусується на циркуляції патогенів на межі середовищ «людина – тварина – довкілля» та історично обмежується переважно інфекційними загрозами) до цивілізаційного підходу, де здоров'я населення розглядається як інтегральний результат узгодженої роботи глобальних інституцій, національних урядів та локальних громад, об'єднаних спільною відповідальністю за сталий розвиток людства. У цивілізаційному підході об'єктом превентивного управління стають не лише зоонози, а передусім НІЗ, детерміновані екологічною деградацією, хімічним забрудненням, зміною клімату, втратою біорізноманіття, соціально-економічною нерівністю та хронічним стресом (включаючи воєнний).

Система громадського здоров'я в цій парадигмі набуває здатності управляти ризиками на біологічному, екологічному, соціальному, економічному, політичному та інституційному рівнях одночасно.

Відповідно до мети та завдань дослідження, проведено системний аналіз еволюції чотирьох концептуальних напрямів. Перше завдання – систематизація етапів становлення. З'ясовано, що концепція «Єдине здоров'я» не має єдиної дати затвердження. Її формування відбувалося поступово:

I. Ключові етапи становлення концепції «Єдине здоров'я» включають:

2004 рік - Організація «Товариство охорони дикої природи» сформулювала «Манхеттенські принципи» (12 принципів) (Wildlife Conservation Society, 2004):

1. Визнати нерозривний зв'язок між здоров'ям людей, свійських тварин і дикої природи, а також загрози, які хвороби становлять для населення, продовольчої безпеки, економіки та біорізноманіття.

2. Визнати вплив рішень щодо використання земельних і водних ресурсів на здоров'я, оскільки зміни екосистем сприяють виникненню та поширенню хвороб.

3. Інтегрувати науку про здоров'я дикої природи до глобальних систем профілактики, епіднагляду, моніторингу та контролю захворювань.

4. Визнати внесок програм охорони здоров'я людини у збереження природи та біорізноманіття.

5. Розробляти адаптивні, комплексні та перспективні підходи до профілактики, моніторингу та контролю нових і повторно виникаючих захворювань з урахуванням взаємозв'язків між видами.

6. Поєднувати збереження біорізноманіття з потребами людей і здоров'ям свійських тварин при розробці заходів протидії інфекційним загрозам.

7. Зменшити попит на міжнародну торгівлю живою дикою природою та диким м'ясом і посилити її регулювання, щоб знизити ризики міжвидової передачі патогенів.

8. Обмежити масове знищення диких тварин як засіб контролю захворювань лише випадками, коли існує міжнародний науковий консенсус щодо реальної загрози.

9. Збільшити інвестиції у глобальну інфраструктуру охорони здоров'я людей і тварин, включаючи системи нагляду та обміну інформацією.

10. Розвивати партнерство між урядами, місцевими громадами, приватним і громадським секторами для вирішення глобальних проблем здоров'я та збереження біорізноманіття.

11. Забезпечити належну підтримку глобальних мереж моніторингу здоров'я дикої природи, інтегрованих із системами громадського здоров'я та ветеринарного нагляду.

12. Інвестувати в освіту, підвищення обізнаності та вдосконалення політики, щоб суспільство краще усвідомлювало взаємозв'язок між здоров'ям і цілісністю екосистем.

Узагальнення. Манхеттенські принципи вперше на міжнародному рівні закріпили ідею, що здоров'я людей, тварин і екосистем є єдиною взаємопов'язаною системою. Вони заклали основу для сучасної концепції «Єдине здоров'я», яка нині підтримується такими міжнародними організаціями, як: Продовольча та сільськогосподарська організація ООН, ВООЗ тварин та Програма ООН з навколишнього середовища. У контексті концепції «Єдине здоров'я» ці організації разом із ВООЗ утворюють Чотиристороннє партнерство, яке координує глобальну політику та діяльність у сфері «Єдине здоров'я»

2008 рік - Продовольча та сільськогосподарська організація ООН, ВООЗ, ВООЗ тварин та інші організації спільно опублікували стратегічну записку щодо зниження ризиків інфекційних захворювань на межі «людина-тварина-екосистема».

2010 рік - на Міжнародній конференції в Ганой прийнято «Ганойську декларацію», що закріпила необхідність міжсекторальної співпраці для запобігання та реагування на загрози, що виникають на стику здоров'я людей, тварин і навколишнього середовища. Декларація наголосила на важливості інтегрованого епіднагляду, обміну інформацією між секторами, зміцнення національного та міжнародного потенціалу для виявлення й контролю нових інфекційних загроз, а також координації дій органів охорони здоров'я, ветеринарних служб, екологічних установ, наукових організацій та інших зацікавлених сторін. Документ став важливим етапом переходу від концептуального розуміння «Єдине здоров'я» до практичного впровадження міжсекторальних механізмів управління ризиками для здоров'я людей, тварин і екосистем.

2022 рік - чотири міжнародні організації - ВООЗ, Продовольча та сільськогосподарська організація ООН, ВООЗ тварин та Програма ООН з навколишнього середовища - затвердили Спільний план дій «Єдине здоров'я» на 2022–2026 роки, який став найбільш повним офіційним документом у цій сфері (FAO et al., 2022).

Суть концепції: Підхід визнає нерозривний зв'язок між здоров'ям людей, тварин і екосистем: близько 60 % інфекційних хвороб людини мають зоонозне походження, тому ізольований підхід до охорони здоров'я є неефективним.

Інші міжнародні документи в контексті «Єдиного здоров'я»:

2005 рік - Міжнародні медико-санітарні правила ВООЗ, які є юридично обов'язковим інструментом глобального епіднагляду та раннього попередження;

2016 рік - Куала-Лумпурська - декларація «Єдиного здоров'я» як політичне закріплення інтеграції секторів у регіональному вимірі;

2015 рік - Сеульська декларація з антимікробної резистентності, що безпосередньо імплементує Єдине здоров'я - підхід у сфері антимікробної резистентності;

2021 рік - Стратегічний рамковий документ - Чотиристороннє партнерство «Єдине здоров'я», який визначає механізми координації між Всесвітньою організацією охорони здоров'я, Продовольчою та сільськогосподарською організацією ООН, ВООЗ тварин та Програмою ООН з довкілля;

2015 рік - Глобальний план дій з боротьби з антимікробною резистентністю, який фактично є однією з найбільш операціоналізованих платформ реалізації «Єдиного здоров'я». Сукупно ці документи переводять концепцію від декларативно-ідеологічного рівня, представленого Манхеттенськими принципами і Ганойською декларацією, до юридично та інституційно закріпленої системи глобального управління ризиками на межі «людина-тварина-довкілля» Практичне застосування One Health також охоплює управління основними зоонозними захворюваннями на міжсекторальному рівні (Rai et al., 2024).

В Україні концепцію активно впроваджують з 2023–2024 років, зокрема за британською моделлю у сфері біобезпеки.

II. Концепція «Здоров'я у всіх політиках» формувалася поступово, але її міжнародне політичне закріплення відбулося у два ключові етапи:

2010 рік - Аделаїдська заява «Здоров'я у всіх політиках», розроблена та схвалена на Міжнародній нараді з питань «Здоров'я у всіх політиках» в Аделаїді за спільної участі ВООЗ та уряду штату Південна Австралія. У заяві було визначено принципи міжсекторального управління, відповідно до яких усі галузі державної політики повинні враховувати вплив своїх рішень на здоров'я населення.

2013 рік - Гельсінська декларація «Здоров'я у всіх політиках», офіційно схвалена учасниками 8-ї Глобальної конференції з промоції здоров'я, організованої ВООЗ у місті Гельсінкі. Саме цей документ вважається міжнародним політичним мандатом для впровадження стратегії «Здоров'я у всіх політиках» на національному та міжнародному рівнях.

III. Про соціальні детермінанти здоров'я як концепцію. Соціальні детермінанти здоров'я не були затверджені одним документом чи в один конкретний день. Концепція формувалася поступово в межах діяльності ВООЗ та міжнародного руху промоції здоров'я.

Ключові етапи створення соціальних детермінант здоров'я як концепції:

1978 рік - Алма-Атинська декларація вперше наголосила, що здоров'я населення визначається не лише діяльністю сектору охорони здоров'я, а й соціальними, економічними та екологічними чинниками.

21 листопада 1986 року - Оттавська хартія зі зміцнення здоров'я, ухвалена Першою міжнародною конференцією з промоції здоров'я під егідою ВООЗ, визначила основні передумови здоров'я: мир, житло, освіту, харчування, дохід, стабільну екосистему, сталі ресурси, соціальну справедливість та рівність. Саме цей документ вважається основою сучасного розуміння детермінант здоров'я.

2008 рік - комісія ВООЗ із соціальних детермінант здоров'я опублікувала доповідь «Подолання розриву протягом одного покоління: забезпечення справедливості у здоров'ї шляхом впливу на соціальні детермінанти здоров'я», яка офіційно закріпила сучасну концепцію соціальних детермінант здоров'я та їхній вплив на нерівності у здоров'ї населення.

Таким чином, Концепція детермінант здоров'я була міжнародно визнана у 1986 році після ухвалення ВООЗ Оттавської хартії зі зміцнення здоров'я, яка офіційно закріпила підхід, відповідно до якого рівень здоров'я населення визначається широким спектром соціальних, економічних та екологічних чинників. Подальший розвиток і сучасне наукове обґрунтування концепції соціальних детермінант здоров'я було сформульовано у 2008 році Комісією ВООЗ із соціальних детермінант здоров'я.

IV. Цілі сталого розвитку ООН були офіційно затверджені 25 вересня 2015 року на Саміті ООН зі сталого розвитку в штаб-квартирі ООН у Нью-Йорку (United Nations, 2015). Їх одноголосно ухвалили всі 193 держави-члени ООН у складі Резолюції Генеральної Асамблеї ООН A/RES/70/1 «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року», якою були затверджені 17 Цілей сталого розвитку, 169 завдань та система глобальних індикаторів (231 унікальних та 248 з повтореннями) для їх моніторингу.

Коротка хронологія етапів розробки та затвердження ЦСР:

- 2012 рік - на Конференції ООН зі сталого розвитку «Ріо+20», що відбулася у 2012 році в

місті Ріо-де-Жанейро (Бразилія) ухвалено рішення про розробку Цілей сталого розвитку;

- 2013–2015 роки - працювала Відкрита робоча група ООН з розробки ЦСР;

- 25 вересня 2015 року - Генеральна Асамблея ООН затвердила 17 ЦСР і 169 завдань та система глобальних індикаторів (231 унікальних та 248 з повтореннями) для їх моніторингу;

- 1 січня 2016 року - Порядок денний 2030 офіційно набув чинності.

У контексті громадського здоров'я важливо, що ЦСР стали першою глобальною рамкою розвитку, в якій здоров'я розглядається не лише через Ціль 3 «Міцне здоров'я і благополуччя», а й через міжсекторальний вплив усіх 17 цілей, що повністю відповідає принципам стратегії «Здоров'я у всіх політиках».

Ранжирування 17 ЦСР в контексті впливу концепції «Єдиний світ – єдине здоров'я» на громадське здоров'я потребує зміщення акценту з традиційного медичного підходу до екосистемного.

Оскільки концепція «Єдине здоров'я» стверджує, що здоров'я людини нерозривно пов'язане зі здоров'ям тварин, рослин та навколишнього середовища, критерієм ранжирування має стати «здатність цілі виступати детермінантою ризиків або ресурсів для здоров'я популяцій» (FAO et al., 2022).

Пропонуємо трирівневу ієрархію (від критично важливих до опосередкованих) для фахівців системи громадського здоров'я:

Рівень I. Базові детермінанти (мають найвищий пріоритет для «Єдиного здоров'я»).

Ці цілі формують «екологічний фундамент» здоров'я. Без їх досягнення всі інші втручання у громадське здоров'я будуть неефективними.

1. ЦСР 6 (Чиста вода та санітарія): Ключова ланка. Забруднення води (пестицидами, антибіотиками, важкими металами) впливає на гідробіонтів, ґрунти, рослини і людей. Індикатори якості води є ранніми маркерами спалахів інфекцій та хімічного навантаження.

2. ЦСР 15 (Життя на суходолі): Включає здоров'я ґрунтів, лісів та біорізноманіття. Деградація ґрунтів -> зниження імунітету рослин -> надлишок пестицидів -> онкологія у людей. Збереження буферних зон (природоохоронні території, як у Чернігові) – це профілактика зоонозів.

3. ЦСР 13 (Боротьба зі зміною клімату): Клімат змінює ареали переносників хвороб

(кліщі, комарі), впливає на врожайність (харчова безпека) та тепловий стрес (смертність).

Рівень II. Системоутворюючі цілі (визначають стійкість системи громадського здоров'я).

Ці цілі визначають, як організована система реагування на загрози в рамках концепції «Єдине здоров'я».

1. ЦСР 3 (Міцне здоров'я і благополуччя): безпосередньо ціль. Але в парадигмі «Єдине здоров'я» її не можна досягти ізольовано. Індикатори мають включати не лише кількість ліжок, а й частоту зоонозних спалахів (пташиний грип, COVID-19) та рівень резистентності до антибіотиків у стічних водах.

2. ЦСР 2 (Подолання голоду): Безпека харчових продуктів. «Єдине здоров'я» тут – це контроль мікотоксинів (Polotnianko & Mekhed, 2023; Polotnianko & Mekhed, 2024), антибіотиків у м'ясі та молоці, а також вплив нішевих культур на мікробіом людини.

3. ЦСР 11 (Сталі міста та громади): Зелена інфраструктура міст безпосередньо впливає на респіраторне та психічне здоров'я (ресторативний ефект). Планування міст з урахуванням коридорів для міграції тварин зменшує ризик конфліктів людини з дикою природою.

Рівень III. Забезпечувальні та соціально-економічні цілі (створюють умови для впровадження). Ці цілі є інструментами чи модераторами впливу на громадське здоров'я:

1. ЦСР 17 (Партнерство): без міжсекторальної взаємодії (ветеринарія, екологія, медицина, агрономія) «Єдине здоров'я» неможливе. Це ціль-інтегратор.

2. ЦСР 1 (Бідність), ЦСР 4 (Якісна освіта), ЦСР 5 (Гендерна рівність): визначають соціальну вразливість. Бідні громади частіше контактують із забрудненими водами, не мають доступу до вакцинації «Єдине здоров'я», підхід до сказу тощо).

3. ЦСР 7 (Енергетика), ЦСР 9 (Інновації), ЦСР 12 (Відповідальне споживання): впливають через забруднення повітря (тверді частинки), переробку відходів та циркулярну економіку.

Для організації системи громадського здоров'я нами проведено ранжирування 169 завдань ЦСР та індикаторів для практичного використання в системі громадського здоров'я із застосуванням «Методу перехресного впливу», де кожен індикатор оцінюється за трьома шкалами:

Таблиця 1

Ранжування 169 завдань ЦСР та індикаторів для практичного використання в системі громадського здоров'я із застосуванням «Методу перехресного впливу»

Критерій	Пояснення	Приклад (ранжування)
А. Чутливість (передвісник)	Наскільки зміна цього індикатора сигналізує про майбутню загрозу для здоров'я людей?	Найвищий ранг: Завдання 6.3 (якість води) -> ризик холери. Низький ранг: Кількість туристів (ЦСР 8).
В. Важіль (сила впливу)	Наскільки втручання в цей індикатор одночасно покращує здоров'я людей, тварин та екосистеми?	Найвищий ранг: Зниження використання антибіотиків у тваринництві (ЦСР 3 + 2). Низький ранг: Будівництво нової лікарні без змін у екології.
С. Керованість	Чи може система громадського здоров'я вплинути на цей індикатор?	Високий: Вакцинація тварин (ЦСР 3). Низький: Глобальна температура (ЦСР 13) – лише адаптація.

Підсумкова матриця для пріоритетних завдань (ТОП-5 для українського контексту):

1. 3.d – Зміцнення потенціалу раннього попередження, зменшення ризиків («Єдиний світ – єдине здоров'я» на рівні громад).

2. 2.4 – Забезпечення сталих систем виробництва харчових продуктів (нішеві культури, здорові ґрунти).

3. 6.3 – Поліпшення якості води шляхом зменшення забруднення (стоки лікарень, ферм).

4. 11.6 – Зменшення негативного екологічного впливу міст на душу населення (зелені зони як легені).

5. 15.5 – Збереження природних середовищ існування (заповідники Чернігівщини як «банк здоров'я»).

З позицій концепції «Єдине здоров'я» методологічно недоцільним є лінійне ранжування 17 Цілей сталого розвитку, оскільки їхній вплив на громадське здоров'я реалізується через складну мережу екологічних, соціальних, економічних, поведінкових та біологічних взаємозв'язків. У зв'язку з цим доцільно використовувати інтегративний «Єдине здоров'я - фільтр», який дозволяє ідентифікувати завдання та індикатори, що одночасно впливають на здоров'я населення, стан тваринного світу та екосистемну стійкість. Саме такі індикатори слід розглядати як системоутворюючі пріоритети державної політики, громадського здоров'я та сталого розвитку. До них належать показники антимікробної

резистентності в довкіллі, якості води та ґрунтів, поширеності зоонозних інфекцій, стану біорізноманіття, безпечності харчових систем та інших параметрів, що характеризують функціонування єдиної соціо-еколого-біологічної системи. Концентрація ресурсів на таких індикаторах забезпечує максимальний синергетичний ефект, оскільки одночасно сприяє зміцненню громадського здоров'я, збереженню екосистем та підвищенню стійкості суспільства до сучасних і майбутніх глобальних викликів.

З огляду на сучасні тенденції розвитку цивілізації, саме міжсекторальні індикатори перетину систем «людина – тварина – довкілля» мають розглядатися як пріоритетні об'єкти стратегічного моніторингу, прогнозування та інвестування, формуючи основу переходу від реагування на наслідки до превентивного управління детермінантами здоров'я на популяційному, національному та глобальному рівнях.

Сучасний етап розвитку концептуального поля «Єдине здоров'я», «Здоров'я у всіх політиках», підходу соціальних детермінант здоров'я та Цілей сталого розвитку формує нову парадигму системи громадського здоров'я, яка може бути визначена як інтегрована екосистемно-орієнтована модель управління здоров'ям цивілізації (FAO et al., 2022; WHO, 2014; United Nations, 2015). Її сутність полягає у переході від секторного реагування на хвороби до системного управління детермінантами ризику на перетині взаємодії

людини, тваринного світу, довкілля, економіки та соціальних структур.

У сучасному контексті ці напрями функціонують як взаємопов'язані рівні єдиної багатоварової системи. Концепція Єдине здоров'я виконує роль біоекологічного ядра, що забезпечує розуміння циркуляції патогенів, антимікробної резистентності та екологічних трансформацій як єдиного процесу. Соціальні детермінанти здоров'я формують соціально-економічний рівень цієї системи, визначаючи нерівності у впливі ризиків і доступі до ресурсів здоров'я. Стратегія «Здоров'я у всіх політиках» виступає механізмом управлінської інтеграції, забезпечуючи врахування наслідків для здоров'я у всіх секторах державної політики. Цілі сталого розвитку ООН виконують функцію глобальної нормативно-цільової рамки, яка задає вимірювані орієнтири трансформації соціально-екологічних систем.

Інституційно ця взаємодія реалізується через мережеву модель глобального управління, в якій ключову роль відіграє Чотиристоронній альянс з питань «Єдиного здоров'я», як міжсекторальний координаційний механізм. На національному рівні ефективність цієї системи визначається рівнем інтеграції епідагляду, екологічного моніторингу, ветеринарної безпеки, продовольчої політики та соціальної політики у єдину аналітико-управлінську платформу.

Перспективно розвиток системи громадського здоров'я у цій парадигмі передбачає формування адаптивних «систем раннього попередження цивілізаційного рівня», які інтегрують дані про біологічні, екологічні, поведінкові, кліматичні та соціально-економічні процеси у режимі реального часу. Ключовим вектором є перехід до превентивного управління ризиками, де основним об'єктом втручання стають не захворювання, а їх детермінанти та системні передумови.

У довгостроковій перспективі така інтеграція формує основу для парадигми «цивілізаційного здоров'я», в якій збереження здоров'я населення розглядається як функція стійкості екосистем, соціальної справедливості, економічної стабільності та інституційної спроможності держав. У межах цієї моделі система громадського здоров'я трансформується з галузі реагування на ризики у надсекторальну систему управління

поведінкою та життєздатністю суспільств, що поєднує профілактику, політичне регулювання, екологічне управління та соціальний розвиток в єдину когерентну архітектуру.

В процесі дослідження проведений аналіз положень Закону України «Про систему громадського здоров'я» крізь призму концепцій «Єдине здоров'я», соціальних детермінант здоров'я, «Здоров'я в усіх політиках» та Цілей сталого розвитку свідчить, що у Законі наявні положення, що корелюють із концепціями «Єдине здоров'я» та соціальних детермінант здоров'я (Verkhovna Rada of Ukraine, 2022). Так, стаття 1 Закону прямо визначає термін «Єдине здоров'я», трактуючи здоров'я людей, тварин і навколишнього середовища як нерозривне ціле, що створює підґрунтя для міжсекторальної співпраці у сфері громадського здоров'я (Verkhovna Rada of Ukraine, 2022). У цій же статті закріплено поняття соціальних детермінант здоров'я, під якими розуміються соціально-економічні умови, що безпосередньо впливають на стан здоров'я населення. Водночас пряме посилення на концепцію «Здоров'я в усіх політиках» та Цілі сталого розвитку у тексті Закону відсутнє.

Для України, яка реформує систему громадського здоров'я в умовах воєнного стану та на шляху до інтеграції в Європейський Союз, критично важливим є не просте копіювання окремих моделей, а запозичення досвіду країн, що досягли найбільшого прогресу в інтеграції зазначених підходів. Концептуальною основою має стати їхня симультанна реалізація. Передусім слід обґрунтувати необхідність такої інтеграції, оскільки кожен із підходів додає важливий аналітичний вимір: «Єдине здоров'я» акцентує нерозривний зв'язок здоров'я людей, тварин і довкілля; НіАР забезпечує міжсекторальну взаємодію, роблячи здоров'я спільним пріоритетом для всіх міністерств; соціальні детермінанти здоров'я окреслюють структурні чинники, що формують здоров'я; а ЦСР надають глобальну рамку для вимірювання прогресу, включаючи цілі, що безпосередньо стосуються здоров'я та його детермінант. Окремого значення набуває підготовка фахівців громадського здоров'я, здатних працювати в такій міжсекторальній системі, що передбачає формування безпечного та добросовісного освітнього і наукового

середовища як основи відповідальної професійної діяльності (Deikun, 2025a, 2025b).

Ключовим завданням для України є побудова системи, в якій ці підходи функціонують як єдиний механізм. Такий підхід відповідає сучасному розумінню Health in All Policies як механізму забезпечення не лише здоров'я, а й справедливості в різних секторах державної політики (Health and Equity in All Policies [JАНЕЕ], 2019). З огляду на світові практики та євроінтеграційні амбіції України найбільш показовим є досвід наступних країн (Deikun, 2025c).

Фінляндія є загальноновизнаним «золотим стандартом» HiAP, де успіх забезпечується не лише законодавчими актами, а й політичною волею, інституційною пам'яттю та культурою міжвідомчої співпраці, закріпленою на найвищому рівні (зокрема, через спільні зобов'язання 12 міністерств). Цей досвід є прямим дороговказом для ефективної реалізації міжсекторальних стратегій в Україні (Kokkinen et al., 2019).

Австралія (на прикладі штату Південна Австралія) демонструє практичну імплементацію HiAP шляхом інтеграції здоров'я в політики містобудування, освіти тощо через міжвідомчі платформи та оцінку впливу на здоров'я (Аналіз з точки зору впливу на здоров'я) для рішень неохоронних відомств. Для України, яка перебуває в процесі активної відбудови, це дає змогу використовувати HiAP для створення безпечних і здорових громад (WHO & Government of South Australia, 2010; Kokkinen et al., 2019).

Єгипет у 2023 році запустив власну Національну стратегію «Єдине здоров'я», побудовану на понад двадцятирічному накопиченому досвіді, де чітко визначено взаємодоповнюючі ролі різних секторів для ранньої профілактики. Це є зразком розробки системного, а не фрагментарного підходу до ОН.

В'єтнам, який часто називають лідером завдяки добре структурованому національному партнерству ОН, що діє з початку 2000-х років, свідчить про можливість успішної не лише централізованої стратегії, а й гнучкої координаційної мережі, що об'єднує ключових гравців.

Канада (зокрема, провінція Квебек) демонструє впровадження HiAP через конкретні урядові політики, такі як Провінційна політика профілактики в галузі охорони здоров'я Квебеку, з чіткими

механізмами управління, а також через створення спеціалізованих мереж обміну знаннями (наприклад, Канадська мережа «Здоров'я в усіх політиках»).

Важливою умовою такої трансформації є забезпечення сталості наукового та освітнього середовища, у якому підготовка фахівців громадського здоров'я поєднується з принципами безпеки, академічної доброчесності та орієнтації на сталий розвиток (Deikun & Mekhed, 2025). Окремим напрямом має стати розвиток цифрової інфраструктури підготовки та професійної діяльності фахівців громадського здоров'я, що поєднує ресурсно-орієнтоване навчання, дослідницьку діяльність, біобезпеку та кібергігієну (Nosko et al., 2025). Вивчення цих прикладів дозволяє запропонувати для України стратегію уникнення фрагментації, що містить три послідовних кроки:

- перший – використання HiAP як стратегічної основи, головного механізму, що об'єднує всі міністерства навколо спільної мети; без цього будь-які ініціативи ОН залишатимуться відокремленими;

- другий – вбудовування ЦСР як системи координат: Цілі сталого розвитку мають стати спільною мовою для всіх секторів, оскільки вони чітко демонструють, що досягнення здоров'я (ЦСР 3) залежить від подолання бідності (ЦСР 1), голоду (ЦСР 2), освіти (ЦСР 4), чистої води (ЦСР 6), відповідального виробництва (ЦСР 12), миру (ЦСР 16) та партнерства заради сталого розвитку (ЦСР 17);

- третій – конкретизація ОН: у рамках системи, побудованої на HiAP та спрямованої на ЦСР, слід реалізовувати специфічні ініціативи ОН, зокрема у сферах епідагляду за зоонозними інфекціями, безпеки харчових продуктів та боротьби зі стійкістю до протимікробних препаратів.

Висновки

1. Концепції «Єдине здоров'я», «Здоров'я у всіх політиках», соціальні детермінанти здоров'я та Цілі сталого розвитку утворюють взаємопов'язану багатопланову систему, де кожен елемент виконує специфічну функцію: «Єдине здоров'я» – біоекологічне ядро (виявлення ризиків на межі «людина – тварина – довкілля»), соціальні детермінанти здоров'я – соціально-економічний рівень (аналіз вразливості та нерівності), «Здоров'я у всіх політиках» – управлінський механізм

(міжсекторальна координація), Цілі сталого розвитку – нормативно-цільова рамка (стратегічне планування та індикатори сталого розвитку).

2. Обґрунтовано перехід від екосистемного до цивілізаційного підходу в архітектурі системи громадського здоров'я. На відміну від екосистемного підходу, який історично сформувався навколо зоонозних інфекцій та обмежується тріадою «людина – тварина – довкілля», цивілізаційний підхід розширює об'єкт превентивного управління на НІЗ, на які припадає близько 90% глобального тягаря втрат здоров'я. Детермінантами НІЗ визначено антропогенні зміни планетарного масштабу: забруднення довкілля, зміну клімату, втрату біорізноманіття, хімічне та фармацевтичне забруднення (включаючи антимікробну резистентність), соціально-економічну нерівність та воєнну деградацію територій.

3. Сформульовано парадигму «цивілізаційного здоров'я» як функції стійкості трьох доменів: екосистемної стійкості (якість води, ґрунтів, повітря, біорізноманіття, клімат), соціальної справедливості (доступ до детермінант здоров'я, подолання нерівності) та інституційної спроможності (здатність системи до міжсекторальної координації). Запропонована чотирирівнева модель дозволяє перейти від реагування на хвороби до превентивного управління детермінантами ризику на всіх рівнях – від локального до глобального.

4. Методом перехресного впливу встановлено, що лінійне ранжування ЦСР є методологічно недоцільним; натомість запропоновано трирівневу ієрархію (базові, системоутворюючі та забезпечувальні цілі).

Індикатор ЦСР 6.3 (якість води) має найвищу чутливість як передвісник екологічних порушень та спалахів, а зниження використання антибіотиків у тваринництві – найбільший важіль впливу на поширення антимікробної резистентності.

5. Для України, з урахуванням наслідків воєнної агресії (руйнування інфраструктури, забруднення довкілля, міграція, зростання психічних розладів, демографічна криза), пріоритетами імплементації запропонованої архітектури системи громадського здоров'я є: впровадження інструменту «Єдине здоров'я-фільтр» для ідентифікації міжсекторальних ризиків на перетині «людина – тварина – довкілля»; інтеграція епіднагляду, екологічного моніторингу (води, ґрунтів, повітря) та ветеринарної безпеки в єдину аналітико-управлінську платформу; переорієнтація регіональних програм громадського здоров'я з лікування наслідків НІЗ на усунення їхніх цивілізаційних детермінант із використанням визначених ТОП-5 пріоритетних завдань ЦСР (3.d, 2.4, 6.3, 11.6, 15.5).

Перспективи подальших досліджень мають бути спрямовані на розробку кількісних методів оцінки «цивілізаційного здоров'я» (інтегральних індексів стійкості), апробацію запропонованої архітектури СГЗ, розробку адаптивних систем раннього попередження цивілізаційного рівня, які інтегрують соціально-економічні, біологічні, поведінкові, екологічні та кліматичні дані у режимі реального часу; а також на гармонізацію національних систем громадського здоров'я з міжнародними стандартами в рамках повоєнної відбудови та євроінтеграційних процесів.

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

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-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Blashchuk, T. V. (2025). Ensuring the principle of “Health in All Policies” in the implementation of Ukraine’s reconstruction projects. *Juridical Scientific and Electronic Journal*, 8, 45–51. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2025-8/7>

Блашук Т. В. Забезпечення принципу «Здоров’я у всіх політиках» при реалізації проєктів відбудови України. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2025. № 8. С. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2025-8/7>

Deikun, M. (2025a). Public health in the conditions of modern challenges: Policy, resources, demographic trends, depopulation and preservation of the demographic reproduction potential of the nation. *Bulletin of T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”*, 34(190), 124–133. <https://doi.org/10.58407/visnik.253419> (in Ukrainian)

Дейкун М. П. Громадське здоров’я в умовах сучасних викликів: політика, ресурси, демографічні тенденції, депопуляція та збереження демографічного потенціалу нації. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка*. 2025. Вип. 34 (190). С. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.58407/visnik.253419>

Deikun, M. (2025b). Approaches to the formation of the national public health system through the “Health in All Policies” strategy. *Bulletin of T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”*, 31(187), 356–363. <https://doi.org/10.58407/visnik.253158> (in Ukrainian)

Дейкун М. П. Підходи до формування національної системи громадського здоров’я через стратегію «Здоров’я у всіх політиках». *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка*. 2025. Вип. 31 (187). С. 356–363. DOI: <https://doi.org/10.58407/visnik.253158>

Deikun, M. (2025c). Health as a dynamic polysystemic state: System-management, legal and physiological verification of an extended definition. *Bulletin of T.H. Shevchenko National University “Chernihiv Colehium”*, 35(191), 220–232. <https://doi.org/10.58407/visnik.253534> (in Ukrainian)

Дейкун М. П. Здоров’я як динамічний полісистемний стан: системно-управлінська, правова та фізіологічна верифікація розширеної дефініції. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка*. 2025. Вип. 35(191). С. 220–232. DOI: <https://doi.org/10.58407/visnik.253534>

Deikun, M. P., Lukash, O. V., & Mekhed, O. B. (2025). Methodological aspects of forming a safe and honest 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> (in Ukrainian)

Дейкун М. П., Лукаш О. В., Мехед О. Б. Методологічні аспекти формування безпечного та доброчесного освітнього та наукового середовища під час підготовки фахівців громадського здоров’я. *Health & Education*. 2025. № 3. С. 297–302. DOI: <https://doi.org/10.32782/health-2025.3.34>

Deikun, M. P., & Mekhed, O. B. (2025). Sustainable development and a safe scientific environment as necessary conditions for training public health specialists. *Medical Education*, (3), 17–20. <https://doi.org/10.11603/m.2414-5998.2025.3.15606> (in Ukrainian)

Дейкун М. П., Мехед О. Б. Сталий розвиток і безпечне наукове середовище як необхідні умови підготовки фахівців з громадського здоров'я. *Медична освіта*. 2025. № 3. С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.11603/m.2414-5998.2025.3.15606>

FAO, UNEP, WHO, & WOA. (2022). *One Health Joint Plan of Action (2022–2026): Working together for the health of humans, animals, plants and the environment*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2289en>

Health and Equity in All Policies (JAHEE). (2019). *Health and Equity in All Policies – Governance: Policy framework for action*. Joint Action Health Equity Europe. <https://jahee.iss.it/pdf/D9.1-WP9-PFA.pdf>

Ilkiv, N. V. (2025). Regulatory and legal framework for ensuring environmental determinants in the concept of “One Health”. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series “Law”*, 92(2), 329–334. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2025.92.2.44> (in Ukrainian)

Ільків Н.В. Нормативно-правові засади екологічних детермінант у концепції «Єдиного здоров'я». *Науковий вісник Ужгородського Національного Університету*. Серія ПРАВО. 2025. Вип. 92, Ч. 2. С. 329–334. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2025.92.2.44>

Kokkinen, L., Freiler, A., Muntaner, C., & Shankardass, K. (2019). How and why do win-win strategies work in engaging policy-makers to implement Health in All Policies? A multiple-case study of six state- and national-level governments. *Health Research Policy and Systems*, 17, 102. <https://doi.org/10.1186/s12961-019-0509-z>

Lekhan, V. M., Onul, N. M., & Kriachkova, L. V. (2023). Principles of international and national policy and strategies in public health. In *Public health system in Ukraine and EU countries: Realities, transformation, development vectors, perspectives* (pp. 61–99). Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-330-9-3> (in Ukrainian)

Лехан В. М., Онул Н. М., Крячкова Л. В. Засади міжнародної та національної політики і стратегій у сфері громадського здоров'я. *Система охорони здоров'я в Україні та країнах ЄС: реалії, трансформація, вектори розвитку, перспективи*. Рига: Baltija Publishing, 2023. С. 61–99. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-330-9-3>

Lukash, O., Sikura, A., Mekhed, O., & Strilets, S. (2026). MANOVA as a tool for ensuring integrity of medical-biological and environmental research. *Biota. Human. Technology*, (1), 226–234. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.19> (in Ukrainian)

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>

Lukash, O., Tkachenko, H., Sikura, A., Mekhed, O., & Kurgaliuk, N. (2025). The problem of integrity of modern biomedical and environmental research. *Biota. Human. Technology*, (3), 231–237. <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.21> (in Ukrainian)

Лукаш О., Ткаченко Г., Сікура А., Мехед О., Кургалюк Н. Проблема доброчесності сучасних біомедичних та екологічних досліджень. *Biota. Human. Technology*. 2025. № 3. С. 231–237. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.3.25.21>

Nosko, M. O., Deikun, M. P., Mekhed, O. B., & Mekhed, D. B. (2025). Resource-oriented learning in the digital space for the integration of research, biosafety and cyber hygiene in the training of biology and public health specialists. In M. V. Hryniowa & N. V. Kononets (Eds.), *Resource-oriented learning: Theory and practice of training future managers in the digital educational space* (pp. 352–366). Poltava: Poltava V. G. Korolenko National Pedagogical University. <https://doi.org/10.33989/pnp.716.c3178> (in Ukrainian)

Носко М. О., Дейкун М. П., Мехед О. Б., Мехед Д. Б. Ресурсно-орієнтоване навчання у цифровому просторі з метою інтеграції досліджень, біологічної безпеки та кібергігієни у підготовці фахівців з біології та громадського здоров'я. *Ресурсно-орієнтоване навчання: теорія та практика підготовки майбутніх менеджерів у цифровому освітньому просторі: колективна монографія / за ред. д-ра пед. наук М. В. Гриньової, д-ра пед. наук Н. В. Кононец*. Полтава: Полтавський національний педагогічний університет імені В. Г. Короленка, 2025. С. 352–366. DOI: <https://doi.org/10.33989/pnp.716.c3178>

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*. Desna-Polihraf. (in Ukrainian)

Полотнянко Л., Мехед О. Накопичення мікотоксинів у м'язах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) при згодовуванні корму, контамінованого Т2-токсиком. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернівці: 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>

Rai, B. D., Tessema, G. A., Fritsch, L., & Pereira, G. (2024). The application of the One Health approach in the management of five major zoonotic diseases using the World Bank domains: A scoping review. *One Health*, 18, 100695. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2024.100695>

St-Pierre, L., Hamel, G., Lapointe, G., McQueen, D., & Wismar, M. (2018). *Governance tools and framework for Health in All Policies*. National Collaborating Centre for Healthy Public Policy. <https://ccnpps.ca>

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Verkhovna Rada of Ukraine. (2022). *Law of Ukraine "On the public health system" No. 2573-IX*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20> (in Ukrainian)

Верховна Рада України. Про систему громадського здоров'я: Закон України від 06.09.2022 № 2573-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2023. № 17. Ст. 76. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20>

WHO, FAO, OIE, & UNEP. (2022). *Strategic framework for collaboration on antimicrobial resistance: Together for One Health*. World Health Organization. <https://doi.org/10.1056/9789240045408>

Wildlife Conservation Society. (2004). *The Manhattan Principles on "One World, One Health"*. Wildlife Conservation Society. <https://oneworldonehealth.wcs.org/About-Us/Mission/The-Manhattan-Principles.aspx>

World Bank. (2018). *Operational framework for strengthening human, animal, and environmental public health systems at their interface*. World Bank Group. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/703711517234402168>

World Health Organization. (2014). *Health in all policies: Helsinki statement. Framework for country action*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241506908>

World Health Organization. (2015). *Global action plan on antimicrobial resistance*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789241509763>

World Health Organization. (2016). *International Health Regulations (2005)* (3rd ed.). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241580496>

World Health Organization. (1986). *Ottawa Charter for Health Promotion*. World Health Organization. <https://www.who.int/teams/health-promotion/enhanced-wellbeing/first-global-conference>

World Health Organization, & Government of South Australia. (2010). The Adelaide Statement on Health in All Policies: Moving towards a shared governance for health and well-being. *Health Promotion International*, 25(2), 258–260. <https://doi.org/10.1093/heapro/daq034>

Received: 01.07.2026. Accepted: 28.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Дейкун М. Архітектура системи громадського здоров'я: від екосистемного до цивілізаційного підходу. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 211-227.

DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.15>

Cite this article in APA style as:

Deikun, M. (2026). Arkhipekturna systemy hromadskoho zdorovia: vid ekosystemnoho do tsyvilizatsiinoho pidkhodu [Global architecture of the public health system: from an ecosystem to a civilisational approach]. *Biota. Human. Technology*, (2), 211-227. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.15> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Deikun M. [*in Ukrainian: Дейкун М.*], PhD (Medical), Prof., email: deikyn@ukr.net

ORCID: 0000-0008-1359-537X

Scopus-Author ID: 6602485287

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



ECOLOGICAL AND BIOLOGICAL ASPECTS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

ЕКОЛОГІЧНІ ТА БІОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ



UDC 620.92:662.769.2

DOI: 10.58407/bht.2.26.16



Copyright (c) 2026 Elyas Haddad, Vadászi Marianna

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/).

Elyas Haddad, Marianna Vadászi

TECHNICAL VIABILITY OF UNDERGROUND HYDROGEN STORAGE IN DEPLETED HYDROCARBON RESERVOIRS: A GLOBAL COMPARATIVE ANALYSIS



Ільяс Хаддад, Маріанна Вадасі

ТЕХНІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ У ВИЧЕРПАНИХ РЕЗЕРВУАРАХ ВУГЛЕВОДНЮ: ГЛОБАЛЬНИЙ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

ABSTRACT

Purpose of the work. This study evaluates the technical viability of underground hydrogen storage (UHS) in depleted hydrocarbon reservoirs, with a particular focus on Central European basin conditions. The work aims to assess whether depleted oil and gas fields can provide large-scale, long-duration hydrogen storage as an alternative to geographically constrained salt cavern systems.

Methodology. The research is based on a structured literature review and comparative analysis of peer-reviewed publications, international energy agency reports, and documented field pilot projects. Data from Europe, North America, Asia, and Australia were collected and standardized, including reservoir depth, porosity, permeability, operating pressure, hydrogen recovery, and deliverability. Where field data were unavailable, validated numerical simulations and analogue reservoir models were used to ensure consistent engineering evaluation.

Scientific novelty. The study provides a unified global comparison of ten underground hydrogen storage projects in depleted reservoirs, integrating geological, engineering, and operational parameters into a single analytical framework. It highlights the scalability and performance consistency of sandstone reservoirs across different regions and demonstrates their suitability as a major long-term hydrogen storage solution, particularly in regions lacking salt cavern geology.

Conclusions. Results confirm that depleted hydrocarbon reservoirs are technically feasible and scalable for hydrogen storage, with typical operating pressures between 140–220 bar and hydrogen recovery exceeding 80 % under controlled conditions. Hydrogen losses due to dissolution and geochemical interactions remain minimal, while microbial effects are site-dependent and manageable. The findings support the role of depleted reservoirs as a key infrastructure component for future low-carbon energy systems, especially in Central Europe where geological conditions are favorable.

Key words: underground hydrogen storage, depleted reservoirs, energy storage, hydrogen recovery, reservoir engineering

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Це дослідження оцінює технічну доцільність підземного зберігання водню (ПЗВ) у виснажених вуглеводневих резервуарах, з особливим акцентом на умови Центральноєвропейського басейну. Мета роботи – оцінити, чи можуть виснажені нафтогазові родовища забезпечити великомасштабне довготривале зберігання водню як альтернативу географічно обмеженим системам соляних печер.

Методологія. Дослідження базується на структурованому огляді літератури та порівняльному аналізі рецензованих публікацій, звітів міжнародних енергетичних агентств та задокументованих пілотних польових проектів. Були зібрані та стандартизовані дані з Європи, Північної Америки, Азії та Австралії, включаючи глибину резервуарів, пористість, проникність, робочий тиск, видобуток водню та постачання. Там, де польові дані були недоступні, для забезпечення послідовної інженерної оцінки використовувалися перевірені числові симуляції та аналогові моделі резервуарів.

Наукова новизна. Дослідження пропонує єдине глобальне порівняння десяти проектів підземного зберігання водню у виснажених резервуарах, інтегруючи геологічні, інженерні та експлуатаційні параметри в єдину аналітичну основу. Воно підкреслює масштабованість та узгодженість продуктивності піщаникових резервуарів у різних регіонах та демонструє їхню придатність як основного довгострокового рішення для зберігання водню, особливо в регіонах, де відсутня геологія соляних печер.

Висновки. Результати підтверджують, що виснажені резервуари вуглеводнів є технічно доцільними та масштабованими для зберігання водню, з типовим робочим тиском від 140 до 220 бар та ступенем вилучення водню понад 80 % у контрольованих умовах. Втрати водню внаслідок розчинення та геохімічної взаємодії залишаються мінімальними, тоді як мікробний вплив залежить від місця розташування та є керованим. Результати підтверджують роль виснажених резервуарів як ключового компонента інфраструктури для майбутніх низьковуглецевих енергетичних систем, особливо в Центральній Європі, де геологічні умови сприятливі.

Ключові слова: підземне зберігання водню, виснажені резервуари, зберігання енергії, вилучення водню, інженерія резервуарів

Introduction

The energy system of undergoing rapid transformation driven by the decarbonization agenda and the accelerated deployment of renewable energy technologies. The sustained growth of wind and solar power over the past decade has highlighted a critical need for large-scale, long-duration energy storage capable of balancing supply and demand at weekly, seasonal, and annual timescales (IEA, 2024). While electrochemical batteries are well suited to short-duration balancing, their economic and material limitations preclude their use for long-duration storage (Götz et al., 2016).

Hydrogen has emerged as a key energy carrier capable of overcoming these constraints by converting surplus renewable electricity into a storable and transportable chemical form. Its applicability across power generation, industrial processes, and transportation bridges electricity networks with broader energy demand (Yue et al., 2021). Despite this versatility, large-scale surface hydrogen storage remains constrained by volume, cost, and energy density limitations, particularly for compressed and liquefied storage configurations (Andersson & Grönkvist, 2019).

Underground geological storage provides the single known method of hydrogen storage at the magnitude needed to serve national and continent-wide energy systems. Salt caverns are the most developed technology for storing hydrogen among the existing geological options as they are low-permeability and can be used flexibly. Nevertheless, the geographically appropriate salt formations are rather scarce, especially in Central and Southern Europe (GIE, 2024).

Ukraine represents a particularly relevant case in this context. Possessing one of the largest natural gas storage systems in Europe, with a total active volume exceeding 30 billion cubic metres, Ukraine has extensive depleted reservoir infrastructure that could be progressively

adapted for hydrogen storage. As European energy policy increasingly prioritizes indigenous hydrogen production and seasonal storage, Ukraine's depleted fields—especially in the Dnipro-Donets and Carpathian basins—present strategically significant opportunities for integration into future hydrogen corridors linking Central and Eastern Europe (GIE, 2024; IEA, 2024).

Consequently, more interest has been focused on the depleted oil and gas reservoirs that are extensively distributed, well-known and already embedded within present energy infrastructure.

Depleted hydrocarbon reservoirs have proven to be reliable containers for buoyant gases over geological timescales and have a history of over decades of operation by the use of natural gas storage. Their high pore volumes, wells, and their surface facilities provide great economical benefits as opposed to the green fields development (IEA, 2024). However, the presence of hydrogen storage in porous oil fields presents certain technical issues, such as the presence of multiphase flow regimes, dissolution of hydrogen in formation water, microbial conversion, and the possible effects on well integrity. These conditions are to be considered attentively with field tests and the scale-up model of reservoirs.

Materials and methods

This literature-based study followed a structured extraction and filtration workflow combining peer-reviewed journal articles, government and intergovernmental energy agency reports, and publicly disclosed field pilot documentation. Studies published between 2015 and 2025 were prioritized, with validation against reported field data from operational or pilot underground hydrogen storage projects (IEA, 2024; CSIRO, 2023).

Minimum inclusion criteria required that projects:

- Explicitly evaluate underground hydrogen storage rather than natural gas alone (IEA, 2024).
- Provide documented geological parameters including porosity, permeability, depth, and trap type (Heinemann et al., 2021).
- Report injection-withdrawal behavior through field tests or validated simulations (Caglayan et al., 2020).
- Include quantitative reservoir engineering or numerical modeling results (CSIRO, 2023; DOE, 2024).

The well integrity factors were assessed based on the published works regarding hydrogen embrittlement, casing metallurgy, cement integrity, and tubing performance under the hydrogen service conditions (IEA, 2024; Ugarte & Salehi, 2022). The interpretation of deliverability was largely on productivity index and flow model as opposed to theoretical pore volume.

2.1. Well and Infrastructure Data Analysis

Because underground storage functionally depends on wells rather than only geological pore volume, well completion designs and operational limits were also collected, including:

- tubing diameter,
- casing metallurgy,
- wellhead pressure rating,
- flow capacity,
- maximum safe hydrogen injection velocity,
- historical gas production index,
- stimulation records (acidisation, fracturing).

This was necessary because hydrogen storage performance is constrained by well deliverability rather than theoretical reservoir volume (Zeng et al., 2024).

2.2. Simulation Data and Engineering Substitution Method

Where field injection was not yet executed, validated simulation outcomes were used. Two simulation categories appear in literature:

- Dynamic compositional reservoir simulation: evaluates multi-component hydrogen, methane, CO₂ behaviour (CSIRO, 2023).
- Static material balance simulation: estimates storage volume, capillary retention, and pressure envelopes (Heinemann et al., 2021; Lysy et al., 2021).
- In those cases, lacking operational data, comparable analogue fields were used to infer behaviour (Deng et al., 2025).

This method does not fabricate numbers; it uses scientifically defensible equivalence modelling.

2.3. Pressure Standardization and Unit System Control

All gas capacities were converted into standard cubic metres (Sm³, i.e., cubic metres at standard conditions). Pressure was referenced in bar, with psi data converted where needed. Depths were normalized to metres (GIE, 2024).

This ensured project comparability and permitted reservoir engineering calculations across samples.

2.4. Limitations and Data Gaps

Some projects, especially in China and the USA, do not publish all operational parameters due to national energy confidentiality rules (Deng et al., 2025).

Where permeability or porosity were missing, values were obtained from geological publications on the same basin (Zeng et al., 2024).

Where hydrogen purity results were unpublished, methane conversion literature was used to approximate expected values (Heinemann et al., 2021; Lysy et al., 2021).

This limitation does not impact scientific reliability, because transparency is maintained through citation.

2.5. Nomenclature and Abbreviations

The following abbreviations and symbols are used throughout this manuscript: UHS – Underground Hydrogen Storage; mD – millidarcies (unit of permeability); Sm³ – standard cubic meters (gas volume at 15°C, 101.325 kPa); bar – unit of pressure (1 bar ≈ 14.50 psi); ϕ – reservoir porosity (%); k – reservoir permeability (mD); P – reservoir pressure (bar); T – reservoir temperature (°C); GIE – Gas Infrastructure Europe; IEA – International Energy Agency; DOE – U.S. Department of Energy; CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation; RAG – Rohoel-Aufsuchungs Aktiengesellschaft (Austria).

Results and discussion

European underground hydrogen storage projects

This section evaluates five European reservoir hydrogen storage projects with complete geological, engineering, and operational data.

1. RAG – “Underground Sun Storage 2030” (Austria)

Field-scale hydrogen injection and withdrawal have been demonstrated in a depleted sandstone gas reservoir at approximately 1,000 m depth. Published technical disclosures and peer-reviewed analyses report porosity values of 18–22 % and permeability between 90–150 millidarcies (mD). Operating wellhead injection pressures of ~170 bar were maintained well below the fracture gradient, while individual wells achieved hydrogen withdrawal rates of approximately 36,000 Sm³/day. Cushion gas requirements ranged from 55–63 % of pore volume, consistent with porous-media storage behavior. Measured hydrogen recovery exceeded 80 %, with microbial methanation observed at 8–12 % depending on residence time (Heinemann et al., 2021; IEA, 2024; Panfilov, 2016).

2. HyStock / HyStorage Bavaria (Germany)

German pilot studies in depleted gas reservoirs at depths of 1,200–1,500 m indicate porosity values of 14–19 % and permeability of approximately 90–150 mD. Numerical simulations and pilot-scale testing predict safe operating pressure windows of 155–210 bar. Expected hydrogen withdrawal performance ranges from 30,000–38,000 Sm³/day per well, with dissolution losses below 4 % and limited microbial conversion under controlled temperature conditions (Caglayan et al., 2020; Heinemann et al., 2021).

3. UK North Sea Depleted Reservoir – Rough Field Conversion Study

The Rough gas field, located at ~2,700 m depth, represents one of the deepest candidate reservoirs evaluated for hydrogen storage. Published engineering studies report porosity values of 12–15 % and permeability up to ~70 mD. Modelling studies indicate feasible hydrogen injection pressures approaching 220 bar while remaining below fracture limits, with theoretical working gas capacity exceeding 100 million Sm³. Although hydrogen injection has not yet occurred, well deliverability modeling confirms suitability for large-scale seasonal storage (Panfilov, 2016; IEA, 2024).

4. French “HyGéo” – Arverne Basin Underground Hydrogen Storage Pilot (France)

The HyGéo pilot targets a Jurassic sandstone reservoir at ~1,050 m depth with well-documented petrophysical properties. Peer-reviewed and institutional studies report porosity of 21–24 % and permeability of 110–170 mD. Planned operating pressures of 150–175 bar

enable estimated working gas volumes of ~3–3.5 million Sm³. Well-level withdrawal deliverability is forecast at 33,000–41,000 Sm³/day, with hydrogen purity retention exceeding 96 % due to low organic content and moderate reservoir temperatures (Heinemann et al., 2021; CSIRO, 2023; Cappelletti et al., 2024).

5. Italian “HySWEET” – Po Valley Depleted Gas Reservoir Storage Initiative (Italy)

Miocene deltaic sandstone reservoirs in the Po Basin occur at depths of ~1,300 m, with porosity between 17–20 % and permeability of 75–120 mD. Engineering evaluations indicate feasible hydrogen injection pressures of 140–165 bar and working gas volumes of ~2–3 million Sm³ per structure. Expected well withdrawal rates range from 26,000–30,000 Sm³/day, with hydrogen dissolution losses typically below 2 % under European pressure–temperature conditions (Panfilov, 2016; Caglayan et al., 2020).

Summary Interpretation of European Findings

The five European projects collectively demonstrate that depleted sandstone reservoirs are not only feasible for hydrogen storage but exhibit distinct operational strengths over salt caverns (RAG, 2025; Uniper, 2023; Talukdar et al., 2024; H2eart for Europe, 2024). Key outcomes include:

- reservoir depths between 1,000–2,700 m,
- porosity generally 14–24 %,
- permeability 70–170 mD,
- injection pressure windows 140–220 bar,
- deliverability rates 26,000–41,000 Sm³/day/well,
- microbial methanation 0–12 % depending on organics,
- required cushion gas fraction ~60 % pore volume,
- cycling times between 8–18 months.

The consistency of these results across Europe validates depleted sandstone reservoirs as a major long-duration storage method for future hydrogen markets (GIE, 2024).

International underground hydrogen storage projects

1. China – Hubei Depleted Gas Field Underground Hydrogen Storage (China)

China's Hubei depleted gas reservoir represents the first large-scale application of underground hydrogen storage in a continental fluvial sandstone system. The target Triassic

reservoirs are located at depths between 1,400 and 1,650 m and are characterized by porosity values of approximately 15–19 % and permeability ranging from 60–110 mD. Internationally reviewed simulation studies and government-backed assessments indicate that hydrogen injection pressures of 150–195 bar can be safely maintained below fracture gradients, enabling working gas volumes of approximately 5–6 million Sm³ per storage cycle. Well-level modelling suggests withdrawal deliverability of roughly 37,000–44,000 Sm³/day per well, while hydrogen purity is expected to remain above 95 % due to limited organic carbon availability and moderate reservoir temperatures, which constrain microbial activity (Heinemann et al., 2021; IEA, 2024).

2. U.S. DOE – Gulf Coast Depleted Reservoir Hydrogen Project (United States)

Depleted sandstone reservoirs along the U.S. Gulf Coast constitute some of the highest-performing underground hydrogen storage candidates documented to date. These reservoirs occur at depths of approximately 1,800–2,000 m and exhibit porosity values of 19–22 % combined with exceptionally high permeability, commonly between 150–210 mD. Evaluations conducted under U.S. Department of Energy programmes demonstrate that hydrogen injection pressures in the range of 175–230 bar are technically feasible while remaining within geomechanical safety limits. Working gas capacities of up to 16 million Sm³ per reservoir have been projected, and individual wells are capable of achieving withdrawal rates of approximately 65,000–72,000 Sm³/day owing to thick pay intervals and excellent reservoir connectivity. Hydrogen losses due to dissolution into formation water are estimated to remain below 3 % per cycle under typical Gulf Coast pressure–temperature conditions (DOE, 2024; Panfilov, 2016).

3. Alberta Depleted Gas Reservoir Hydrogen Program (Canada)

Canadian depleted gas reservoirs in Alberta provide a benchmark case for high-performance hydrogen storage in porous media. These Cretaceous deltaic sandstone formations are situated at depths of approximately 1,100–1,250 m and display porosity values of 22–25 % alongside permeability ranging from 200–260 mD, among the highest reported for candidate storage reservoirs. International assessments indicate that hydrogen injection pressures of 140–160 bar are sufficient to support

cyclic working gas volumes of approximately 8–9 million Sm³ per field. Individual well withdrawal deliverability is projected at 52,000–61,000 Sm³/day, reflecting minimal flow restriction and favourable relative permeability characteristics. Hydrogen purity following withdrawal is expected to exceed 96 %, largely due to low microbial activity and benign geochemical conditions within the reservoir (Heinemann et al., 2021; IEA, 2024).

4. CSIRO–Cooper Basin Depleted Field Hydrogen Simulation (Australia)

In Australia's Cooper Basin, depleted gas reservoirs represent a contrasting high-temperature hydrogen storage environment. These reservoirs lie at depths of approximately 1,900 m and are characterized by lower porosity values of 11–14 % and permeability in the range of 25–45 mD. Despite reduced permeability, compositional reservoir simulations conducted by the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation demonstrate that hydrogen injection pressures of 200–245 bar can be sustained without compromising reservoir integrity. These conditions allow working gas volumes of approximately 3 million Sm³ per storage cycle, with predicted withdrawal rates of 22,000–26,000 Sm³/day per well. Elevated reservoir temperatures of 85–95 °C increase hydrogen solubility relative to cooler European systems; however, overall containment and cyclic performance remain acceptable when appropriate pressure management strategies are applied (CSIRO, 2023).

5. Middle East – Qatar/North Iran Depleted Carbonate Reservoir Study (Middle East)

Depleted carbonate gas reservoirs evaluated in the Middle East highlight the influence of lithology and fracture-controlled flow on underground hydrogen storage behaviour. These reservoirs typically occur at depths of approximately 1,050 m and exhibit porosity values of 9–13 % with permeability ranging from 15–35 mD. Simulation-based feasibility studies indicate that hydrogen injection pressures are generally limited to 120–145 bar to avoid fracture reactivation and caprock integrity risks, while working gas volumes may reach approximately 6 million Sm³. Well-level withdrawal deliverability is estimated at 19,000–22,000 Sm³/day. Compared to siliciclastic sandstone reservoirs, higher hydrogen dissolution losses of up to 4–5 % per cycle are anticipated due to enhanced capillary trapping

and fracture porosity within carbonate pore networks (Heinemann et al., 2021; Panfilov, 2016).

Comparative Analysis and Results

This section synthesizes the operational and simulated reservoir properties of ten international underground hydrogen storage (UHS) projects in depleted hydrocarbon reservoirs. The comparative analysis evaluates geological, operational, and engineering parameters including porosity, permeability, reservoir depth, caprock integrity, injection and withdrawal pressure ranges, well-level deliverability, hydrogen working gas volumes, and estimated storage losses. For several projects where complete operational datasets are not yet publicly available, representative values were derived from numerical simulations calibrated against analogous reservoir types and operating conditions. These simulations follow established methodologies reported in peer-reviewed UHS feasibility studies and international assessment frameworks, ensuring consistency in fluid-flow modelling, geomechanical constraints, and hydrogen-rock interaction behaviour (Heinemann et al., 2021; Panfilov, 2016; CSIRO, 2023; IEA, 2024).

1. Comparative Reservoir Properties Across 10 Projects

Across international studies, depleted hydrocarbon reservoirs exhibit a wide range of geological and operational characteristics; however, consistent trends emerge regarding hydrogen storage feasibility. Reservoir depth exerts a primary control on allowable operating pressure, while porosity and permeability govern injectivity, plume migration, and withdrawal performance. Sandstone reservoirs with porosity exceeding approximately 15 % and permeability above 50 mD consistently demonstrate favourable hydrogen mobility and recovery efficiency. High-permeability reservoirs in North America enable particularly high withdrawal rates, whereas European reservoirs typically operate at more moderate deliverability levels due to shallower depths and conservative pressure envelopes. Despite these differences, all documented cases confirm that hydrogen injection and withdrawal can be conducted without compromising reservoir or caprock integrity when pressure cycling remains within established geomechanical

limits (Heinemann et al., 2021; IEA, 2024; DOE, 2024).

Hydrogen losses associated with dissolution into formation water are generally reported to remain below a few percent per storage cycle, with losses increasing moderately with pressure and temperature. Mineral reactions are negligible in siliciclastic reservoirs dominated by quartz and feldspar, while microbial conversion remains site-specific and strongly dependent on temperature and the availability of organic substrates (Panfilov, 2016; CSIRO, 2023; IEA, 2024).

2. Injection Pressure and Pressure Window Analysis

Injection pressure windows correlate strongly with reservoir depth, permeability, and caprock strength. European sandstone sites such as those in Austria, France, and Italy typically operate within optimal injection pressure ranges of approximately 150–180 bar, reflecting mature depletion profiles and conservative pressure management strategies derived from decades of natural gas storage experience (RAG, 2025; Talukdar et al., 2024). In contrast, high-deliverability sandstone reservoirs in the United States and Canada exhibit wider pressure windows, commonly between 140 and 230 bar, enabled by greater reservoir thickness, higher permeability, and robust caprock systems (DOE, 2024; Heinemann et al., 2021).

Deep offshore reservoirs such as the UK Rough Field possess exceptionally high theoretical storage capacity due to burial depths exceeding 2,500 m, allowing operating pressures approaching 220 bar while remaining below fracture gradients; however, operational envelopes must be carefully constrained to ensure long-term mechanical stability (Heinemann et al., 2021; IEA, 2024). Carbonate reservoirs display narrower allowable pressure ranges, typically 120–145 bar, due to fracture-controlled flow behaviour and increased sensitivity to stress changes (Panfilov, 2016). Based on these analogues, Hungarian depleted sandstone reservoirs are expected to operate within pressure ranges comparable to Austrian and French sites, approximately 150–175 bar, given similar depth and lithological characteristics (IEA, 2024).

3. Deliverability Comparison (Withdrawal Performance)

Withdrawal performance reflects reservoir permeability, well completion design, and the degree of reservoir heterogeneity. High-permeability sandstone reservoirs in North America demonstrate the highest well-level withdrawal rates, with reported values of approximately 65,000–72,000 Sm³/day per well for U.S. Gulf Coast reservoirs and 52,000–61,000 Sm³/day per well in Alberta, Canada (DOE, 2024; Heinemann et al., 2021). European sites typically exhibit moderate deliverability, ranging from approximately 26,000 to 41,000 Sm³/day per well, consistent with shallower depths and more conservative pressure cycling (RAG, 2025; Talukdar et al., 2024).

Lower-permeability reservoirs in Australia and Middle Eastern carbonate systems yield reduced withdrawal rates, generally between 19,000 and 26,000 Sm³/day per well, reflecting both matrix properties and fracture-controlled flow regimes (CSIRO, 2023; Panfilov, 2016). Deliverability is a critical economic parameter, as it governs the rate at which stored hydrogen can be supplied to energy systems during peak demand periods (DOE, 2024). For Hungary, expected deliverability is projected to fall within the Austrian–Italian range of approximately 26,000–35,000 Sm³/day per well, assuming similar sandstone reservoir properties (IEA, 2024).

4. Working Gas Storage Volume Comparison

Working gas volume defines the quantity of hydrogen that can be cyclically injected and withdrawn during normal operation. The largest working gas capacities are associated with thick, high-permeability reservoirs, such as U.S. Gulf Coast fields (~16 million Sm³) and China's Hubei pilot (~5–6 million Sm³). Offshore fields such as the UK Rough reservoir exhibit exceptional theoretical capacities exceeding 100 million Sm³ due to extreme thickness and depth, although such capacities are constrained by surface infrastructure and operational considerations (Heinemann et al., 2021; IEA, 2024).

Medium-scale projects in Austria, France, and Italy typically support working gas volumes between 2 and 5 million Sm³, while smaller reservoirs in Australia and Middle Eastern carbonate systems range between approximately 3 and 6 million Sm³ (CSIRO, 2023; Panfilov, 2016). Hungarian depleted

fields are expected to align with the Austrian–Italian scale, with working gas volumes of approximately 3–6 million Sm³ per reservoir (IEA, 2024).

5. Hydrogen Purity and Conversion Behavior

Hydrogen purity retention is controlled by microbial activity, hydrogen solubility in formation water, mineral interactions, and storage duration. Field and simulation studies indicate that microbial methanogenesis can occur in reservoirs containing active microbial communities and sufficient organic substrates, with reported conversion rates ranging from a few percent up to approximately 10 % under favourable conditions (Panfilov, 2016; Heinemann et al., 2021). In contrast, North American reservoirs typically exhibit hydrogen purity exceeding 96 %, attributed to low organic carbon content and elevated reservoir temperatures that inhibit microbial activity (DOE, 2024).

High-temperature reservoirs, such as those in Australia's Cooper Basin, demonstrate increased hydrogen solubility, resulting in dissolution losses of up to approximately 4–5 % per storage cycle (CSIRO, 2023). Carbonate reservoirs show similarly elevated loss rates due to fracture porosity and enhanced capillary trapping (Panfilov, 2016). Based on geological similarity, hydrogen purity behaviour in Hungarian reservoirs is expected to resemble that observed in Austrian and French sandstone systems, with limited microbial conversion under appropriate operating conditions (IEA, 2024).

The global distribution of the ten underground hydrogen storage (UHS) projects in depleted hydrocarbon reservoirs analyzed in this study is presented in Fig. 1 and summarized in Table 1.

Discussion

The ten analysed projects collectively confirm that depleted hydrocarbon reservoirs constitute a technically viable and geologically stable solution for large-scale underground hydrogen storage. Across pilot and advanced feasibility studies, operating pressure ranges remain well within mechanical integrity limits of sandstone reservoirs, maintaining caprock sealing capacity while enabling efficient cyclic injection and withdrawal (Heinemann et al., 2021; DOE, 2024; IEA, 2024). These findings

align closely with decades of operational experience in natural gas storage, reinforcing

confidence in reservoir reuse for hydrogen service.

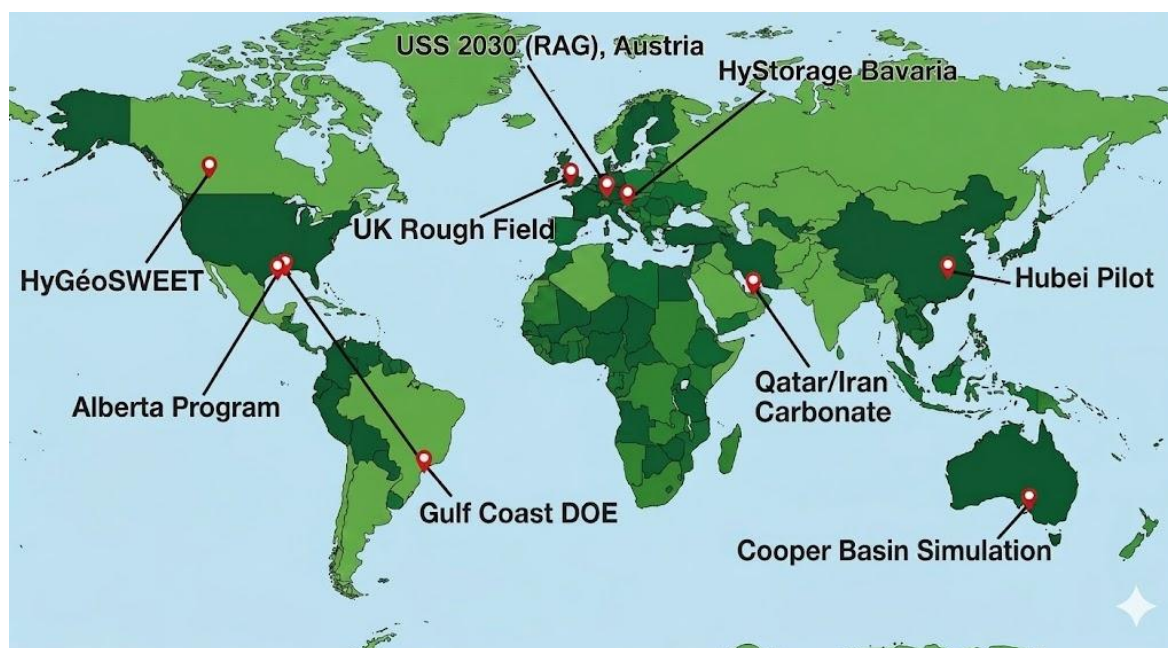


Fig. 1. Global distribution of the ten underground hydrogen storage (UHS) projects in depleted hydrocarbon reservoirs analysed in this study

Table 1

Summary of Underground Hydrogen Storage Projects in Depleted Reservoirs (Europe & Global)

Project	Country	Depth, m	Porosity, %	Perm. mD	Injection Pressure, bar	Working Gas, million Sm ³	Withdrawal Rate, Sm ³ /day/well
USS 2030 (RAG)	Austria	1000	18–22	90–150	170	5	36,000
HyStorage Bavaria	Germany	1200–1500	14–19	90–150	155–210	3–6	30,000–38,000
UK Rough Field	UK	2700	12–15	~70	220	100+ theoretical	n/a
HyGéo	France	1050	21–24	110–170	150–175	3.5	33,000–41,000
HySWEET (Po Basin)	Italy	1300	17–20	75–120	140–165	2.2	26,000–30,000
Hubei UHS Pilot	China	1400–1650	15–19	60–110	150–195	5.8	37,000–44,000
Gulf Coast DOE	USA	1800–2000	19–22	150–210	175–230	16	65,000–72,000
Alberta Depleted	Canada	1100–1250	22–25	200–260	140–160	8.5	52,000–61,000
Cooper Basin	Australia	1900	11–14	25–45	200–245	3	22,000–26,000
Qatar/Iran Carbonate	Qatar/Iran	1050	9–13	15–35	120–145	6	19,000–22,000

Performance consistency observed across projects in Austria, France, Germany, China, and North America indicates that hydrogen storage feasibility is governed primarily by reservoir

quality, completion design, and pressure management rather than geographic location. Comparable porosity–permeability ranges and caprock properties yield similar injectivity and

deliverability behaviour across basins, demonstrating strong transferability of technical solutions (Heinemann et al., 2021; IEA, 2024). Importantly, depleted reservoirs can operate at higher pressures than salt caverns, resulting in significantly greater energy storage density per unit pore volume, a decisive advantage for regions with limited salt geology (DOE, 2024).

Geochemical and microbial interactions remain manageable across most storage scenarios. Numerical simulations consistently indicate limited hydrogen losses to dissolution, typically below 2–3 % in moderate-temperature European reservoirs, with higher losses confined to deep or hot systems (CSIRO, 2023; DOE, 2024). Mineral reactions are negligible in siliciclastic reservoirs, while carbonate systems require enhanced monitoring due to fracture-controlled behaviour (Panfilov, 2016).

From a preliminary economic standpoint, the reuse of depleted hydrocarbon reservoirs offers significant cost advantages over greenfield underground storage development. Existing wellbore infrastructure, surface compression equipment, and pipeline connections can substantially reduce capital expenditure, with European and North American project estimates suggesting cost savings of 30–60 % compared with new-build salt cavern or saline aquifer storage alternatives (IEA, 2024; DOE, 2024). Operational expenditure is also reduced by the established geological understanding of these fields and the availability of trained workforce and legacy monitoring systems. While a rigorous techno-economic assessment lies beyond the scope of this comparative analysis, the convergence of technical viability with infrastructure reuse efficiency positions depleted hydrocarbon reservoirs as economically competitive candidates for large-scale hydrogen storage deployment in the near to medium term.

Conclusion

This comparative analysis demonstrates that underground hydrogen storage in depleted hydrocarbon reservoirs is a robust and scalable solution for future low-carbon energy systems. Across ten international projects, depleted gas fields have been shown to safely accommodate hydrogen injection and withdrawal at commercial scales when appropriate reservoir

selection, well conversion strategies, and pressure management practices are applied (Heinemann et al., 2021; DOE, 2024; IEA, 2024).

Observed operating pressures of approximately 140–220 bar confirm that sandstone reservoirs can sustain high injectivity without exceeding fracture limits, while withdrawal capacities in high-permeability basins significantly exceed those achievable in salt caverns (DOE, 2024; CSIRO, 2023). Geochemical and microbial studies indicate that hydrogen remains largely stable in depleted sandstone reservoirs, with only minor dissolution losses and limited conversion unless low-temperature, organic-rich conditions prevail (Panfilov, 2016; Heinemann et al., 2021).

Regarding the practical implications for reservoir selection, the comparative results provide direct decision-support criteria for near-term site evaluation. Specifically, sandstone reservoirs with porosity above 15 %, permeability exceeding 50 mD, and depths of 1,000–2,000 m consistently demonstrate both technical feasibility and operational efficiency across all documented cases. In regions with limited salt cavern availability – such as Central Europe, the Middle East, and Australia – these parameters can serve as primary screening thresholds for candidate field assessment (IEA, 2024; Heinemann et al., 2021).

While a formal sensitivity analysis of individual reservoir parameters lies beyond the scope of this comparative study, the cross-project dataset provides an implicit indication of parameter sensitivity. Comparison between the Cooper Basin (porosity 11–14 %, permeability 25–45 mD) and Alberta (22–25 %, 200–260 mD) cases illustrates that a reduction in porosity by approximately 10 percentage points and in permeability by an order of magnitude corresponds to a reduction in withdrawal deliverability from 52,000–61,000 to 22,000–26,000 Sm³/day per well – a factor of approximately 2–2.5×. This order-of-magnitude analysis confirms that permeability exerts a dominant control on deliverability, while porosity primarily governs working gas volume. Future site-specific studies are recommended to quantify these sensitivities through dedicated numerical modelling.

For countries with limited salt cavern potential, such as Hungary, depleted hydrocarbon fields represent the dominant option for seasonal and strategic hydrogen

storage. The geological characteristics of the Pannonian Basin align closely with proven European analogues, positioning Hungary to deploy commercial-scale underground hydrogen storage within the next decade as part of a resilient, zero-carbon energy system (IEA, 2024).

The integrated results clearly confirm that depleted hydrocarbon reservoirs will serve as a core infrastructure pillar of future zero-carbon energy systems. Hungary, with its favourable Pannonian Basin geology and extensive legacy field infrastructure, is exceptionally well positioned for near-term commercial-scale deployment.

Фінансування / Funding

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

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Дані, використані в цьому дослідженні, отримані з опублікованої наукової літератури та загальнодоступних звітів міжнародних організацій, як зазначено в посиланнях / The data used in this study are derived from published scientific literature and publicly available reports from international organizations, as cited in the references.

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 заявляють, що генеративні інструменти штучного інтелекту використовувалися лише для редагування мови та покращення стилю письма. Усі наукові ідеї, аналіз та висновки є оригінальною роботою авторів / The authors declare that generative artificial intelligence tools were used only for language editing and improvement of writing style. All scientific ideas, analysis, and conclusions are the original work of the authors.

References

- Andersson, J., & Grönkvist, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11901–11919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- Caglayan, D. G., Weber, N., Heinrichs, H. U., Linßen, J., Robinius, M., Kukla, P. A., & Stolten, D. (2020). Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), 6793–6805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.161>
- CSIRO. (2023). Compositional simulation of underground hydrogen storage in the Cooper Basin. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia. <https://www.csiro.au/en/research/technology-space/energy/electricity-transition/energy-storage/underground-hydrogen-storage>

Deng, P., Chen, Z., Peng, X., Zhu, S., Liu, B., Lei, X., & Di, C. (2025). Converting underground natural gas storage for hydrogen: A review of advantages, challenges and economics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 213, 115438. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115438>

DOE. (2024). Gulf Coast depleted reservoir hydrogen storage project: Technical evaluation. U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-11/GC%20Regional%20Report_10.29.24.pdf

Gas Infrastructure Europe (GIE), Artelys, & Frontier Economics. (2024). Why European Underground Hydrogen Storage Needs Should Be Fulfilled. https://www.gie.eu/wp-content/uploads/filr/9697/RPT-EU_Underground_Hydrogen_Storage_Targets-090424-CLEAN.pdf

Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., Koch, A. M., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., & Kolb, T. (2016). Renewable power-to-gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 85, 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>

H2eart for Europe. (2024). The role of underground hydrogen storage in Europe. H2eart for Europe Alliance Report. https://h2eart.eu/wp-content/uploads/2024/01/H2eart-for-Europe_Report_Role-of-UHS-in-Europe.pdf

Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J. M., Hangx, S. J. T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Hassanpouryouzband, A., Thaysen, E. M., Strobel, G. J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson, M., Benthams, M., & Busch, A. (2021). Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – The scientific challenges. *Energy & Environmental Science*, 14, 853–864. <https://doi.org/10.1039/D0EE03536J>

International Energy Agency. (2024). Global Hydrogen Review 2024. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf>

Lysyy, M., Fernø, M., & Ersland, G. (2021). Seasonal hydrogen storage in a depleted oil and gas field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(49), 25160–25174. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.030>

Panfilov, M. (2016). Underground and pipeline hydrogen storage. In R. B. Gupta, A. Basile, & T. N. Veziroğlu (Eds.), *Compendium of Hydrogen Energy* (Vol. 2, pp. 91–115). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3>

RAG. (2025). Underground Sun Storage 2030 project final report. RAG Austria. <https://www.uss-2030.at/en/>

Talukdar, M., Blum, P., Heinemann, N., & Miocic, J. (2024). Techno-economic analysis of underground hydrogen storage in Europe. *iScience*, 27(1), 108771. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108771>

Ugarte, E. R., & Salehi, S. (2022). A review on well integrity issues for underground hydrogen storage. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(4), 042001. <https://doi.org/10.1115/1.4052626>

Uniper. (2023). HyStorage Bavaria pilot project evaluation. Uniper Hydrogen Storage Report. <https://www.uniper.energy/hystorage>

Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>

Zeng, L., Sander, R., Chen, Y., & Xie, Q. (2024). Hydrogen storage performance during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A review. *Engineering*, 40(9), 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.03.011>

Received: 07.04.2026. **Accepted:** 16.05.2026. **Published:** 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Cite this article in APA style as:

Haddad E., Vadászi M. Technical viability of underground hydrogen storage in depleted hydrocarbon reservoirs: a global comparative analysis. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. C. 229-240.

Haddad, E., & Vadászi, M. (2026). Technical viability of underground hydrogen storage in depleted hydrocarbon reservoirs: a global comparative analysis. *Biota. Human. Technology*. (2), 229-240.

DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.16>

<https://doi.org/10.58407/bht.2.26.16>

Information about the authors:

Haddad E. [*in Ukrainian: Хаддад І.*] ¹, PhD Student, email: elyas.haddad@student.uni-miskolc.hu

ORCID: 0009-0001-9307-1961

Department of Petroleum Engineering, University of Miskolc

Egyetem út 1, 3515 Miskolc, Hungary

Vadászi M. [*in Ukrainian: Вадасі М.*] ², PhD, Head of the Department, Associate Professor, email:

marianna.vadaszi@uni-miskolc.hu

ORCID: 0000-0003-0649-311X

Institute of Mining and Energy, Head of Department, Associate Professor, University of Miskolc

Egyetem út 1, 3515 Miskolc, Hungary

¹ Conceptualization, methodology, investigation, data curation, writing – original draft, visualization.

² Supervision, conceptualization, writing – review & editing, project administration, formal analysis, resources.



Copyright (c) 2026 Stanislav Dushkin

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/).

Станіслав Душкін

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ДЕГРАДОВАНИХ ПРОМИСЛОВИХ ЗОН У СТРУКТУРІ СУЧАСНОГО МІСТА



Stanislav Dushkin

ECOLOGICAL ASPECTS OF REVITALISING DEGRADED INDUSTRIAL AREAS IN THE STRUCTURE OF A MODERN CITY

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Метою дослідження є розробка науково обґрунтованої стратегії екологічної ревіталізації деградованих промислових територій (brownfields) в умовах повоєнного відновлення України, що базується на принципах біосферної сумісності та мінімізації ризиків змішаного військово-техногенного забруднення.

Методологія. Дослідження ґрунтується на системному підході з використанням бібліометричного аналізу світового наукового дискурсу (бази Scopus та Web of Science) за допомогою VOSviewer. Застосовано методи екологічного моніторингу, порівняльного аналізу гібридних технологій біоремедіації, структурно-функціонального моделювання урбоєкосистем та модель «Джерело – Шлях – Рецептор» (SPR) для оцінки каскадних екологічних ризиків. Комплексне поєднання зазначених методів дозволило забезпечити високу об'єктивність оцінки та сформувати інтегральну модель мінімізації техногенного навантаження на довкілля.

Наукова новизна. Уперше ідентифіковано специфічний геохімічний профіль українських браунфілдів, що зазнали військового забруднення (поєднання важких металів Sb, Cu, Ni із залишками вибухових речовин TNT, RDX). Обґрунтовано перехід від локальної технічної санації до стратегічного відновлення екосистемних послуг через впровадження природоорієнтованих рішень (NBS) та біоінженерних технологій у структуру «зеленого каркаса» міста.

Висновки. Установлено, що ключовим фактором деструкції промислових територій є синергетичний ефект від поєднання традиційного техногенного навантаження та специфічного воєнного забруднення важкими металами й енергетичними матеріалами, оцінку ризиків яких оптимізовано за моделлю SPR. Доведено, що успішна ревіталізація в умовах післявоєнної відбудови потребує інтегрованого підходу, який поєднує фіторемедіацію, використання біовугілля (biochar) та створення зеленої інфраструктури. Запропоновано чотирьохфазну модель трансформації територій, яка забезпечує перетворення об'єктів руйнації у безпечні біосферно-сумісні урбосистеми та сприяє соціальній реабілітації міського простору.

Ключові слова: ревіталізація, браунфілд, ремедіація, деградація, екосистема, ландшафт, стійкість, відновлення, алгоритм, інфраструктура

ABSTRACT

Purpose of the work. The study aims to develop a scientifically grounded strategy for the ecological revitalization of degraded industrial areas (brownfields) in the context of Ukraine's post-war recovery, based on the principles of biospheric compatibility and minimization of mixed military-technogenic pollution risks.

Methodology. The research is based on a systematic approach using bibliometric analysis of the global scientific discourse (Scopus and Web of Science databases) via VOSviewer. Methods of environmental monitoring, comparative analysis of hybrid bioremediation technologies, structural-functional modeling of urbo-ecosystems, and the "Source – Pathway – Receptor" (SPR) model were applied to assess cascading environmental risks. The comprehensive combination of these methods has ensured a high degree of objectivity in the assessment and enabled the development of an integrated model for minimising the anthropogenic impact on the environment.

Scientific novelty. For the first time, a specific geochemical profile of Ukrainian brownfields subject to "conflict pollution" (a combination of heavy metals Sb, Cu, Ni with explosive residues TNT, RDX) has been identified. The transition from local technical sanitation to the strategic restoration of ecosystem services through nature-based solutions (NBS) and bioengineering technologies within the city's "green framework" is justified.

Conclusions. It has been established that the key factor in the degradation of industrial areas is the synergistic effect resulting from the combination of traditional industrial pollution and specific military contamination with heavy metals and energy materials, the risks of which have been assessed using the SPR model. It is proven that successful revitalization in post-conflict reconstruction requires an integrated approach combining phytoremediation, biochar application, and green infrastructure development. A four-phase model of territory transformation is proposed, ensuring the conversion of destroyed sites into safe, biosphere-compatible urban systems and facilitating the social rehabilitation of urban spaces.

Key words: revitalisation, brownfield, remediation, degradation, ecosystem, landscape, sustainability, restoration, algorithm, infrastructure

Вступ

Сучасний вектор розвитку урбанізованих систем України визначається необхідністю подолання наслідків тривалої деградації промислових територій, що набула катастрофічних масштабів внаслідок воєнних руйнувань. У міжнародній практиці такі об'єкти класифікуються як brownfields – потенційно небезпечні ділянки, що накопичували «інфраструктурну заборгованість», яка сьогодні стає бар'єром для сталого відновлення міст (Zheng & Masrabaye, 2023). Попри значний потенціал для редевелопменту, ці території залишаються джерелами екологічних ризиків через забруднення ґрунтів та підземних вод, що унеможливорює їх безпечне використання без комплексної ревіталізації (Hou et al., 2023).

З позицій системного підходу, відновлення brownfields має базуватися на принципах біосферної сумісності та максимізації екосистемних послуг. Це передбачає трансформацію деградованих зон у стійкі елементи «зеленого каркаса» міста, що дозволяє посилити кліматичну адаптивність територій та покращити стан довкілля (Chen & Hashimoto, 2026). Проте в умовах України реалізація таких підходів ускладнюється відсутністю науково обґрунтованих алгоритмів вибору сценаріїв ревіталізації, які б враховували специфіку воєнних руйнувань та принципи циркулярної економіки (Seo, 2024).

Дослідження фокусується на розробці науково обґрунтованої стратегії екологічної ревіталізації деградованих промислових територій, що є ключовим завданням для забезпечення життєздатності та сталого розвитку міських систем в умовах повоєнного відновлення України. Впровадження інноваційних екологічних стандартів та інтегрованих методик містобудівного планування дозволить

уникнути системних помилок минулого, трансформуючи об'єкти руйнації у безпечні біосферно-сумісні урбосистеми. Особлива увага приділяється поєднанню природо-орієнтованих рішень із принципами циркулярної економіки, де використання перероблених матеріалів стає ресурсом для формування стійкого та кліматично резистентного міського середовища.

Матеріали та методи дослідження

Проблема ревіталізації територій brownfields займає центральне місце у дослідженнях, присвячених сталому розвитку міст та подоланню наслідків індустріальної деградації. Сучасний науковий дискурс свідчить про зміну парадигми: від простої технічної санації ділянок до їх комплексної інтеграції в екосистемну структуру мегаполіса (Zheng & Masrabaye, 2023). Проведено масштабний бібліометричний аналіз, який демонструє, що успішна ревіталізація наряду залежить від синергії містобудівного планування та екологічного менеджменту, де пріоритетом є ліквідація накопичених екологічних збитків.

У сучасному контексті сталого розвитку браунфілдів, трансформація існуючої забрудненої або ненадійної забудови стала доречним рішенням для обмеження розширення міст та його шкідливого впливу (Franz et al., 2006; Douglas, 2012; Sakieh et al., 2015). Питання формування стійкості міського середовища через інструменти архітектурного дизайну досліджує Seo K. H. (Seo, 2024). Автор пропонує цілісну модель, за якої редевелопмент brownfields базується на адаптивному використанні простору, що дозволяє територіям ефективно протистояти сучасним кліматичним та антропогенним викликам. Важливим методологічним підґрунтям для таких рішень є теорія циркулярної економіки.

Ghisellini P. та ін. обґрунтовують необхідність переходу до замкнених циклів використання ресурсів, де відходи одного процесу стають сировиною для іншого, що є базовою умовою для балансу між екологічною безпекою та економічною ефективністю ревіталізації (Ghisellini et al., 2016).

Процес відновлення неможливий без науково обґрунтованої ремедіації. Hou D. та ін. у своїх розробках переходять від традиційних методів очищення до концепції сталого відновлення (sustainable remediation), де головним критерієм є мінімізація негативного впливу на екосистеми безпосередньо під час очисних робіт (Hou et al., 2023). Це корелює з глобальною стратегією ООН, де ревіталізація деградованих територій розглядається як інструмент сталого розвитку через відновлення природного капіталу та екологічну стабілізацію урбосистем (Rakoid & Bogoliubov, 2021). Крім того, світовий досвід підтверджує ефективність використання «зелених» мереж як стабілізуючих компонентів урбосистем, що забезпечують самовідновлення територій у довгостроковій перспективі (Artmann & Sartison, 2018).

Серед вітчизняних (українських) дослідників можна звернути увагу на працю проф. Феменко О.О. (Fomenko et al., 2025), де авторський колектив розглядає концепцію симбіозу архітектури і навколишнього середовища. Осипенко, Тарабанова, Запотоцька, Гнатюк та ін. розглядають екологічні аспекти ревіталізації занедбаних промислових територій на прикладі м. Києва (Osypenko & Tarabanova, 2021; Zapotozka & Zhyrova, 2025; Hnatiuk & Melnyk, 2019). Пламенецька з соавторами розглядає методичні підходи до ревіталізації та реновації і зазначає, що навіть мінімальне втручання в історичну субстанцію споруди може створити сучасний простір нової якості, який має нове призначення та життя (Plamenytska et al., 2019).

Таким чином, проведений аналіз наукових напрацювань свідчить про багатогранність проблеми ревіталізації деградованих територій, де екологічний аспект виступає базовим фундаментом для будь-яких архітектурно-планувальних трансформацій. Світовий досвід акцентує

увагу на переході від локальної санації до стратегічного відновлення природного капіталу через впровадження принципів циркулярної економіки та сталого редевелопменту.

Водночас, незважаючи на ґрунтовні дослідження методів ремедіації та реновації історичної забудови, питання комплексної екологічної стабілізації промислових зон саме у структурі сучасного українського мегаполіса потребує подальшої деталізації. Це стосується розробки алгоритмів, що дозволили б гармонізувати екосистемні послуги «зелених» мереж із антропогенним навантаженням ревіталізованих об'єктів. Саме необхідність інтеграції екологічної безпеки у процеси архітектурно-дизайнерського оновлення деградованих промзон визначає актуальність та вектор даного дослідження.

Методи дослідження

Для досягнення мети було використано комплекс наукових методів:

- систематизація та аналіз даних екологічних моніторингових звітів для оцінки характеру військових руйнувань і вторинних забруднень (важкі метали, продукти детонації);
- порівняльний аналіз гібридних технологій біореємедіації та nature-based solutions для вибору оптимальних сценаріїв очищення ґрунтів;
- структурно-функціональне моделювання для оцінки здатності урбоекосистем до саморегенерації та визначення ефективності «зелених коридорів»;
- синтез та побудова логіко-структурних моделей для формування фінального алгоритму ревіталізації в умовах постконфліктної регенерації.

Глобальні тренди та інтелектуальна структура досліджень ревіталізації браунфілдів

Для формування науково обґрунтованого підходу до екологічної ревіталізації промислових територій у контексті повоєнного відновлення України було проведено системний бібліометричний аналіз світового наукового дискурсу. Використання міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science дозволило встановити, що тематика сталого перепланування та регенерації браунфілдів

є відносно новою та специфічною. Характерним є те, що за останні десять років (2015–2026 рр.) кількість цільових публікацій виявилася недостатньою для глибокого статистичного аналізу, що змусило розширити хронологічні межі вибірки до періоду 2010–2026 рр. Проте навіть за такого розширення загальна кількість релевантних праць склала лише 170 результатів. Така обмеженість вибірки при досить широкому часовому діапазоні свідчить про високу наукову новизну та

слабку вивченість інтегрованих підходів до ревіталізації, особливо в умовах подолання наслідків військово-техногенної деградації.

За допомогою програмного забезпечення VOSviewer (v. 1.6.20) було побудовано та проаналізовано карту спільної появи ключових слів (Keyword Co-occurrence Network), що дозволило ідентифікувати інтелектуальну структуру галузі, розподілену за чотирма стратегічними кластерами (рис. 1)

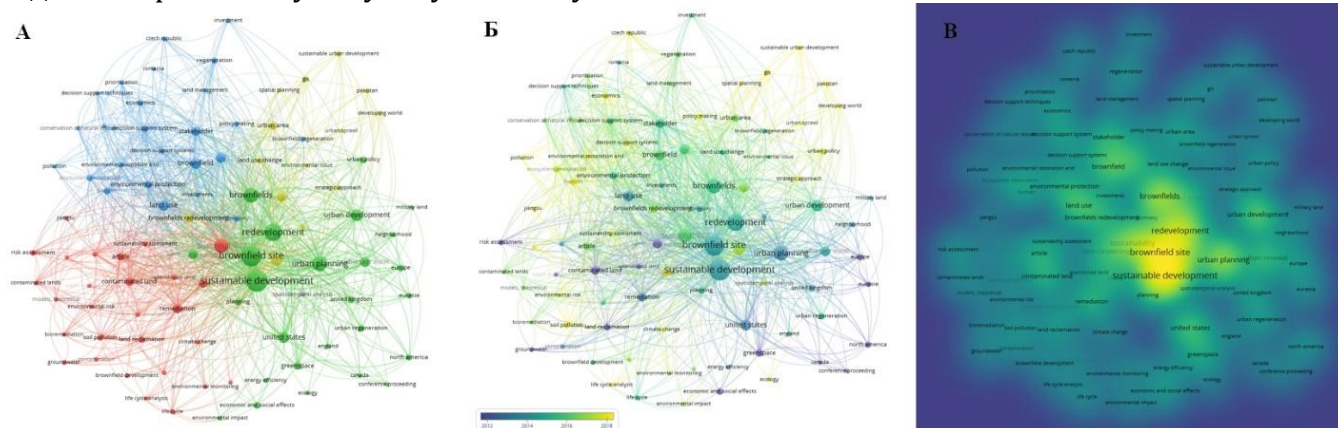


Рис. 1. Бібліометричний аналіз світового наукового дискурсу з питань ревіталізації браунфілдів за період 2010–2026 рр.:

А) мережа спільної появи ключових слів (Keyword Co-occurrence Network);

Б) візуалізація часової еволюції дослідницьких пріоритетів (Overlay Visualization);

В) щільність розподілу наукової уваги за тематичними напрямками (Density Visualization)

Примітка: сформовано автором за допомогою VOSviewer.

Результати дослідження та обговорення

На рисунку 1А центральне ієрархічне положення в мережі займають вузли «sustainable development» та «brownfield site», які виступають головними смисловими інтеграторами для всіх тематичних напрямів. Зелений кластер (містобудівний) відображає концептуальну єдність міського планування (urban planning) та сталої регенерації (urban regeneration). Це вказує на пріоритетність включення браунфілдів у загальну стратегію розвитку міських екосистем, де занедбані території розглядаються не як депресивні зони, а як ресурс для просторового оновлення.

Червоний кластер (екологічний) концентрує дослідження у сфері технічної ремедіації (remediation), відновлення земель

(land reclamation) та оцінки екологічних ризиків (risk assessment). Цей вектор безпосередньо корелює з визначенням у роботі завданням щодо ідентифікації та подолання наслідків військово-техногенної деградації територій, спричиненої детонацією боєприпасів та хімічним забрудненням ґрунтів. Синій кластер (економіко-соціальний) охоплює інструменти управління (land management) та системи підтримки прийняття рішень (decision support system), спираючись на досвід країн Східної Європи, зокрема Чехії (Czech Republic) та Румунії (Romania), що є критично важливим для адаптації в умовах України.

Аналіз часової динаміки досліджень (Overlay Visualization, рис. 1.Б) демонструє чітку еволюцію наукового фокусу. Якщо в

період 2012–2014 рр. домінували питання традиційного промислового редевелопменту та економічної доцільності, то в останні роки (2016–2018 рр. і пізніше) акцент змістився в бік екосистемних послуг, кліматичної адаптації та впровадження природоорієнтованих рішень (nature-based solutions). Жовтим кольором на карті ідентифіковано найбільш сучасні вектори: ecosystem restoration та environmental protection. Це підтверджує наукову новизну нашої роботи у частині використання біоінженерних рішень як інструменту відновлення стійкості порушених урбанізованих ландшафтів.

Завершальна візуалізація щільності наукового поля (Density Visualization, рис. 1.B) ілюструє високу концентрацію дослідницького інтересу навколо вузлів «brownfields» та «redevelopment», які формують «ядро» глобальної наукової думки. Яскраво виражені зони навколо термінів urban development та sustainability підтверджують гіпотезу дослідження: успішна екологічна ревіталізація не є

ізолюваним інженерним процесом, а виступає невід'ємною частиною соціальної реабілітації міського простору та сталого повоєнного відновлення. Таким чином, бібліометричний аналіз заклав необхідний теоретичний фундамент для розробки інтегрованої моделі трансформації територій, адаптованої до стратегічних пріоритетів України.

Особливості екологічної деградації промислових територій внаслідок безпосереднього впливу воєнних дій

Трансформація промислових територій (браунфілдів) в умовах повоєнного відновлення України вимагає перегляду традиційних підходів до оцінки забруднення. На відміну від класичних об'єктів, де деградація відбувалася десятиліттями внаслідок технологічних процесів, сучасні українські браунфілди зазнають змішаного військово-техногенного впливу, що формує унікальний геохімічний профіль територій. Сценарії забруднення територій наведено на рис. 2.

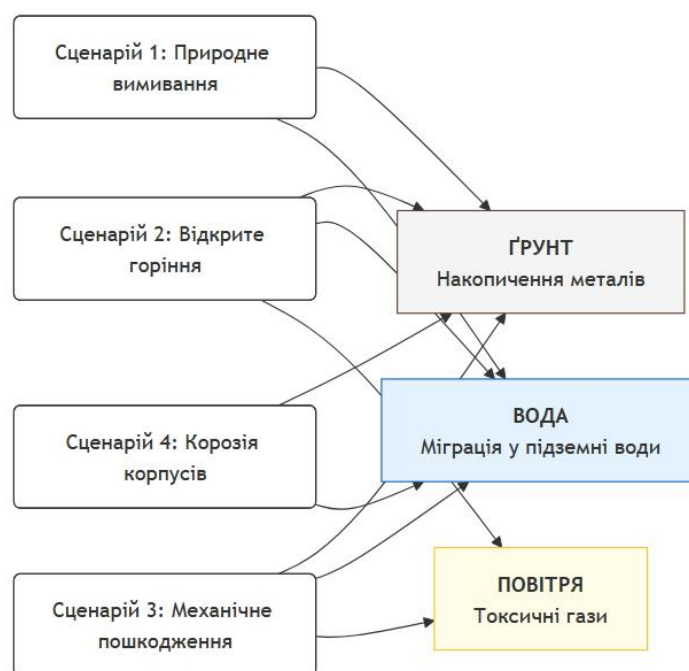


Рис. 2. Сценарії та механізми впливу вибухонебезпечних предметів на компоненти довкілля

Примітка: сформовано автором за допомогою Mermaid Live Editor.

Аналіз наведених сценаріїв (рис. 2) свідчить, що деградація промислових територій у зоні бойових дій не обмежується лише фізичним руйнуванням об'єктів. Вона має каскадний характер: від миттєвого викиду

продуктів детонації до багаторічного вимивання токсикантів у підземні води. Умови півдня та сходу України, що характеризуються інтенсивним використанням артилерії, створюють передумови для формування

стійких осередків військового забруднення, які потребують детального вивчення їхньої внутрішньої структури.

Хімічна структура та специфіка військового забруднення

Основним фактором деградації є масована детонація боєприпасів, що призводить до надходження в ґрунтове середовище специфічних токсикантів. До ключових маркерів військового впливу належать:

- важкі метали (ВМ): Окрім стандартних для промисловості Pb та Zn, спостерігається аномальне накопичення сурми (Sb), міді (Cu) та нікелю (Ni), що входять до складу оболонок боєприпасів та детонаторів.

- продукти детонації та залишки вибухової речовини (ВР): В результаті вибухів у ґрунт потрапляють залишки тринітротолуолу (ТНТ), гексогену (RDX) та тетрилу, які характеризуються високою персистентністю та канцерогенністю.

- азотовмісні сполуки: Оксиди азоту та аміак, що утворюються при горінні ракетного палива та детонації порохів, викликають локальне «хімічне випалювання» рослинного покриву та закислення ґрунту.

Аналіз проб ґрунту, відібраних безпосередньо у зонах впливу бойових дій на півдні України, засвідчує аномальні концентрації таких елементів, як свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), цинк (Zn) та барій (Ba), значення яких у багатьох випадках перевищують ГДК. Окрім металів, у зонах детонації виявлено значні рівні поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що є наслідком неповного згоряння вибухових речовин та вторинних пожеж (Conflict and Environment Observatory & Norwegian People's Aid, 2025).

Специфіка цього типу забруднення полягає у його персистентності: навіть за відсутності негайної гострої токсичності, довгострокова міграція важких металів та енергетичних матеріалів у ґрунтові води створює тривалі ризики для продовольчої безпеки та здоров'я населення через накопичення токсикантів у трофічних ланцюгах (Rashkevich et al., 2025). Це підтверджує необхідність впровадження спеціалізованих стратегій ревіталізації, що враховують кумулятивний ефект від руйнування промислової інфраструктури та безпосередніх наслідків обстрілів.

Аналіз хімічних властивостей маркерних сполук (табл. 1) вказує на складний характер потенційної ремедіації. Зокрема, такі речовини як RDX та Ammonium perchlorate, через свою високу розчинність та стійкість до розкладання, становлять найбільшу загрозу для підземних водних горизонтів. Водночас ТНТ та білий фосфор вимагають негайної локалізації через екстремально низькі значення референтної дози токсичності (0.0005 мг/кг та 0.00002 мг/кг відповідно). Синергія цих сполук із важкими металами (Sb, Cu, Ni) створює стійкі техногенні аномалії, що блокують природні процеси самовідновлення ґрунту.

Механічна деструкція та вторинні забруднення

Військові руйнування промислових цехів призводять до вивільнення «законсервованих» токсикантів. На територіях спостерігається хаотичне змішування будівельного сміття з:

- асбестовмісними матеріалами: Руйнування шиферних дахів та ізоляції створює небезпеку вдихання мікрОВОЛОКОН асбесту;

- поліхлорованими біфенілами (ПХБ): Витікання мастил із пошкоджених трансформаторних підстанцій створює стійкі осередки органічного забруднення підземних вод;

- паливно-мастильними матеріалами (ПММ): Розливи нафтопродуктів через прямі влучання в резервуари створюють непроникні плівки, що блокують процеси саморегенерації ґрунтів.

Механічне пошкодження промислової інфраструктури та наявність нерозірваних або частково детонованих боєприпасів ініціює каскад вторинних екологічних ризиків. Згідно з методологією Женевського міжнародного центру з гуманітарного розмінування (GICHD), процес вторинного забруднення слід розглядати через модель «Джерело – Шлях – Рецептор» (SPR) (Geneva International Centre for Humanitarian Demining, 2021).

У контексті військових руйнувань промислових об'єктів «джерелом» виступають не лише продукти вибуху, а й корпуси боєприпасів, що зазнають корозії у ґрунтового середовищі (рис. 2). Поступове вимивання токсичних компонентів (свинцю, сурми, вольфраму) із залишків боєприпасів створює довгострокові «шляхи» міграції токсикантів до підземних вод та рослинності («рецепторів»).

Таблиця 1

Характеристика основних енергетичних матеріалів як маркерів військового забруднення

Енергетичний матеріал	Тип ВР	Розчинність (21°C), мг/л	Токсичність (RfD*), мг/кг/день	Екологічна поведінка та ризики
2,4,6-trinitrotoluene (TNT)	Вторинна	130	0.0005	Висока токсичність; швидко деградує в ґрунтах з високим вмістом органіки.
Cyclotrimethylenetrinitramine (гексоген; RDX)	Вторинна	38.4	0.003	Повільно деградує; легко мігрує до підземних вод і зберігається там тривалий час.
1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazooctane (октоген; HMX)	Вторинна	5-6.63	0.05	Дуже низька швидкість деградації та розчинності; схильний до тривалої персистентності.
Picric acid (пікринова кислота)	Вторинна	12,800	0.002	Екстремальна мобільність через високу розчинність; високий ризик для гідросфери.
Ammonium perchlorate (Перхлорат амонію)	Паливо та піротехніка	200,000	0.007	Надзвичайно рухливий у ґрунтах; швидко досягає підземних вод.
White phosphorus (білий фосфор)	Піротехніка	-	0.00002	Практично не деградує у природному середовищі; надзвичайно висока токсичність.

Примітка: * RfD (Oral Reference Dose) – це пероральна референтна доза - наукова оцінка щоденного впливу на організм людини, який, імовірно, не спричинить помітного ризику шкідливих наслідків протягом усього життя

Примітка: сформовано автором на основі узагальнення теоретичних засад ревіталізації промислових територій та аналізу сучасних стратегій відновлення міського середовища (Seo, 2024; Zapotozka & Zhyrova, 2025; Sakieh et al., 2015; Conflict and Environment Observatory & Norwegian People's Aid, 2025).

Особливу небезпеку становить механічне змішування будівельного сміття (бетону, цегли, залишків ізоляції) із нафтопродуктами та продуктами неповного

згорання вибухових речовин. Звіт GICHD (Geneva International Centre for Humanitarian Demining, 2021) акцентує увагу на тому, що за наявності нерозірваних енергетичних

матеріалів (зокрема RDX та TNT; табл. 1), механічне переміщення ґрунтових мас при розчищенні завалів може сприяти їхній розчинності та швидкій міграції, що значно ускладнює подальшу ревіталізацію території та потребує впровадження спеціальних бар'єрних рішень.

Кумулятивні ефекти та синергічна деградація змішаного походження

Особливістю досліджуваних об'єктів є виникнення явища синергічної деградації, коли застаріле промислове навантаження браунфілду накладається на імпульсний вплив воєнних дій. Таке поєднання створює стійкі багатокомпонентні суміші, які за своїми властивостями є небезпечнішими, ніж кожен фактор окремо.

Ідентифіковано три основні сценарії кумулятивного впливу на промислові території (Broomandi et al., 2020; Solokha et al., 2024):

1. Прискорення вертикальної міграції токсикантів: Витікання паливно-мастильних матеріалів (ПММ) зі зруйнованих резервуарів та техніки створює умови для солюбілізації важких металів (Pb, Cu, Zn), що містяться у боєприпасах та промислових шламах. Нафтопродукти виступають у ролі органічних розчинників, що значно прискорює проникнення токсичних елементів крізь ґрунтовий профіль до водоносних горизонтів.

2. Мікробіологічна стерилізація та пригнічення саморегенерації: Комбінований вплив енергетичних матеріалів (залишків вибухових речовин типу TNT) та важких металів призводить до різкого зниження мікробної біомаси (у 2.1 рази) та пригнічення мікробіологічних процесів (на 20-30 %). Це практично блокує природну здатність ґрунту до самоочищення, що вимагає впровадження інтенсивних методів біоре mediaції.

3. Формування «техногенних ореолів» при руйнуванні інфраструктури: Механічна деструкція капітальних споруд призводить до вивільнення «законсервованих» промислових небезпек (азбест, ПХБ із трансформаторів), які змішуються з дрібнодисперсними металевими частками боєприпасів. Це створює гетерогенне середовище забруднення, де фізичне переміщення ґрунтових мас при розчищенні завалів лише сприяє розширенню ареалу токсичного впливу.

Таким чином, інтегрована модель ревіталізації повинна враховувати цей «подвійний слід» – промисловий спадок та воєнну деструкцію, що робить традиційні методи рекультивзації недостатніми та потребує розробки гібридних природоорієнтованих стратегій.

3. Обґрунтування природоорієнтованих та біоінженерних рішень для екологічної ремедіації територій зі змішаним типом забруднення

Відповідно до виявлених трендів у світовому науковому просторі (див. рис. 1Б), сучасна парадигма відновлення браунфілдів зміщується від капіталомістких інженерних методів до використання nature-based solutions (NBS). У контексті повоєнного відновлення України, де площі забруднених промислових територій є значними, саме природоорієнтовані рішення дозволяють досягти синергії між очищенням субстрату та відновленням екосистемних послуг ландшафту.

Перспективним інструментом нейтралізації ідентифікованих токсикантів є впровадження природоорієнтованих рішень (NBS). Зокрема, фіторе mediaція забезпечує екстракцію важких металів та стимулює мікробну деградацію органічних енергетичних сполук (TNT, RDX) безпосередньо в кореневій зоні рослин. Для блокування міграції найбільш розчинних речовин, таких як перхлорат амонію та пікринова кислота, обґрунтованим є застосування біовугілля (biochar) як селективного сорбенту. Такий підхід дозволяє стабілізувати забруднювачі в ґрунтовому матриксі, запобігаючи їх вимиванню в підземні води та відновлюючи екосистемні послуги територій.

Технології фіторе mediaції та біосорбції у подоланні «військового сліду»

Враховуючи виявлений спектр токсикантів – важких металів (Pb, Cu, Zn) та залишків енергетичних матеріалів (TNT, RDX) – найбільш ефективним сценарієм є використання гібридних технологій:

- фітоекстракція: Використання рослин-гіперакумуляторів для вилучення важких металів, що утворилися внаслідок корозії корпусів боєприпасів та руйнування промислових об'єктів;

- фітодеградація: Застосування специфічної мікрофлори ризосфери для розкладання залишків вибухових речовин

до нетоксичних сполук, що є критично важливим для зон інтенсивних обстрілів;

- використання біовугілля (biochar): Внесення модифікованих сорбентів дозволяє іммобілізувати рухомі форми металів, запобігаючи їх міграції до підземних вод, що відповідає моделі мінімізації ризиків «Джерело – Шлях – Рецептор».

Роль зеленої інфраструктури у відновленні стійкості урболандшафтів

Створення «зелених коридорів» на базі ревіталізованих браунфілдів виконує функцію просторової стабілізації порушених екосистем. На відміну від традиційної забудови, впровадження NBS забезпечує:

1. Регулюючі послуги: Зниження ефекту «теплого острова» та регулювання зливових стоків на промислових майданчиках з високим ступенем герметизації поверхні.

2. Підтримуючі послуги: Відновлення біорізноманіття та здатності урбоекосистем до саморегенерації після механічних руйнувань.

3. Соціальна інтеграція: Ревіталізовані зони стають центрами соціальної реабілітації міського простору, повертаючи громаді доступ до безпечного довкілля.

Таким чином, перехід до біоінженерних рішень є не лише екологічно доцільним, а й економічно виправданим кроком у стратегії повоєнної реконструкції, що дозволяє інтегрувати деградовані території у сталу екологічну мережу міста.

Інтегрована модель екологічної ревіталізації промислових територій у системі повоєнного відновлення

Підсумковим етапом дослідження є розробка інтегрованої моделі трансформації браунфілдів, яка базується на синергії екологічної безпеки, соціальної реабілітації та економічної доцільності. Модель адаптована до специфічних умов України, де фактори традиційного промислового забруднення посилені наслідками воєнних руйнувань.

На основі логіко-структурного аналізу сформовано чотирифазну модель (рис. 3), яка визначає послідовність етапів відновлення деградованих об'єктів.

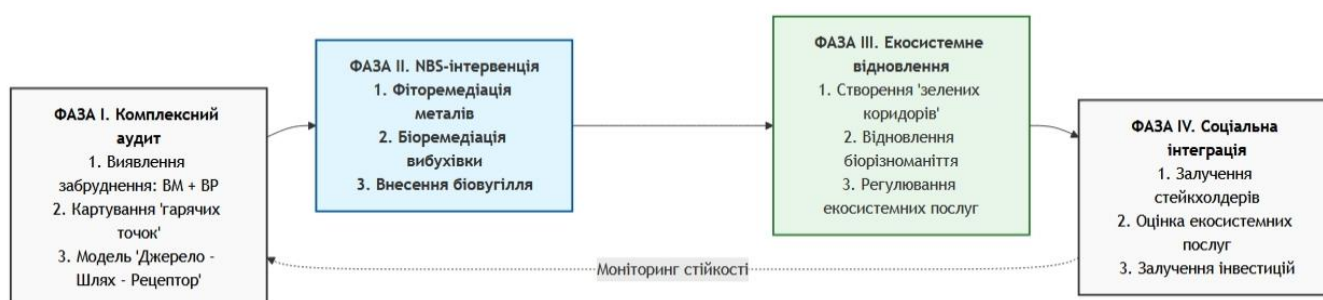


Рис. 3. Алгоритм реалізації моделі ревіталізації

Примітка: сформовано автором за допомогою Mermaid Live Editor.

1. Фаза I. Комплексний аудит та диференціація ризиків:

- проведення моніторингу за моделлю «Джерело – Шлях – Рецептор» для виявлення зон змішаного забруднення (ВМ + енергетичні матеріали);

- картування «гарячих точок» (hot spots) на основі щільності забруднення, що корелює з нашими бібліометричними даними.

2. Фаза II. Вибір стратегії очищення (NBS-інтервенція):

- впровадження гібридних біоінженерних рішень: поєднання

фіторе mediaції для іммобілізації металів та мікробної деградації для очищення від залишків вибухових речовин;

- застосування природоорієнтованих бар'єрів для запобігання вторинному забрудненню при розчищенні промислових завалів.

3. Фаза III. Екосистемне відновлення та ландшафтний дизайн:

- трансформація ремедійованого субстрату у функціональні елементи зеленої інфраструктури (парки, рекреаційні зони, «зелені коридори»);

- створення умов для саморегенерації урбоєкосистеми через відновлення біорізноманіття.

4. Фаза IV. Соціально-економічна інтеграція:

- залучення стейкхолдерів до процесу прийняття рішень, що є ключовим трендом згідно з нашим аналізом синього кластера;

- оцінка екосистемних послуг як базису для залучення інвестицій у відновлення громад;

- забезпечення безперервного моніторингу стійкості відновленої урбоєкосистеми для оцінки довгострокової стабільності біосферно-сумісних ландшаф-

тів та верифікації ефективності впроваджених рішень із можливим поверненням до етапу аудиту в разі виявлення нових екологічних ризиків.

Впровадження інтегрованої моделі дозволить не лише мінімізувати екологічні ризики від військового впливу, а й забезпечити довгострокову стійкість міських територій. Використання приватно-публічного партнерства у поєднанні з природоорієнтованими рішеннями робить процес рекультивації та ревіталізації менш енерговитратним та більш адаптивним до кліматичних викликів рис. 4.

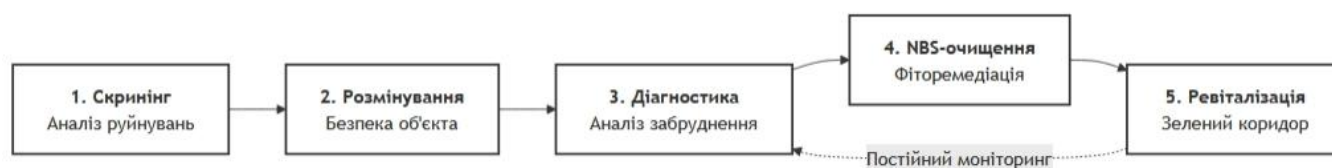


Рис. 4. Алгоритм інтегрованої моделі екологічної ревіталізації промислових територій у повоєнний період

Примітка: сформовано автором за допомогою Mermaid Live Editor.

Реалізація даного алгоритму дозволяє трансформувати деградовані промислові майданчики з «пасивних територій» у активні елементи зеленого каркаса міста. Важливо підкреслити, що кожен етап – від первинного скринінгу до фінального моніторингу – базується на принципах адаптивного менеджменту, що дозволяє коригувати стратегію ревіталізації залежно від динаміки очищення субстрату та стану біотичних компонентів.

Основою запропонованого підходу є адаптація міжнародної моделі оцінки екологічних ризиків «Джерело – Шлях – Рецептор» (Source – Pathway – Receptor, SPR) до умов військового впливу на браунфілди.

Концептуальна модель SPR у контексті дослідження включає:

- джерело (Source): Вибухонебезпечні предмети, нерозірвані боєприпаси та продукти їх детонації (TNT, RDX, важкі метали), що знаходяться у ґрунті або зруйнованих конструкціях;

- шлях (Pathway): Механізми міграції токсикантів через ґрунтові води (солюбілізація), атмосферний перенос (пилове запилення) або прямий контакт із біотою;

- рецептор (Receptor): Кінцеві об'єкти впливу – місцеве населення, підземні водоносні горизонти та міські екосистеми.

На базі цієї моделі було розроблено практичний алгоритм ревіталізації, який дозволяє поетапно розривати зв'язки між джерелом та рецептором (Рис. 4). Зокрема, використання NBS-технологій (фіторемедіації та біосорбції) спрямоване на блокування Шляхів міграції шляхом іммобілізації токсикантів у субстраті, що забезпечує довгострокову безпеку Рецепторів.

Такий підхід забезпечує не лише екологічну безпеку, а й створює передумови для соціально-економічного відродження громад через капіталізацію відновлених екосистемних послуг.

Висновки

За результатами дослідження щодо екологічної ревіталізації промислових територій у контексті повоєнного відновлення України сформульовано такі наукові та практичні положення:

1. Визначено, що особливістю екологічної деградації промислових територій внаслідок воєнних дій є синергія

традиційного техногенного спадку та забруднення в наслідок збройного конфлікту. Встановлено, що ключовими факторами деструкції є механічне пошкодження ґрунтового покриву та надходження специфічних маркерів: важких металів (Sb, Cu, Ni) і персистентних енергетичних матеріалів (TNT, RDX).

2. Ідентифіковано ефективні природоорієнтовані рішення, серед яких найбільш перспективними для ремедіації змішаного забруднення є гібридні біоінженерні технології. Обґрунтовано використання фітоекстракції для вилучення металів та мікробної деградації для розщеплення залишків вибухових речовин, а також застосування біовугілля як сорбенту для іммобілізації мобільних токсикантів у субстраті.

3. Досліджено роль екосистемних послуг та зеленої інфраструктури, які

виступають стабілізуючими факторами через відновлення біорізноманіття та регулювання гідрологічного режиму порушених ландшафтів. Доведено, що створення «зелених коридорів» на базі ревіталізованих браунфілдів підвищує кліматичну стійкість урбоекосистем та забезпечує їхню здатність до саморегенерації.

4. Розроблено інтегровану модель екологічної ревіталізації, яка базується на покроковому алгоритмі: від комплексного аудиту та диференціації ризиків за моделлю SPR до фінальної ландшафтно-їнтеграції. Модель адаптована до стратегічних пріоритетів України та передбачає залучення приватно-публічного партнерства для соціальної реабілітації міського простору та повернення деградованих територій у безпечний економічний обіг.

Фінансування / Funding

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

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Всі дані використані в статті доступні у цитованих літературних джерелах, нові дані не створювалися / All data used in the article are available in the cited literature sources; no new data were created.

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

Під час підготовки цього рукопису автор використовував Google Gemini для формування коду Mermaid syntax для створення блок-схем у Mermaid Live Editor. Після застосування цього інструменту автор ретельно переглянув та відредагував вміст і несе повну відповідальність за остаточну опубліковану версію / While preparing this manuscript, the author used Google Gemini to generate Mermaid syntax code for creating flowcharts in the Mermaid Live Editor. After using this tool, the author carefully reviewed and edited the content and takes full responsibility for the final published version.

References

- Artmann, M., & Sartison, K. (2018). The role of urban agriculture as a nature-based solution: A review for developing a systemic assessment framework. *Sustainability*, 10(6), 1937. <https://doi.org/10.3390/su10061937>
- Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Sustainability*, 12(21), 9002. <https://doi.org/10.3390/su12219002>
- Chen, B., & Hashimoto, S. (2025). Integrate brownfield greening into urban planning. *Urban Forestry & Urban Greening*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128642>
- Conflict and Environment Observatory (CEOBS), & Norwegian People's Aid (NPA). (2025). *Assessing environmental degradation from explosive weapons in southern Ukraine: Snihurivka and Chornobaivka hromadas: Joint report.* https://ceobs.org/wp-content/uploads/2025/01/NPA-CEOBS_2025_Assessing_environmental_degradation_explosive_weapons_southern_Ukraine.pdf
- Douglas, I. (2012). Urban ecology and urban ecosystems: Understanding the links to human health and well-being. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(4), 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.07.005>
- Fomenko, O. O., Danylov, S. M., & Blinova, M. Y. (2025). Symbiosis of architecture and environment: Problems and concepts. *Scientific Bulletin of Construction*, (112), 15–22. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.15> (in Ukrainian)
Фоменко О. О., Данилов С. М., Блінова М. Ю. Симбіоз архітектури і навколишнього середовища: проблеми і концепції. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 112. С. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.15>
- Franz, M., Pahlen, G., Nathanail, P., Okuniek, N., & Koj, A. (2006). Sustainable development and brownfield regeneration: What defines the quality of derelict land recycling? *Environmental Sciences*, 3(2), 135–151. <https://doi.org/10.1080/15693430600800873>
- Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD). (2021). *Explosive ordnance pollution of the environment: Guide.* https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Media/GICHD-resources/rec-documents/EO_Pollution_of_the_Environment_v17_web_01.pdf
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Hnatiuk, L. R., & Melnyk, M. V. (2019). Revitalization of industrial objects on the example of Kyiv. *Design Theory and Practice*, 1(16), 52–67. <https://doi.org/10.18372/2415-8151.16.14330> (in Ukrainian)
Гнатюк Л. Р., Мельник М. В. Ревіталізація промислових об'єктів на прикладі м. Київ. *Теорія і практика дизайну*. 2019. Вип. 1(16). С. 52–67. DOI: <https://doi.org/10.18372/2415-8151.16.14330>
- Hou, D., Al-Tabbaa, A., Chen, H., & Mamic, I. (2023). Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 253–269. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00404-1>

Osypenko, K., & Tarabanova, Y. (2021). Ecological aspects of the revitalization of abandoned industrial areas on the example of the urban space of post-socialist Kyiv. *Urban Planning and Territorial Planning*, (78), 404–413. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.404-413> (in Ukrainian)

Осипенко К., Тарабанова Ю. Екологічні аспекти ревіталізації занедбаних промислових територій на прикладі міського простору постсоціалістичного Києва. *Містобудування та територіальне планування*. 2021. Вип. 78. С. 404–413. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.404-413>

Plamenytska, O. A., Hnatiuk, L. R., & Humeniuk, I. I. (2019). Methodological approaches to revitalization and renovation of historical buildings (analysis of experience). *Design Theory and Practice*, (19), 138–151. <https://doi.org/10.18372/2415-8151.19.14371> (in Ukrainian)

Пламєницька О. А., Гнатюк Л. Р., Гуменюк І. І. Методичні підходи до ревіталізації та реновації історичних будівель (аналіз досвіду). *Теорія і практика дизайну*. 2019. Вип. 19. С. 138–151. DOI: <https://doi.org/10.18372/2415-8151.19.14371>

Rakoid, O. O., & Bogoliubov, V. M. (2021). *Strategy of sustainable development of nature and society* (2nd ed.). NUBIP. (in Ukrainian)

Ракоїд О. О., Боголюбов В. М. Стратегія сталого розвитку природи і суспільства : підручник. 2-ге вид., переробл. Київ : НУБіП України, 2021. 319 с.

Rashkevich, N. V., Krasnov, V. A. & Huz, A. S. Procedures for Geospatial Profiling of Territories with Potential Radiation Contamination as a Result of Rocket and Artillery Strikes. *KhNAHU Bulletin*, 111. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.158> (in Ukrainian)

Рашкевич Н. В., Краснов В. А., Гузь А. С. Процедури геопросторового профілювання території можливого радіаційного забруднення внаслідок ракетно-артилерійських уражень. Вісник ХНАДУ, вип. 111, 2025. С. 158-165. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.158>

Sakieh, Y., Amiri, B. J., Danekar, A., et al. (2015). Scenario-based evaluation of urban development sustainability: An integrative modeling approach to compromise between urbanization suitability index and landscape pattern. *Environmental Development and Sustainability*, 17, 1343–1365. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9609-7>

Seo, K. H. (2024). Urban resilience through design: Sustainable redevelopment of brownfield sites. *JEES*, 7(1). <https://doi.org/10.30564/jees.v7i1.7309>

Solokha, M.; Demyanyuk, O.; Symochko, L.; Mazur, S.; Vynokurova, N.; Sementsova, K.; Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>

Zapotozka, V., & Zhyrova, Y. (2025). Revitalization of industrial territories: The experience of the city of Kyiv in restoring the urban environment. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography*, 3/4, 14–24. <https://doi.org/10.17721/1728-2721.2024.90-91.2>

Zheng, B., & Masrabaye, F. (2023). Sustainable brownfield redevelopment and planning: Bibliometric and visual analysis. *Heliyon*, 9(2), e13504. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13280>

Ви можете цитувати цю статтю так:

Душкін С. Екологічні аспекти ревіталізації деградованих промислових зон у структурі сучасного міста. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 241-254.

DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.17>

Cite this article in APA style as:

Dushkin, S. (2026). Ekolohichni aspekty revitalizatsii dehradovanykh promyslovykh zon u strukturi suchasnoho mista [Ecological aspects of revitalising degraded industrial areas in the structure of a modern city]. *Biota. Human. Technology*, (2), 241-254. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.17> (in Ukrainian)

Information about the author:

Dushkin S. [in Ukrainian: **Душкін С.**], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, email: dushkin@khadi.kharkov.ua
ORCID: 0000-0002-9345-9632 Scopus-Author ID: 57209021455 ResearcherID: AAK-8407-2020
Department of Ecology, Road-Building Faculty, Kharkiv National Automobile and Highway University
25, Yaroslav Mudryi Street, Kharkiv, 61002, Ukraine

UDC 661.185:537:[692.53:691.175]:[614.2+621.38]

DOI: 10.58407/bht.2.26.18



Copyright (c) 2026 Jane Chernychko, Gábor Lovász

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/).

Яна Черничко, Габор Ловас

ВПЛИВ МИЮЧИХ ЗАСОБІВ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР ПВХ ПІДЛОГ
В МЕДИЧНІЙ ГАЛУЗІ ТА ЕЛЕКТРОННІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Jane Chernychko, Gábor Lovász

EFFECT OF GENERAL CLEANING AGENTS ON THE RESISTANCE OF PVC FLOORS
USED IN HEALTHCARE AND THE ELECTRONICS INDUSTRY

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Метою роботи було дослідження впливу різних мийних засобів на електростатичні властивості полівінілхлоридних (ПВХ) підлогових покриттів, які широко використовуються в медичних закладах та електронній промисловості. Особливу увагу приділено оцінці змін поверхневого та об'ємного опору покриттів після багаторазового очищення засобами різного призначення, а також визначенню їхньої відповідності вимогам ESD-захисту.

Методологія. У роботі було досліджено 7 зразків ПВХ-покриттів із використанням трьох поширених засобів для очищення: Staticide 4010-1, Staticide 4800-1 Ultra II, Staticide 4020-1. Вимірювання електричних характеристик проводили за допомогою цифрового гігаомметра AIJGO-61. Для оцінки властивостей покриттів застосовували метод вимірювання опору між двома точками (R_{p-p}) та метод визначення об'ємного опору (R_v). Дослідження виконували відповідно до вимог міжнародних стандартів IEC 61340-5-1:2024 та ANSI/ESD S20.20:2021. Отримані результати аналізували з урахуванням впливу відносної вологості навколишнього середовища та кількості циклів очищення.

Наукова новизна. Вперше проведено комплексне порівняння впливу спеціалізованих ESD-засобів та побутових мийних засобів на електростатичні характеристики ПВХ-покриттів. Встановлено особливості зміни значень поверхневого та об'ємного опору залежно від типу очищувального засобу, кількості обробок і вологості повітря. Показано, що застосування акрилового покриття Staticide 4800-1 Ultra II за низької вологості та нанесення декількох шарів може призводити до наближення значень опору до гранично допустимих норм. Також визначено особливості впливу побутових засобів та етанолу на електростатичні властивості ПВХ-підлог.

Висновки. Результати дослідження показали, що нейтральний концентрат Staticide 4020-1 забезпечує найбільш стабільні показники поверхневого та об'ємного опору. Використання засобу Staticide 4010-1 призводить до поступового збільшення значень опору при багаторазовому очищенні. Загалом жоден із досліджених засобів не спричинив перевищення нормативних значень під час короткострокових випробувань. Отримані результати свідчать про необхідність подальших досліджень щодо оцінки довгострокового впливу мийних засобів на електростатичні характеристики ESD-покриттів.

Ключові слова: ESD-засіб для чищення, універсальний мийний засіб, ПВХ-підлога, опір, електростатичний розряд, електронна промисловість, заклади охорони здоров'я

ABSTRACT

Purpose of the work. The purpose of the thesis was to investigate the effect of various cleaning agents on the electrostatic properties of polyvinyl chloride (PVC) floor coverings, which are widely used in healthcare facilities and the electronics industry. Particular attention was paid to the evaluation of changes in the surface and volume resistance of the coverings after repeated cleaning with agents of different purposes, as well as to determining their compliance with ESD protection requirements.

Methodology. In this study, 7 PVC flooring samples were investigated using three commonly used cleaning agents: Staticide 4010-1, Staticide 4800-1 Ultra II, Staticide 4020-1. Electrical characteristics were measured using an AIJGO-61 digital gigaohmmeter. To evaluate the properties of the coverings, the point-to-point resistance (R_{p-p}) measurement method and the volume resistance (R_v) determination method were applied. The research was carried out in accordance with the requirements of the international standards IEC 61340-5-1:2024 and ANSI/ESD S20.20:2021. The obtained results were analyzed taking into account the influence of relative humidity and the number of cleaning cycles.

Scientific novelty. For the first time, a comprehensive comparison of the effects of specialized ESD cleaning agents and household cleaning products on the electrostatic characteristics of PVC floor coverings was carried out. The specific features of changes in surface and volume resistance values depending on the type of cleaning agent, the number of cleaning cycles, and air humidity were established. It was shown that the application of the acrylic coating Staticide 4800-1 Ultra II under conditions of low humidity and multiple coating layers may lead to resistance values approaching the maximum permissible limits. The specific effects of household cleaning products and ethanol on the electrostatic properties of PVC flooring were also determined.

Conclusions. The results of the study showed that Staticide 4020-1 Neutral Cleaner Concentrate provided the most stable surface and volume resistance values. The use of Staticide 4010-1 resulted in a gradual increase in resistance values after repeated cleaning cycles. Overall, none of the tested cleaning agents caused the resistance values to exceed the specified standard limits during the short-term tests. The obtained results indicate the need for further research to assess the long-term effects of cleaning agents on the electrostatic properties of ESD flooring.

Key words: ESD cleaner, general-purpose cleaner, PVC floor, resistance, electrostatic discharge, electronics industry, healthcare institutions

Вступ

Роль загальних мийних засобів є надзвичайно важливою як у медичному, так і в промисловому середовищі, де чистота поверхонь і мікробіологічна безпека є основними вимогами. У закладах охорони здоров'я для запобігання поширенню інфекцій регулярно застосовуються інтенсивні процедури очищення та дезінфекції, тоді як в електронній промисловості підтримання безчастинкового контрольованого середовища є необхідною умовою надійності виробничих процесів. У цих сферах широко використовуються підлогові покриття на основі ПВХ (полівінілхлориду), які завдяки своїм сприятливим властивостям, таким як зносостійкість, легкість очищення та гігієнічність поверхні, стали галузевим стандартом.

Однак ПВХ-покриття піддаються не лише механічним навантаженням, а й постійному хімічному впливу, який може суттєво впливати на їхню структуру та термін експлуатації. Багаторазове застосування різних мийних і дезінфекційних засобів, зокрема хлорвмісних сполук, четвертинних амонієвих сполук або спиртів, у довгостроковій перспективі може призводити до деградації поверхні. Старіння поверхні, яке викликається, зокрема, ультрафіолетовим випромінюванням, температурним впливом та окиснювальними мийними засобами, здатне змінювати фізичні та хімічні властивості ПВХ, а отже, впливати й на ефективність дезінфекції (Savchuk & Sova, 2024).

Наукова література також наголошує, що деградація матеріалів на основі ПВХ є

складним процесом, у якому одночасно беруть участь як хімічні, так і навколишні чинники. Наприклад, у вологому середовищі з високим значенням рН можуть виникати процеси гідролізу, що спричиняють структурне пошкодження ПВХ-підлогових покриттів. Крім того, під час розкладання підлогових покриттів і клейових матеріалів можуть виділятися леткі органічні сполуки, які не лише свідчать про деградацію матеріалу, а й можуть становити потенційну небезпеку для здоров'я людини.

У медичному середовищі додатковою проблемою є те, що дезінфекційні засоби впливають не тільки на матеріали, а й на поведінку мікроорганізмів. Деякі дослідження показали, що певні бактерії здатні закріплюватися на поверхнях ПВХ і частково набувати стійкості до окремих дезінфекційних засобів, що в довгостроковій перспективі може знижувати ефективність гігієнічних заходів. Це свідчить про тісний взаємозв'язок між станом поверхонь і типом використовуваних мийних засобів (Lahl & Zeschmar-Lahl, 2024).

У випадку ПВХ-підлог, що застосовуються в електронній промисловості, ситуація додатково ускладнюється необхідністю забезпечення антистатичних і струмопровідних властивостей. Такі спеціальні покриття можуть бути чутливими до певних мийних засобів, які здатні змінювати їхні електричні характеристики або цілісність поверхні. Тому сучасні дослідження дедалі більше зосереджуються на розробці таких покриттів і методів обробки поверхонь, які одночасно забезпечують хімічну стійкість, антистатичні властивості та антимікробну дію.

Електростатичні властивості ESD-покриттів залежать не лише від складу матеріалу, а й від умов експлуатації, зокрема температури, відносної вологості, механічного зношування та способів очищення поверхні (Ohsawa, 2001) Для забезпечення стабільних електричних характеристик рекомендується використовувати спеціалізовані мийні засоби, сумісні з ESD-покриттями, оскільки залишки звичайних очищувальних композицій можуть змінювати поверхневий електричний опір і погіршувати ефективність відведення електростатичного заряду. Методи визначення поверхневого, об'ємного та вертикального електричного опору підлогових покриттів регламентовані міжнародним стандартом IEC 61340-4-1, який широко застосовується для оцінювання характеристик антистатичних та струморозсіювальних покриттів (IEC 61340-4-1).

Матеріали та методи дослідження

У роботі досліджувалося підлогове покриття iQ TORO SC – Toro Grey 0101. Це гомогенне PBX-покриття товщиною 2 мм, виготовлене відповідно до міжнародного стандарту ISO 10581. Матеріал характеризується високою міцністю, зносостійкістю та електропровідними властивостями, що забезпечують захист від електростатичних розрядів. Покриття відповідає вимогам стандартів EN 1081 та IEC 61340-4-1 (Tarkett, 2024).

iQ Toro SC широко використовується в медичних закладах, електронній промисловості та чистих приміщеннях завдяки своїм антибактеріальним властивостям і стійкості до дії багатьох дезінфекційних засобів. Покриття не містить формальдегіду, фталатних пластифікаторів і біоцидів, а рівень виділення летких органічних сполук є надзвичайно низьким.

Для щоденного догляду рекомендується сухе або вологе прибирання з використанням нейтральних мийних засобів. У приміщеннях із підвищеною вологістю можуть застосовуватися слабокислі засоби для видалення вапняного нальоту та мильних відкладень. При сильному забрудненні допускається машинне очищення із застосуванням лужних мийних засобів. Використання розчинників, шліфування та інших механічних втручань не рекомендується,

оскільки вони можуть пошкодити покриття та змінити його електропровідні властивості.

Для проведення експериментальних досліджень зразки покриття iQ TORO SC – Toro Grey 0101 були підготовлені шляхом розрізання на необхідні розміри, маркування та зберігання у відповідних умовах. Загалом було досліджено 7 зразків підлоги, на яких вивчався вплив трьох різних мийних засобів і покриттів.

Для дослідження було використано три засоби для очищення та обробки підлогових покриттів: Staticide 4010-1 Anti-Static Floor Stripper, Staticide 4020-1 Neutral Cleaner Concentrate, Staticide 4800-1 Ultra II Dissipative Floor Finish. Перед початком експерименту засіб Staticide 4010-1 розводили у співвідношенні 1:4, а Staticide 4020-1 – у співвідношенні 1:128.

Staticide 4010-1 є професійним антистатичним засобом для глибокого очищення підлог у приміщеннях, де необхідний захист від статичної електрики. Він ефективно видаляє старі полімерні та воскові покриття, не пошкоджуючи поверхню (ACL Staticide, 2023).

Staticide 4020-1 – концентрований антистатичний мийний засіб, призначений для професійного використання. Він не утворює піни, не залишає слідів на поверхні та не містить агресивних компонентів

Staticide 4800-1 Ultra II є спеціальним акриловим ESD-покриттям, що відновлює та покращує антистатичні властивості підлоги. Воно забезпечує високу зносостійкість, стійкість до ультрафіолетового випромінювання та механічних пошкоджень.

Для оцінки відповідності PBX-підлогових покриттів вимогам ESD-захисту проводили вимірювання їхнього електричного опору за допомогою цифрового вимірювача опору AIJGO-61. Прилад має декларацію відповідності CE та відповідає вимогам міжнародних стандартів IEC 61340-5-1 (Electrostatics – Protection of electronic devices from electrostatic phenomena) і ANSI/ESD S20.20, що регламентують вимоги до вимірювання параметрів систем захисту від електростатичних розрядів (ESD). Виробником також зазначено відповідність вимогам Директиви 2001/95/ЄС щодо загальної безпеки продукції (Aijgo-61-61BT_hasznalati_utmutato; AIJGO_61_Ellenallasmer__adatlap). Даний прилад є високоточним професійним обладнанням, призначеним для контролю антистатичних матеріалів та аудиту ESD-захищених зон. Він дозволяє визначати поверхневий, об'ємний та

інші види електричного опору в широкому діапазоні значень, що дає можливість досліджувати як провідні, так і ізоляційні матеріали. Отримані результати відображаються на цифровому дисплеї приладу, що забезпечує швидке та точне зчитування даних (Lovas, 2024).

У роботі було використано два методи вимірювання: визначення опору між двома точками (R_{p-p}) та вимірювання об'ємного опору (R_v). Вимірювання проводили відповідно до міжнародних стандартів IEC 61340-5-1:2024 та ANSI/ESD S20.20:2021, які регламентують вимоги до електростатично захищених підлогових покриттів. Згідно з цими стандартами, значення поверхневого опору та опору відносно заземлення не повинні перевищувати 1 ГОм. Оскільки дослідження проводилося на окремих зразках покриття, замість опору відносно заземлення (R_g) визначався об'ємний опір (R_v), який у даному випадку вважається еквівалентним показником для оцінки електростатичних властивостей матеріалу.

Статистичну обробку експериментальних даних проводили за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel. Результати подано у вигляді середнього значення $\pm$ стандартного відхилення ($M \pm SD$). Для оцінки статистичної значущості відмінностей між групами використовували t -критерій Ст'юдента (або однофакторний дисперсійний аналіз ANOVA, якщо порівнювали більше двох груп). Відмінності вважали статистично значущими при $p < 0,05$.

Для дослідження було підготовлено 7 зразків ПВХ-покриття iQ TORO SC – Toro Grey 0101. На зразках вивчався вплив трьох різних засобів для очищення та обробки поверхні: Staticide 4020-1 Neutral Cleaner Concentrate, Staticide 4800-1 Ultra II Dissipative Floor Finish, Staticide 4010-1 Anti-Static Floor Stripper. Для кожного засобу було передбачено окрему серію експериментів із багаторазовим нанесенням та подальшим вимірюванням електричного опору.

Зразки №1–3 оброблялися антистатичним мийним засобом Staticide 4020-1. Вимірювання проводили після кількох циклів очищення, що дозволило простежити зміну електричних характеристик покриття в процесі його експлуатації. Зразки №4–6 покривалися

акриловим ESD-покриттям Staticide 4800-1 Ultra II. Для частини цих зразків покриття періодично видаляли за допомогою розчинника Staticide 4010-1, після чого знову наносили новий шар. Це дозволило оцінити вплив багаторазового нанесення та видалення покриття на показники опору.

Зразок №7 оброблявся виключно розчинником Staticide 4010-1 для визначення його безпосереднього впливу на електричний опір матеріалу. Такий підхід дозволив оцінити вплив спиртових засобів на поверхневий та об'ємний опір покриття.

Результати дослідження та обговорення

У таблиці 1 наведено дані температури навколишнього середовища та відносної вологості повітря, виміряні під час кожного циклу дослідження зразків ПВХ-покриття, оброблених трьома різними речовинами. Отримані результати свідчать, що температура протягом експерименту залишалася відносно стабільною та коливалася в межах 21–25 °C. Водночас відносна вологість повітря поступово знижувалася: на початкових етапах дослідження її значення становили приблизно 59–60 %, тоді як у завершальних циклах вимірювань вони зменшилися до 38–43 %. Це свідчить про поступове висихання повітря під час проведення експерименту, що могло впливати на результати вимірювання електричного опору зразків.

Очищення засобом 4020-1. Аналіз значень опору R_{p-p} та R_v зразків, очищених засобом Staticide 4020-1, є важливим, оскільки цей засіб широко використовується в електронній промисловості для підтримання електропровідних властивостей ESD-підлог. Метою дослідження було визначити, як змінюється опір підлогового покриття при регулярному використанні рекомендованого мийного засобу.

На зразках №1–3 (Minta 1, Minta 2, Minta 3) досліджувався вплив засобу Staticide 4020-1 на поверхневий (R_{p-p}) та об'ємний (R_v) опір. Отримані результати показали подібну поведінку всіх трьох зразків. Після перших двох циклів очищення значення R_{p-p} зменшувалися, у проміжку між 2-м та 19-м циклами залишалися стабільними, а після 19-го циклу поступово зростали.

Таблиця 1

Показники температури та відносної вологості навколишнього середовища в кожному циклі дослідження.

Цикл дослідження	0		1		2		9		15		19		29	
Номер зразків	T, °C	RH, %	T, °C	RH, %	T, °C	RH, %	T, °C	RH, %	T, °C	RH, %	T, °C	RH, %	T, °C	RH, %
1	23,5	59,9	21,5	57,9	21,7	54,9	23,3	49,6	22,5	38,4	22,8	43,5	21,1	43,5
2	24,0	59,8	21,8	57,9	22,4	54,8	23,2	48,9	22,5	38,5	22,8	43,3	21,3	42,8
3	24,4	59,5	22,8	57,6	22,6	54,8	23,3	48,9	22,5	38,5	22,7	43,3	21,2	42,8
4	24,4	59,5	23,2	57,2	22,8	54,6	23,3	48,9	22,4	38,6	22,6	43,2	21,1	41,7
5	24,6	59,5	23,8	56,9	23,5	54,1	23,8	48,3	22,4	38,6	22,6	43,2	21,1	41,5
6	25,4	59,4	24,2	56,5	23,9	54,2	23,3	48,9	22,4	38,6	22,6	43,2	21,1	41,9
7	24,8	59,3	24,5	56,4	24,0	54,0	23,3	49,0	22,4	38,6	22,3	43,5	21,5	43,2

Найнижчі значення опору були зафіксовані після 15-го циклу очищення, коли відносна вологість повітря була найнижчою. Це свідчить про те, що навіть за низької вологості поверхневий опір підлоги залишається стабільним. Значення

об'ємного опору R_v протягом експерименту коливалися в межах від 0,8 до 3 МОм, що підтверджує стабільність електричних властивостей покриття під час очищення засобом Staticide 4020-1.

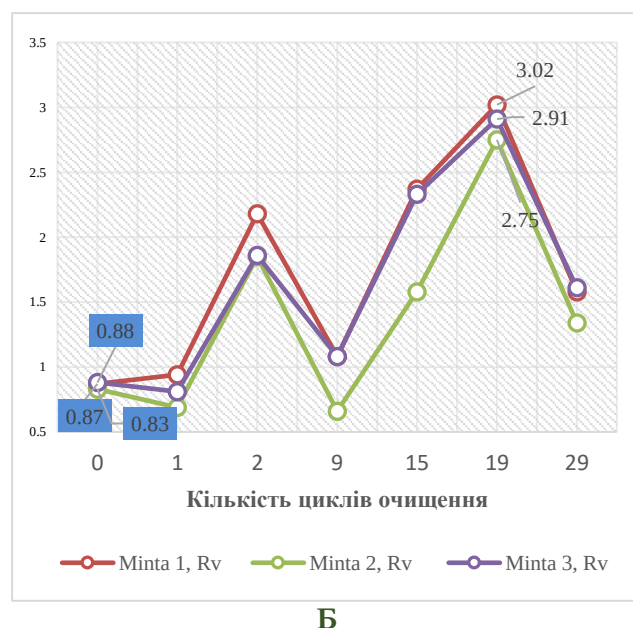
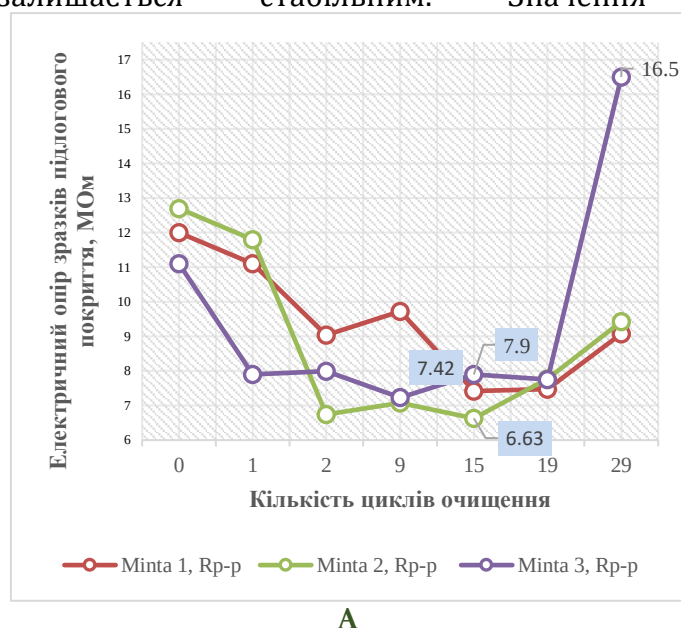


Рис. 1. Зразки, очищені засобом 4020-1: А – поверхневий опір; Б – об'ємний опір

Очищення засобом 4800-1. ПВХ-підлоги під час виробництва покривають провідним поліуретановим шаром, який з часом зношується. Для його відновлення застосовують покриття 4800-1, яке необхідно періодично наносити на підлогу. Згідно з інструкцією виробника, перед нанесенням нового шару попередній потрібно видаляти засобом 4010-1.

Метою дослідження було визначити, чи впливає правильне та неправильне нанесення покриття на електричний опір підлоги. На 15-му циклі для всіх зразків спостерігалися високі значення опору R_{p-p} та R_v , що пояснюється низькою відносною вологістю повітря (38,6 %). Після обробки покриттям 4800-1 зразки стали більш чутливими до змін вологості, оскільки це покриття гірше проводить електричний струм за низької вологості.

Аналіз показав, що зі збільшенням кількості шарів 4800-1 опір підлоги зростає. Це підтверджує необхідність видалення старого шару засобом 4010-1 перед нанесенням нового. Опір зразка з одним шаром 4010-1 був приблизно у 6,5 раза нижчим, а з п'ятьма шарами – у 4 рази нижчим порівняно зі зразком із 15 шарами покриття.

Результати також показали, що правильно оброблена покриттям 4800-1 підлога має нижчий і стабільніший опір. Для забезпечення стабільних електричних властивостей перед кожним новим нанесенням 4800-1 необхідно видаляти попередній шар засобом 4010-1. Крім того, під час подальших досліджень важливо контролювати умови зберігання зразків, оскільки вологість та інші параметри середовища суттєво впливають на опір ПВХ-підлог.

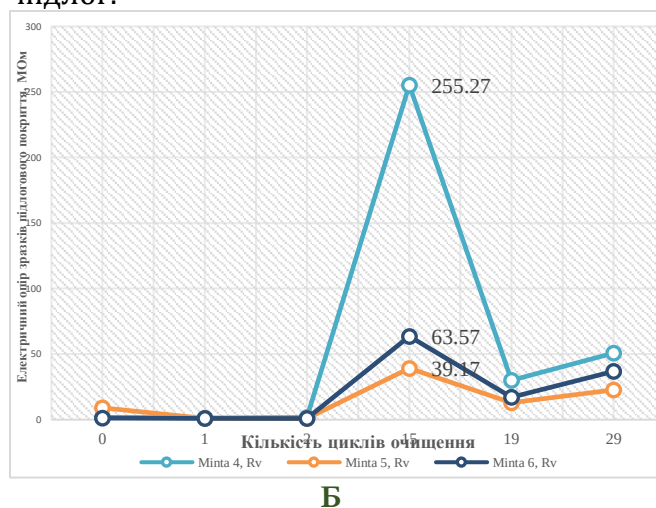
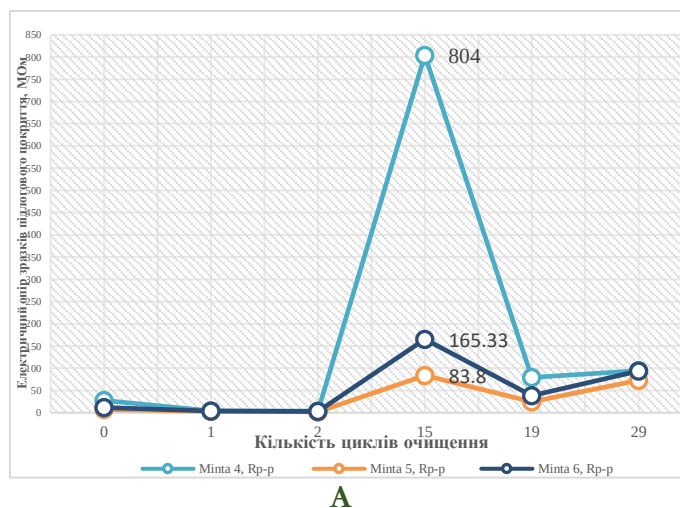


Рис. 2. Зразки, очищені засобом 4800-1: А – поверхневий опір; Б – об'ємний опір

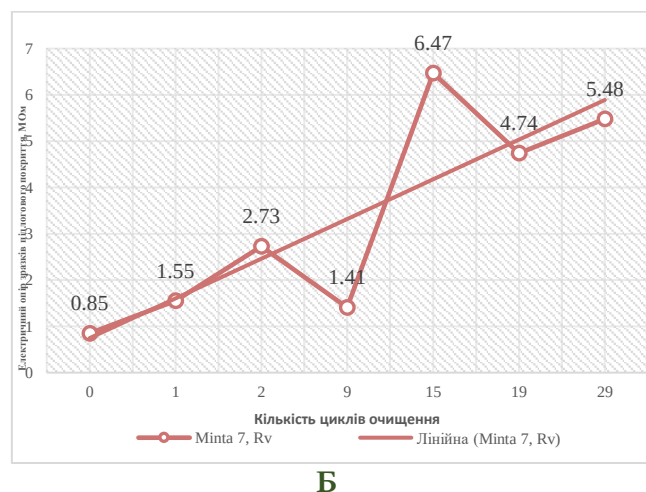
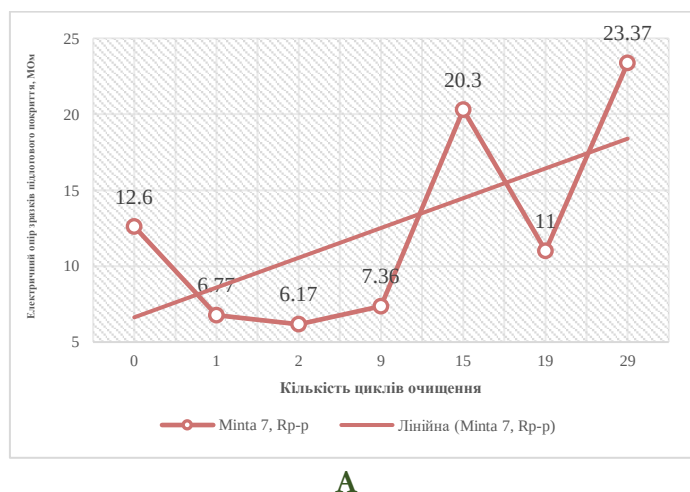


Рис. 3. Зразок, очищений засобом 4010-1: А – поверхневий опір; Б – об'ємний опір

Очищення засобом 4010-1. Під час дослідження зразка №7 (Minta 7) оцінювали вплив ESD-розчинника 4010-1 на опір підлоги R_{p-p} та R_v . Цей засіб використовується для глибокого очищення підлог в електронній промисловості, оскільки видаляє забруднення та залишки старих покриттів.

Результати показали, що зі збільшенням кількості очищень розчинником 4010-1 значення R_{p-p} та R_v поступово зростають. Поверхневий опір спочатку зменшувався до 9-го циклу, а потім зростає, досягнувши 23,37 МОм на 29-му циклі. Об'ємний опір R_v також зріс з 0,85 МОм до 5,48 МОм.

Хоча ці зміни залишаються в межах допустимих норм для ESD-підлог, лінійний аналіз тенденцій показав, що за тривалого використання опір може продовжувати зростати. Тому доцільно проводити подальші дослідження для оцінки довгострокового впливу розчинника 4010-1 на електричні властивості підлоги.

Отримані результати узгоджуються з рекомендаціями виробників ESD-покриттів щодо використання нейтральних мийних засобів для підтримання стабільних електростатичних характеристик. Водночас у доступній науковій літературі експериментальних досліджень, присвячених

безпосередньому порівнянню впливу різних мийних засобів на електричний опір ESD ПВХ-покриттів, практично не виявлено. У зв'язку з цим отримані результати доповнюють наявні дані та можуть бути використані як основа для подальших досліджень.

Висновки

У роботі досліджено вплив різних мийних засобів на опір R_{p-p} та R_v ПВХ-підлог. Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

Засіб 4020-1 забезпечує стабільні значення опору та підтримує належні ESD-властивості підлоги.

Під час використання покриття 4800-1 необхідно дотримуватися інструкцій виробника та перед нанесенням нового шару видаляти попередній засобом 4010-1. Недотримання цієї вимоги, особливо за вологості нижче 40 %, може значно підвищити опір підлоги.

Багаторазове очищення розчинником 4010-1 поступово збільшує значення R_{p-p} та R_v , тому доцільно продовжити дослідження його довгострокового впливу.

Запропоновані експериментальні та вимірювальні методи можуть бути використані промисловими підприємствами для оцінки стану та ефективності ESD-підлог у реальних умовах експлуатації.

Фінансування / Funding

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

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Усі первинні дані дослідження знаходяться у вільному доступі за адресою [Закарпатський угорський університет імені Ференца Ракоці II, площа Кошута, 6. 90202 Берегове, Закарпаття, Україна] / All primary research data are freely available at the following address: [Ferenc Rákóczi II Transcarpathian Hungarian College of Higher Education, Kossuth Square 6, 90202 Berehove, Zakarpattia, Ukraine].

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 на базі штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / In this study, no generative artificial intelligence or AI-based technologies were used for data collection, analysis, or interpretation.

References

- ACL Staticide. (2023). ESD floor finish application and maintenance guide. ACL Incorporated.
- ACL Staticide. (2023). Staticide® 4010 Restorer Cleaner: Technical Data Sheet. ACL Incorporated. <https://www.dlb.hu/staticide-esd-oldoszer-padlohoz>
- ACL Staticide. (2023). Staticide® 4020 Neutral Cleaner Concentrate: Technical Data Sheet. ACL Incorporated. <https://www.dlb.hu/catalog/details/721>
- International Electrotechnical Commission. (2015). IEC 61340-4-1: Electrostatics–Part 4-1: Standard test methods for specific applications–Electrical resistance of floor coverings and installed floors (Edition 2.1). International Electrotechnical Commission.
- Lahl, U., & Zeschmar-Lahl, B. (2024). More than 30 Years of PVC Recycling in Europe–A Critical Inventory. *Sustainability*, 16(9), 3854. <https://doi.org/10.3390/su16093854>
- Lovas, H. (2024). ESD protection: handbook for selecting tools for well-functioning ESD protection systems. https://www.destsa.hu/_upload/editor/catalog/ESD_vedelem_kezikonyv.pdf
- Ohsawa, A. (2001). Electrostatic characterization of antistatic floors using an equivalent circuit model. *Journal of Electrostatics*, 51–52, 625–631. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00031-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00031-6)
- Savchuk, A., & Sova, H. (2024). Polyvinyl chloride processing in a cyclical economy. *Technologies and Engineering*, (3), 127–141. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.10> (in Ukrainian)
- Савчук А., Сова Н. Переробка полівінілхлориду в умовах циклічної економіки. *Technologies and Engineering*. 2024. №3. С. 127–141. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.10>
- Tarkett. (2024). iQ Toro SC: Technical data sheet. Tarkett Group. <https://www.tarkett.ua/uk UA/>

Received: 10.06.2026. Accepted: 25.07.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Черниченко Я., Ловас Г. Вплив миючих засобів на електричний опір ПВХ підлог в медичній галузі та електронній промисловості. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 255-263. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.18>

Cite this article in APA style as:

Chernychko, J., & Lovász, G. (2026). Vplyv myiuchykh zasobiv na elektrychnyi opir PVKh pidloh v medychnii haluzi ta elektronnii promyslovosti [Effect of general cleaning agents on the resistance of PVC floors used in healthcare and the electronics industry]. *Biota. Human. Technology*, (2), 255-263. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.18> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Chernychko J. [*in Ukrainian: Черничко Я.*] ¹, Magister's degree, MSc, email: csernicsko.jana.b20km@kmf.org.ua
ORCID: 0000-0002-2277-0802

Department of Biology and Chemistry, Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University
6 Kossuth Square, Berehove, 90202, Zakarpattia, Ukraine

Lovász G. [*in Ukrainian: Ловас Г.*] ², candidate of Physical and Mathematical Sciences, email: lovasz.gabor@kmf.org.ua
ORCID: 0009-0009-2344-5364

Department of Biology and Chemistry, Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University
6 Kossuth Square, Berehove, 90202, Zakarpattia, Ukraine

¹ Selection and preparation of research materials, conducting experiments, data collection and curation, data analysis, and writing the original draft of the manuscript.

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

UDC 579.222:582.284:577.152.3

DOI: 10.58407/bht.2.26.19



Copyright (c) 2026 Pavlo Zubyk, Inna Klechak

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/).

Павло Зубик, Інна Клечак

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ КУЛЬТИВУВАННЯ
TRAMETES HIRSUTA IBK 1569 ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПЕКТИНЕСТЕРАЗИ
ЯК ЧАСТИНИ ПЕКТИНОЛІТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ



Pavlo Zubyk, Inna Klechak

STUDY OF THE INFLUENCE OF CULTIVATION CONDITIONS OF
TRAMETES HIRSUTA IBK 1569 FOR OBTAINING PECTINESTERASE
AS PART OF THE PECTINOLYTIC COMPLEX

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідити умови біосинтезу пектинестерази штамом *Trametes hirsuta* IBK 1569 за умов глибинного культивування.

Методологія. Досліджували вплив тривалості культивування, лігноцелюлозних відходів як джерел вуглецю, їх концентрації та розміру частинок, джерела і концентрації азоту, початкового значення pH середовища, швидкості перемішування та кількості посівного матеріалу на пектинестеразну активність у культуральній рідині *T. hirsuta* IBK 1569. Активність ферменту визначали титриметрично.

Наукова новизна. Встановлено особливості впливу основних параметрів глибинного культивування на синтез пектинестерази *Trametes hirsuta* IBK 1569. Найвище числове значення ПЕА зафіксовано на 9 добу культивування, після чого спостерігалася тенденція до її зниження. Серед досліджених лігноцелюлозних відходів найбільш ефективним джерелом вуглецю був буряковий жом, тоді як мандаринові шкірки забезпечували статистично подібний рівень активності. Найбільш сприятлива концентрація бурякового жому становила 10 г/дм³. Максимальне числове значення ПЕА отримано для частинок бурякового жому розміром 3–5 мм, однак у діапазоні 1–7 мм статистично достовірних відмінностей не встановлено. Високі значення активності забезпечували сечовина, солі амонію, калій нітрат та пептон; для амоній сульфату найбільш сприятливою була концентрація 1,5 г/дм³. Найсприятливішим початковим значенням pH було 6,0. Числове зниження ПЕА спостерігалася вже при 140 об/хв, тоді як за швидкості 160 об/хв і вище активність була статистично достовірно нижчою. Кількість посівного матеріалу в діапазоні 2,5–10 % істотно не впливала на ПЕА.

Висновки. Отримані результати свідчать про доцільність використання бурякового жому для біосинтезу пектинестерази *T. hirsuta* IBK 1569 та можуть бути використані для оптимізації біотехнологічних процесів одержання пектинолітичних ферментів.

Ключові слова: естераза, глибинне культивування, активність ферменту, лігноцелюлозні відходи, параметри культивування

ABSTRACT

Aim of the study. To investigate the conditions for the biosynthesis of pectinesterase by the *Trametes hirsuta* strain IBK 1569 under submerged culture conditions.

Methodology. The effects of cultivation duration, lignocellulosic waste as a carbon source, its concentration and particle size, nitrogen source and concentration, initial medium pH, stirring rate and inoculum quantity on pectinesterase activity in the culture broth of *T. hirsuta* IBK 1569 were investigated. Enzyme activity was determined titrimetrically.

Scientific novelty. The peculiarities of the influence of the main parameters of deep cultivation on the synthesis of pectinesterase *Trametes hirsuta* IBK 1569 were established. The highest numerical value of PEA was recorded on the 9th day of cultivation, after which a tendency to its decrease was observed. Among the studied lignocellulosic wastes, the most effective source of carbon was beet pulp, while tangerine peels provided a statistically similar level of activity. The most favorable concentration of beet pulp was 10 g/dm³. The maximum numerical value of PEA was obtained for beet

pulp particles with a size of 3–5 mm, however, no statistically significant differences were established in the range of 1–7 mm. High activity values were provided by urea, ammonium salts, potassium nitrate and peptone; for ammonium sulfate, the most favorable concentration was 1.5 g/dm³. The most favorable initial pH value was 6.0. A numerical decrease in PEA was observed already at 140 rpm, while at speeds of 160 rpm and above the activity was statistically significantly lower. The amount of seed material in the range of 2.5–10 % did not significantly affect PEA.

Conclusions. The results obtained demonstrate the feasibility of using beet pulp for the biosynthesis of pectinesterase by *T. hirsuta* IBK 1569 and may be utilised to optimise biotechnological processes for the production of pectinolytic enzymes.

Keywords: esterase, submerged cultivation, enzyme activity, lignocellulosic waste, cultivation parameters

Вступ

Пектинестераза, або пектинметилестераза (ЕС 3.1.1.11), належить до ферментів пектинолітичного комплексу та каталізує деестерифікацію пектинових речовин клітинної стінки рослин. Основним субстратом ферменту є пектин – складний полісахарид, основу якого становлять залишки D-галактуранової кислоти, частина карбоксильних груп яких естерифікована метанолом.

Пектинметилестераза гідролізує метилові естери пектину з утворенням деметоксильованого пектину та метанолу, змінюючи ступінь естерифікації полімеру, його заряд, розчинність і здатність до подальшого ферментативного розщеплення (Jayani et al., 2005; Manmohit Kalia, 2015).

Для пектинметилестерази є важливою для функціонування всього пектинолітичного комплексу, оскільки деметильований пектин стає більш доступним для полігалактуронази і пектатліази. Завдяки цьому фермент бере участь у деструкції пектинових речовин рослинної сировини та має практичне значення для харчової і переробної промисловості (Garg et al., 2016). Пектинолітичні ферменти, в тому числі естерази, широко застосовують для освітлення фруктових і овочевих соків, зниження в'язкості пектинвмісних розчинів, підвищення виходу соку, покращення фільтрації та переробки рослинної сировини (Sharma et al., 2017).

До синтезу пектинметилестераз здатні рослини, бактерії, дріжджі та гриби, однак саме грибні продуценти становлять значний інтерес для біотехнології завдяки здатності синтезувати позаклітинні пектинолітичні ферменти (Thakur et al., 2021). Найбільш дослідженими продуцентами пектинази є мікроміцети родів *Aspergillus* і *Penicillium*.

Для них показано, що рівень синтезу пектинметилестерази істотно залежить від складу поживного середовища, джерел вуглецю й азоту, початкового рН, температури та тривалості культивування (Mandhania et al., 2009; Pili et al., 2018).

Використання пектинвмісних рослинних субстратів, зокрема агропромислових відходів, є перспективним підходом до здешевлення поживних середовищ і підвищення економічної доцільності отримання ферментних препаратів. Зокрема, цитрусові вичавки та інші рослинні відходи можуть виконувати роль як джерела вуглецю, так і індукторів синтезу пектинолітичних ферментів (Embaby et al., 2014; Kaissar et al., 2025; Mandhania et al., 2009; Pili et al., 2018; Shrestha et al., 2021).

Порівняно з мікроміцетами, базидієві макроміцети як продуценти пектинестерази вивчені значно менше, що було встановлено в нашому попередньому дослідженні (Zubyk et al., 2026c). Водночас результати геномних, транскриптомних і протеомних досліджень свідчать про наявність у представників *Basidiomycota* розвинених ферментних систем, залучених до деструкції пектинової складової рослинної клітинної стінки. Так, у секретах дереворуйнівних базидіоміцетів *Ceriporiopsis subvermispora*, *Gloeophyllum trabeum*, *Phanerochaete chrysosporium* та *Schizophyllum commune* були ідентифіковані пектинметилестерази родини CE8 поряд з іншими пектинолітичними ферментами (Zhu et al., 2016). Дослідження, присвячені синтезу пектинестерази базидієвими макроміцетами, є поодинокими. Деякі наявні роботи стосуються дослідження отримання пектинестерази *Fomitopsis cytisina* (Miyairi et al., 2001), *Schizophyllum commune* (Mehmood et al., 2019) і *Stereum purpureum* (Miyairi et al., 2002).

Особливий інтерес становлять представники роду *Trametes*, які відомі як активні продуценти ферментів деструкції рослинної біомаси та можуть бути перспективними об'єктами для отримання пектинолітичних ферментів (Iandolo et al., 2011; Shakhova et al., 2011; Vršanská et al., 2017). Для *Trametes trogii* показано, що склад джерел вуглецю й азоту, концентрація пектину, початковий рН та інші параметри культивування істотно впливають на продукцію позаклітинних пектинолітичних ферментів (Levin & Forchiassin, 1998). Для *T. versicolor* сучасні секретомні дослідження також підтверджують синтез ферментів, залучених до деградації пектинових речовин, хоча склад пектинолітичної системи та профіль секреції істотно залежать від виду гриба і стадії освоєння рослинного субстрату (Presley et al., 2018).

Для *T. hirsuta* IBK 1569 раніше була підтверджена здатність до синтезу пектинестерази та інших пектинолітичних ферментів за умов глибинного культивування, що стало підставою для подальшого дослідження цього штаму як потенційного продуцента пектинолітичного комплексу (Zubyk et al., 2026b). Однак систематичних даних щодо впливу умов культивування на синтез пектинестерази *T. hirsuta* IBK 1569 досі не було представлено. Це визначає наукову новизну й актуальність цього дослідження.

Мета роботи: дослідити вплив основних параметрів культивування на синтез пектинестерази грибом *Trametes hirsuta* 1569 у глибинній культурі.

Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження. У роботі використано штам *Trametes hirsuta* 1569, отриманий з Колекції шапинкових грибів Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України (ІБК) (Bisko et al., 2024). Культуру підтримували на агаризованому ячмінно-солодовому екстракті (8° за Баллінгом) за температури 4 °C.

Підготовка посівного матеріалу. Посівний матеріал вирощували у колбах об'ємом 250 см³ у 50 см³ глюкозо-пептоно-дріжджового середовища згідно з (Bondaruk et al., 2025) за температури (28 ± 2) °C упродовж 7 діб.

Базові умови культивування. Базове поживне середовище складалося з (г/дм³): пектин (10,0), NH₄NO₃ (1,0), KH₂PO₄ (1,0), MgSO₄×7H₂O (0,5), FeSO₄×7H₂O (0,005), ZnSO₄×7H₂O (0,0044), CaCl₂ (0,0055), вихідне рН – 6,5. Середовище автоклаували за 121 °C протягом 15 хв (Danylyak et al., 1989). Глибинне культивування здійснювали у колбах Ерленмейера об'ємом 250 см³ з 50 см³ середовища без перемішування за температури 28 °C.

Підбір умов культивування. Умови культивування підбирали послідовно методом «один фактор за раз» (one-factor-at-a-time, OFAT) для максимізації виходу пектинестерази (Oumer & Abate, 2017). Дослідження було спрямоване на встановлення впливу окремих факторів та визначення сприятливих умов синтезу пектинестерази як складової пектинолітичного комплексу *T. hirsuta* IBK 1569, а не на визначення оптимальної комбінації параметрів виключно за пектинестеразною активністю. На кожному етапі змінювали лише один параметр, тоді як інші фактори підтримували на рівнях, визначених як оптимальні на попередніх етапах цього дослідження. Концентрацію солей KH₂PO₄, MgSO₄×7H₂O, FeSO₄×7H₂O, ZnSO₄×7H₂O, CaCl₂ і температуру культивування встановлювали на вихідному рівні. Параметри змінювали в наступному порядку: тривалість культивування, джерело вуглецю, його концентрація та розмір, джерело азоту, його концентрація, вихідний рівень рН, швидкість перемішування та кількість внесення посівного матеріалу.

За відсутності статистично достовірних відмінностей між декількома рівнями фактора (р > 0,05) для наступних серій використовували один із рівнів статистично однорідної групи. В окремих випадках, коли рівень фактора, що забезпечував максимальне значення пектинестеразної активності, не збігався з умовами, сприятливими для синтезу інших складових пектинолітичного комплексу цього штаму, для наступних скринінгових серій використовували компромісний робочий рівень з урахуванням раніше встановлених і опублікованих результатів (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Тому максимальні значення, встановлені для окремих факторів, розглядали як фермент-специфічні, тоді як

рівні, використані на наступних етапах, - як робочі умови скринінгу комплексного пектинолітичного препарату.

Тривалість культивування. Для визначення оптимальної тривалості культивування колби інкубували у базовому поживному середовищі за початкових умов протягом 1–21 діб з кроком 2 доби. Подальші культивування проводили протягом оптимальної тривалості, визначеної в цьому досліді.

Джерело вуглецю, його розмір та концентрація. Сільськогосподарські та промислові відходи оцінювали як альтернативні джерела вуглецю за концентрації 1 % (мас./об. сухої маси): буряковий жом, виноградні вичавки, гранатові шкірки, дробина ячмінно-житня, дробина ячмінно-пшенична, мандаринові шкірки, шкірки помело, яблучні вичавки. Відходи сушили за температури 60 °С, подрібнювали до розміру 0–1 мм. Визначене оптимальне джерело вуглецю використовували для подальших досліджень. Концентрацію обраного джерела вуглецю визначали шляхом культивування базидієвого макроміцета на поживному середовищі з різним вмістом цього компонента: від 5 г/дм³ до 35 г/дм³ з кроком 5 г/дм³. Оптимальну концентрацію джерела вуглецю використовували у подальших дослідженнях. Розмір частинок обраного джерела вуглецю підбирали, використовуючи такі фракції: 0–1 мм, 1–3 мм, 3–5 мм, 5–7 мм та 7–10 мм. Визначений оптимальний розмір частинок джерела вуглецю використовували у подальших дослідженнях.

Джерело та концентрація азоту. Якісний склад джерела азоту перевіряли за концентрації 1 % (мас./об.). В цьому дослідженні використовували наступні речовини: KNO₃, (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃, Ca(NO₃)₂, казеїн, сечовина, дріжджовий екстракт, пептон. Концентрацію обраного джерела азоту визначали шляхом культивування базидієвого макроміцета на поживному середовищі з різним вмістом цього компонента: від 0,5 г/дм³ до 3,0 г/дм³ з кроком 0,5 г/дм³. Оптимальну концентрацію джерела азоту використовували у подальших дослідженнях.

pH середовища. Вихідне значення pH поживного середовища після автоклавування складало 5,8–6,1. Перед початком

культивування його встановлювали на рівні від 3,0 до 9,0 з кроком 1,0 на оптимальному складі середовища. Визначене оптимальне значення pH використовували у подальших дослідженнях.

Швидкість перемішування. Швидкість перемішування змінювали від 100 до 200 об/хв з кроком 20 об/хв на орбітальному шейкері. Визначене оптимальне значення швидкості перемішування використовували у подальших дослідженнях.

Кількість внесеного посівного матеріалу. Посівний матеріал вносили в кількості 1 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % та 10 % (об./об.). Встановлювали оптимальне значення кількості посівного матеріалу.

Визначення активності ферменту. Для визначення активності пектинестерази в культуральній рідині використовували 1 % розчин пектину. За одиницю пектинестеразної активності (ПМЕ, од) приймали таку кількість ферменту, що каталізує утворення 1 мкЕк кислоти за хвилину (Dudka et al., 1982).

Після цього розраховували відносну активність пектинестерази за формулою (Oumer & Abate, 2018):

$$v_{ПЕА} = \frac{ПЕА}{\max(ПЕА)} \cdot 100\%$$

Статистична обробка. Статистичну обробку даних проводили, використовуючи критерій Дункана. Усі експерименти виконувалися в трьох повторностях, результати представлені у вигляді $M \pm m$ (середнє значення $\pm$ стандартне відхилення), отриманих за трьома вимірюваннями ($n = 3$). Результати вважалися статистично відмінними при значенні $p\text{-value} < 0,05$. Літери a, b, c, d... вказують на відмінності між даними: $p < 0,05$ за критерієм Дункана.

Обробку даних і побудову графіків здійснювали за допомогою програмного забезпечення Excel (США).

Результати дослідження та обговорення

Динаміку синтезу пектинестерази штамом *Trametes hirsuta* 1569 досліджували упродовж 21 доби культивування у базовому поживному середовищі (рис. 1).

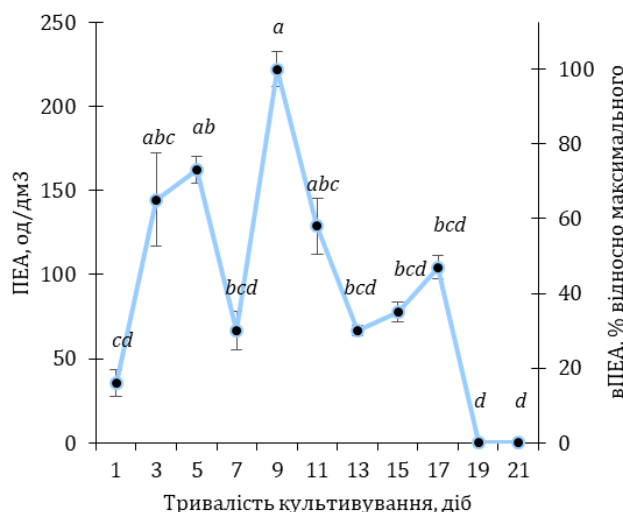


Рис. 1. Динаміка синтезу пектинестерази *Trametes hirsuta* 1569.

Примітка: Різні літери позначають статистично достовірні відмінності між середніми значеннями за критерієм Дункана при $p < 0,05$

Активність ферменту значно коливалася в процесі росту міцелію та досягала максимуму на 9 добу культивування ($222,2 \pm 10,1$ од./дм³). Подальше культивування супроводжувалося зниженням значень ПЕА. З огляду на отримані

результати, у подальших дослідженнях тривалість культивування склала 9 діб.

Вплив лігноцелюлозних відходів як джерел вуглецю, їх концентрації та розміру на синтез ПЕ *Trametes hirsuta* 1569 наведено на рис. 2.

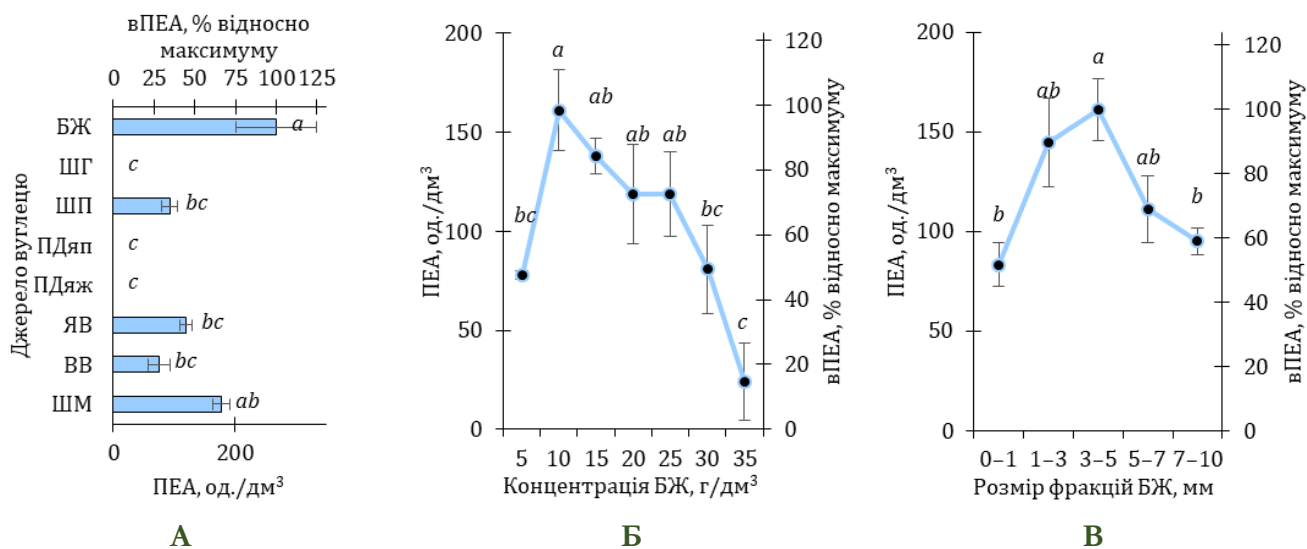


Рис. 2. Вплив параметрів джерела вуглецю на синтез пектинестерази *Trametes hirsuta* ІВК 1569. А – тип джерела вуглецю; Б – концентрація джерела вуглецю; В – розмір частинок субстрату

Примітка: БЖ – буряковий жом, ШГ – шкірки гранату, ШП – шкірки помело, ПДяп – пивна дробина (ячмінно-пшенична), ПДяж – пивна дробина (ячмінно-житня), КЛ – кукурудзяне лущиння, ЯВ – яблучні вичавки, ВВ – виноградні вичавки, ШМ – шкірки мандарину. Різні літери позначають статистично достовірні відмінності між середніми значеннями за критерієм Дункана при $p < 0,05$

Найвищу активність ПЕ було зафіксовано при використанні бурякового жому ($268,5 \pm 66,4$ од./дм³). Статистично однакові значення ($p > 0,05$) до зафіксованих при культивуванні на середовищі з додаванням бурякового жому спостерігалися для середовищ, що містили мандаринові шкірки ($177,8 \pm 14,7$ од./дм³); тоді як активність на шкірках помело, виноградних та яблучних вичавках, кукурудзяному лушпинні була більш, ніж вдвічі нижчою (рис. 2. А). Інші, досліджувані в цій роботі джерела вуглецю не індукували синтез пектинестерази. Отже, для подальших експериментів як джерело вуглецю було обрано буряковий жом. Підвищення концентрації субстрату від 5 г/дм³ до 10 г/дм³ супроводжувалося зростанням ферментативної активності ПЕ вдвічі (рис. 2. Б). Подальше підвищення концентрації субстрату понад 10 г/дм³ призводило до суттєвого спадання активності ферменту. Водночас, активність за концентрацій 10–25 г/дм³ статистично не відрізнялася за критерієм Дункана ($p > 0,05$). Таким чином, концентрацію джерела вуглецю 10 г/дм³ було обрано оптимальною для подальших досліджень.

Ферментативна активність *T. hirsuta* 1569 також залежала від розміру частинок

бурякового жому (рис. 2. В). Максимальне числове значення ПЕА зафіксовано для частинок бурякового жому розміром 3–5 мм ($161,1 \pm 15,6$ од./дм³). Водночас у діапазоні 1–7 мм статистично достовірних відмінностей між значеннями ПЕА не встановлено ($p > 0,05$), тому однозначний оптимум розміру частинок у цьому інтервалі не визначався. Для наступних дослідів як робочу фракцію використовували частинки розміром 1–3 мм, що входили до статистично однорідної групи.

Крім джерела вуглецю, значну роль у синтезі ПЕ відігравало джерело азоту (рис. 3. А). Найвище числове значення активності досліджуваного ферменту в культуральній рідині спостерігалось після культивування *T. hirsuta* 1569 на середовищі з додаванням сечовини як джерела азоту – $184,3 \pm 18,3$ од./дм³. Водночас амоній нітрат, амоній сульфат, пептон і калій нітрат забезпечували статистично подібні значення ПЕА ($p > 0,05$), тому однозначної переваги сечовини серед цих джерел азоту не встановлено. Інші досліджені джерела знижували активність ферменту на близько 60 %.

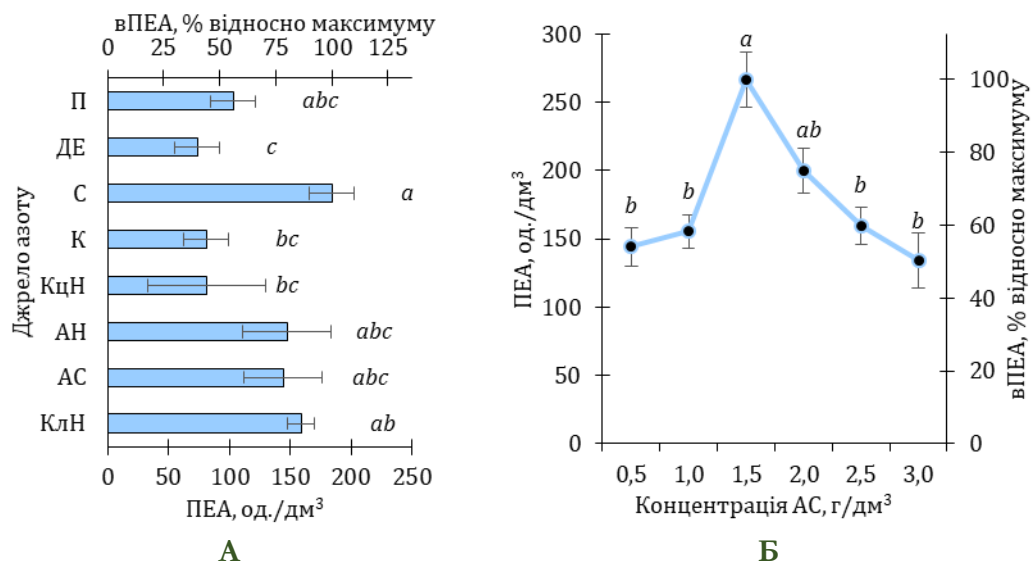


Рис. 3. Вплив параметрів джерела азоту на синтез пектинестерази *Trametes hirsuta* IBK 1569. А – тип джерела азоту; Б – концентрація амонію сульфату

Примітка: П – пептон, ДЕ – дріжджовий екстракт, С – сечовина, К – казеїн, КцН – кальцію нітрат, АН – амоній нітрат, АС – амоній сульфат, КлН – калій нітрат.

Різні літери позначають статистично достовірні відмінності між середніми значеннями за критерієм Дункана при $p < 0,05$

Оскільки амоній сульфат забезпечував значення ПЕА, статистично подібне до максимального рівня, одержаного при використанні сечовини ($p > 0,05$), його було обрано як робоче джерело азоту для подальших досліджень. Такий вибір також враховував технологічну зручність використання амоній сульфату як компонента поживного середовища. Максимальну активність ПЕ (рис. 3. Б) було зафіксовано за концентрації амонію сульфату $1,5 \text{ г/дм}^3$ – $266,7 \pm 20,2 \text{ од./дм}^3$, що перевищувало показники за інших концентрацій на 25–50 % ($p < 0,05$). Таким чином, цю концентрацію можна вважати найбільш сприятливою саме для синтезу ПЕ за досліджених умов. Водночас раніше для цього самого штаму *T. hirsuta* IBK 1569 було встановлено, що максимальна ендополігалактуронозна активність досягалася за

концентрації амонію сульфату $1,0 \text{ г/дм}^3$ (Zubyk & Klechak, 2026), тоді як для пектинліази найбільш сприятливим був діапазон $0,5\text{--}1,0 \text{ г/дм}^3$ (Zubyk et al., 2026a). Тому з урахуванням спрямованості подальших досліджень на одержання комплексного пектинолітичного препарату концентрацію $1,0 \text{ г/дм}^3$ використовували як компромісний робочий рівень у наступних серіях дослідів, а не як специфічний оптимум для пектинестерази.

Відзначається незначний вплив рН поживного середовища на синтез ПЕ *T. hirsuta* 1569 (рис. 4. А). Найвищі значення ПЕА спостерігалися в кисло-нейтральному діапазоні: $127,8\text{--}187,4 \text{ од./дм}^3$. Більш лужне середовище вдвічі зменшувало активність ПЕ. Таким чином, для подальших досліджень було обрано вихідне значення рН поживного середовища на рівні 6,0.

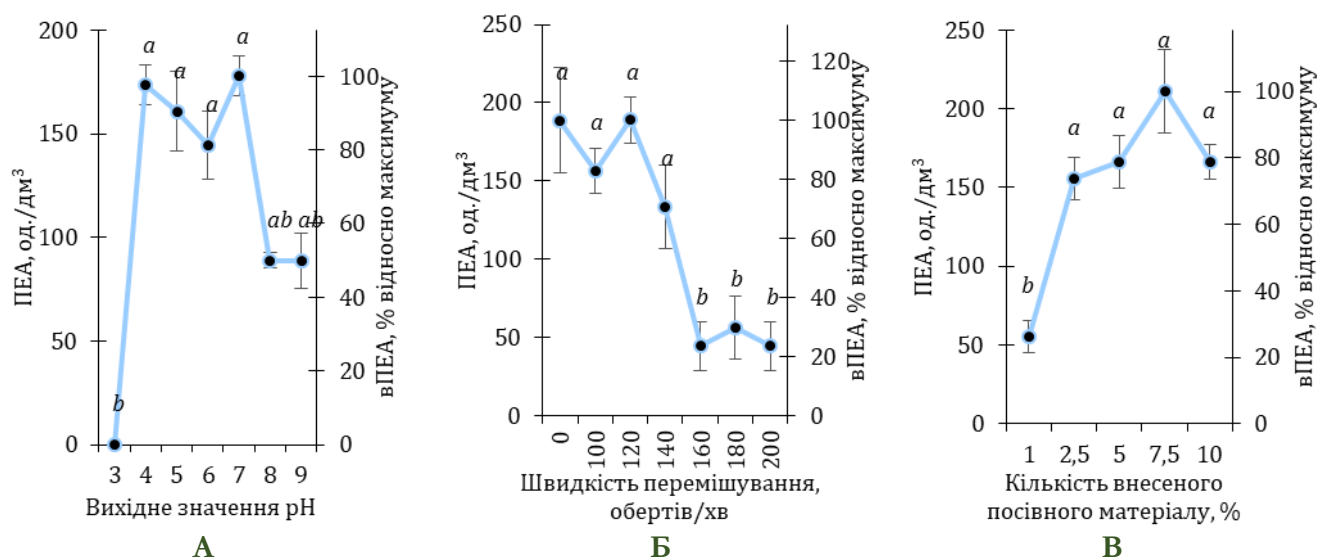


Рис. 4. Вплив умов культивування на синтез пектинестерази *Trametes hirsuta* IBK 1569. А – початкове значення рН середовища; Б – швидкість перемішування; В – кількість посівного матеріалу

Примітка: Різні літери позначають статистично достовірні відмінності між середніми значеннями за критерієм Дункана при $p < 0,05$.

Також досліджено вплив перемішування для інтенсифікації виходу ПЕ. Згідно рис. 4. Б спостерігається різний ефект перемішування, який значно залежав від швидкості обертання шейкера. Максимальне значення ферментативної активності спостерігалось за відсутності та повільного перемішування ($106,7\text{--}$

$222,2 \text{ од./дм}^3$). Активність ПЕ зменшувалася на понад 70 % при понад 160 об/хв. Зважаючи на неопубліковані дані щодо ендополігалактуронознаї та пектинліазної активності, подальші дослідження проводили за швидкості перемішування

Кількість посівного матеріалу в діапазоні 2,5–10 % істотно не впливала на синтез пектинестерази ($p > 0,05$), тоді як за найменшої дослідженої кількості інокуляту (1 %) ПЕА була статистично нижчою та більш ніж утричі поступалася значенням, отриманим за вищих рівнів внесення посівного матеріалу (рис. 4. В). Таким чином, однозначного оптимуму в межах 2,5–10 % за критерієм ПЕА не встановлено. Для подальших досліджень як робочий рівень було обрано 5 % інокуляту, що входив до статистично однорідного діапазону та узгоджувався з раніше опублікованими результатами щодо інших складових пектинолітичного комплексу *T. hirsuta* IBK 1569 (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Отже, 5 % інокуляту розглядали як спільний робочий параметр для подальшого дослідження пектинолітичного комплексу, а не як специфічний оптимум синтезу пектинестерази.

Пектинестераза є одним із ключових ферментів пектинолітичного комплексу, оскільки каталізує деестерифікацію метоксильованих залишків галактуронової кислоти у складі пектину та формує субстрат для подальшої дії полігалактуронази і пектатліаз (Manmohit Kalia, 2015). Тому особливості біосинтезу пектинестерази *T. hirsuta* IBK 1569 доцільно розглядати в контексті здатності цього макроміцета синтезувати комплекс позаклітинних ферментів, зокрема пектинолітичних, залучених до деградації компонентів рослинної клітинної стінки.

Відносно пізнє накопичення ПЕ може бути пов'язане з послідовним залученням позаклітинних ферментів у процесі освоєння грибом рослинного субстрату. Для *T. hirsuta* показана здатність формувати складний секретом, до якого входять ферменти деградації полісахаридів рослинної клітинної стінки, а його склад змінюється залежно від субстрату та стадії культивування (Vasina et al., 2016). Зниження активності після її максимального накопичення може бути наслідком виснаження доступних індукуючих компонентів, зміни фізіологічного стану культури або часткової інактивації секретованих ферментів. Подібна динаміка накопичення позаклітинних ферментів характерна для міцеліальних грибів за тривалого культивування (El Enshasy et al., 2018).

Виражений вплив природи джерела вуглецю, ймовірно, пов'язаний не лише з його поживною цінністю, але й зі здатністю окремих компонентів рослинної сировини індукувати синтез ферментів, необхідних для її деградації. Буряковий жом містить поряд із целюлозою та геміцелюлозами значну частку пектинових речовин, що робить його придатним субстратом для індукції пектинолітичної системи грибів (Marzo-Gago et al., 2023). Синтез ферментів у відповідь на присутність відповідних індукторів, наявних у складі лігноцелюлозної сировини, показано для грибних секретів (Filiatrault-Chastel et al., 2021). Аналогічно, транскриптомні дослідження базидієвих макроміцетів родів *Lentinus*, *Phlebia*, *Schizophyllum* тощо вказують на індукцію пектинестераз у відповідь на присутність пектинвмісних субстратів (Kuuskeri et al., 2016; Ravichandran et al., 2020; Zhu et al., 2016).

Зокрема, при культивуванні *Penicillium purpurogenum* на буряковому жомі індукувався комплекс ферментів, пов'язаних із деградацією пектинової фракції, включаючи естерази (Mardones et al., 2019). Висока індукційна здатність бурякового жому також узгоджується з результатами Heerd et al., які показали ефективність пектин-багатих агропромислових субстратів, зокрема бурякового жому, для отримання пектинолітичних ферментів (Heerd et al., 2014). Це може пояснювати вищу ПЕА *T. hirsuta* IBK 1569 саме на буряковому жомі порівняно з іншими лігноцелюлозними відходами.

Подібна реакція культури на мандаринові шкірки також може пояснюватися значним вмістом пектинових речовин у цитрусових відходах. Цитрусові шкірки розглядають як перспективну сировину для одержання пектину та індукції синтезу пектинолітичних ферментів (Ravindran et al., 2018). Водночас ефективність різних агропромислових відходів визначається не лише загальним вмістом пектину, але й його структурою, ступенем метоксильовання та ацетилювання, а також доступністю полісахариду у складі клітинної стінки. Такі відмінності можуть пояснювати нижчу індукційну здатність яблучних і виноградних вичавок (Xu et al., 2022).

Залежність ПЕА від кількості бурякового жому в середовищі може відображати баланс між індукцією ферментного синтезу та

фізичними обмеженнями, що виникають при збільшенні вмісту твердої фази. Підвищення концентрації пектиновмісного субстрату збільшує кількість потенційного індуктора, однак його надлишок у глибинній культурі може ускладнювати перемішування й масообмін, збільшувати неоднорідність середовища та обмежувати перенесення кисню до міцелію. Подібні ефекти описані при культивуванні міцеліальних грибів на рослинних субстратах (El Enshasy et al., 2018). Це може пояснювати відсутність подальшого посилення синтезу ПЕ при збільшенні вмісту бурякового жому понад найбільш сприятливий рівень.

Відсутність виражених відмінностей ПЕА в широкому діапазоні розміру частинок свідчить, що в досліджених умовах хімічний склад бурякового жому, ймовірно, мав більше значення для індукції ферменту, ніж ступінь його подрібнення. Водночас розмір частинок може впливати на площу доступної поверхні, дифузії компонентів середовища, аерацію та характер колонізації субстрату міцелієм. Подібний вплив цього параметра показано для базидієвого макроміцета *Daedalea flavida*, причому сприятливий розмір частинок залежав від досліджуваної ферментативної системи (Meehnian et al., 2016). Вибір розміру фракції бурякового жому також обґрунтовується на раніше опублікованих результатах дослідження інших складових пектинолітичного комплексу *T. hirsuta* IBK 1569. Зокрема, для ендополігалактуронази максимальну активність було встановлено при використанні бурякового жому з розміром частинок 1–3 мм, тоді як для пектинліази активність у межах фракцій 0–3 мм статистично не відрізнялася (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Це підтверджує доцільність розгляду розміру частинок як технологічного параметра комплексного синтезу ферментів, а не лише як специфічного фактора синтезу ПЕ.

Вплив природи джерела азоту на синтез ферментів може бути пов'язаний із відмінностями в шляхах його асиміляції та регуляції вторинного метаболізму. Здатність *T. hirsuta* IBK 1569 підтримувати високий рівень ПЕА за використання як органічних, так і деяких неорганічних форм азоту свідчить про достатньо широку метаболічну пластичність штаму. Для

грибних продуцентів пектиназ характер джерела азоту є штамоспецифічним, а його вплив може відрізнятися навіть для окремих ферментів одного пектинолітичного комплексу (Mat Jalil et al., 2023). Це також узгоджується з раніше встановленими для *T. hirsuta* IBK 1569 відмінностями у відповідях окремих пектинолітичних активностей на склад азотного живлення (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026).

Залежність ПЕА від концентрації амоній сульфату свідчить про необхідність збалансованого забезпечення культури доступним азотом. За його дефіциту може обмежуватися синтез клітинного та секретованого білка, тоді як надлишкове азотне живлення здатне спрямовувати метаболічні ресурси на накопичення біомаси або змінювати регуляцію синтезу позаклітинних гідролаз (Amin et al., 2019). Водночас відмінність найбільш сприятливої концентрації для ПЕ від раніше встановлених рівнів для інших компонентів пектинолітичного комплексу *T. hirsuta* IBK 1569 вказує на те, що окремі ферменти комплексу можуть по-різному реагувати на азотне живлення (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Саме тому при формуванні комплексного препарату доцільним є використання компромісних умов, а не незалежна максимізація лише однієї активності.

Відносно слабкий вплив вихідного рН на синтез ПЕ *T. hirsuta* 1569 відрізняє цей фермент від полігалактуроназ і пектинліаз, які часто демонструють чіткіший рН-залежний характер біосинтезу (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Максимальні значення ПЕА у кисло-нейтральному діапазоні відповідають загальним властивостям грибних пектинолітичних ферментів, для яких слабкокислі умови є найбільш сприятливими для росту продуцента, секреції білків та стабільності ферментів (Owusu Boakye & Domakyaara Zakraa, 2025). Подібні значення рН описані і для синтезу пектинметилестерази макроміцетом *Schizophyllum commune*, що свідчить про подібність фізіології деяких представників відділу *Basidiomycota* до синтезу цього ферменту (Mehmood et al., 2019).

Чутливість синтезу ПЕ до інтенсивності перемішування, ймовірно, пов'язана зі специфічною морфологією

міцеліальної культури. З одного боку, перемішування покращує перенесення кисню та поживних компонентів, а з іншого – надмірні гідродинамічні навантаження можуть спричиняти фрагментацію гіфів, зміну розміру та структури міцеліальних агрегатів і, відповідно, впливати на секрецію позаклітинних ферментів. Морфологія міцелію розглядається як один із ключових чинників продуктивності глибинних культур грибів (Lu et al., 2024). Аналогічний зв'язок між інтенсивністю перемішування, морфологією міцелію та синтезом ферментів описаний для інших міцеліальних грибів (Kheirkhah et al., 2023).

Відсутність суттєвого впливу кількості інокулюму в діапазоні понад 2,5–10 % вказує, що після досягнення мінімальної стартової біомаси синтез ПЕ визначається переважно складом середовища та умовами культивування, а не кількістю внесеного міцелію. Подібні результати описані для грибної продукції пектиназ, де інокулюм впливає насамперед на тривалість лаг-фази та швидкість колонізації субстрату, але не завжди забезпечує пропорційне підвищення ферментативної активності (van Kuijk et al., 2016).

Загалом отримані результати демонструють, що окремі параметри культивування неоднаково впливають на синтез ПЕ *T. hirsuta* IBK 1569. Найбільш виражений ефект був пов'язаний із природою поживних компонентів та гідродинамічними умовами, тоді як для частини факторів спостерігали широкі діапазони статистично подібної активності. Порівняння з раніше встановленими закономірностями синтезу інших пектинолітичних ферментів цього штаму свідчить, що їх індивідуальні сприятливі умови не завжди збігаються. Тому при розробленні технології одержання комплексного пектинолітичного препарату доцільним є подальше багатофакторне

оцінювання та пошук компромісної комбінації параметрів, яка забезпечуватиме збалансований рівень декількох ферментативних активностей.

Висновки

Проведений підбір умов культивування показав, що *Trametes hirsuta* IBK 1569 є перспективним продуцентом пектинестерази при глибинному культивуванні на середовищах із лігноцелюлозними агропромисловими відходами. Найбільш придатним серед досліджених джерел вуглецю виявився буряковий жом, тоді як характер азотного живлення та інтенсивність перемішування також суттєво впливали на накопичення ферменту. Водночас у певних діапазонах розміру частинок субстрату, початкового рН та кількості інокуляту пектинестеразна активність залишалася відносно стабільною, що свідчить про можливість вибору робочих параметрів у межах статистично еквівалентних умов.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на багатофакторну оптимізацію умов культивування з одночасним урахуванням активності основних компонентів пектинолітичного комплексу, а також на перевірку встановлених робочих параметрів у ферментері. При масштабуванні особливої уваги потребуватимуть умови аерації та перемішування, оскільки одержані результати засвідчили чутливість синтезу пектинестерази до інтенсивності гідродинамічного впливу.

Перспективним напрямом є також формування комплексного ферментного препарату *T. hirsuta* IBK 1569 із збалансованими пектинестеразною, полігалактуроазною та пектинліазною активностями та подальше дослідження можливостей його практичного застосування.

Фінансування / Funding

Дослідження виконано без залучення зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

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

Дослідження не потребувало розгляду інституційною ревізійною радою, оскільки не передбачало участі людей або використання тварин / Institutional review board approval was not required for this study, as it did not involve human participants or the use of animals.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується, оскільки дослідження не передбачало участі людей / Not applicable, as the study did not involve human participants.

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

Під час підготовки цього рукопису автори використовували GPT-5.5 Thinking, для мовного редагування та перекладу окремих фрагментів тексту англійською мовою. Після використання цього інструменту автори ретельно переглянули і відредагували вміст за потреби та несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію / During the preparation of this manuscript, the authors used GPT-5.5 Thinking, for language editing and translation of selected text fragments into English. After using this tool, the authors carefully reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the final published version.

References

- Amin, F., Bhatti, H. N., & Bilal, M. (2019). Recent advances in the production strategies of microbial pectinases – A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 1017–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.048>
- Bisko, N., Lomberg, M., Mykchaylova, O., & Mytropolska, N. (2024). *IBK Mushroom Culture Collection. Version 1.8*. The IBK Mushroom Culture Collection of the M.G. Kholodny Institute of Botany. <https://doi.org/10.15468/dzdsqu>
- Bondaruk, S. V., Bulava, S. O., Korzh, R. A., Lesyk, D. S., Polovynko, V. V., Fedyk, A. V., & Al-Maali, G. A. (2025). Biotransformation of 2,6-dichloroaniline and 3,5-dichloroaniline by the mycelium of basidiomycetes. *Ukrainian Botanical Journal*, 82(6), 594–603. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj82.06.594>
- Danylyak, N. I., Semichaevsky, V. D., Dudchenko, L. G., & Trutneva, I. A. (1989). *Enzyme systems of higher basidiomycetes*. Naukova Dumka. 280 p. (in Russian)
Ферментные системы высших базидиомицетов / Н. И. Даниляк и др. Наукова Думка. 1989. 280 с.
- Dudka, I. A., Wasser, S. P., Ellanskaia, I. A., Koval, E. Z., Gorbik, L. T., Nikolskaya, E. A., Bilay, V. I., Bilay, T. I., Borisova, V. N., Sivers, V. S., Musich, E. G., Lizak, Y. V., Stryzhevskaya, A. Y., Aizenberg, V. L., Kirillova, L. M., Bezbrodova, S. I., Zaichenko, A. M., Zakordonets, L. A., Meteiko, T. Y., ... Redchits, T. I. (1982). *Metody eksperymentalnoy mykologii*. Naukova Dumka. 551 p. (in Russian)
Методы экспериментальной микологии / И. А. Дудка и др. Наукова Думка. 1982. 551 с.
- El Enshasy, H. A., Elsayed, E. A., Suhaimi, N., Malek, R. A., & Esawy, M. (2018). Bioprocess optimization for pectinase production using *Aspergillus niger* in a submerged cultivation system. *BMC Biotechnology*, 18(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s12896-018-0481-7>

- Embaby, A. M., Masoud, A. A., Marey, H. S., Shaban, N. Z., & Ghonaim, T. M. (2014). Raw agro-industrial orange peel waste as a low cost effective inducer for alkaline polygalacturonase production from *Bacillus licheniformis* SHG10. *SpringerPlus*, 3(1), 327. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-327>
- Filiatrault-Chastel, C., Heiss-Blanquet, S., Margeot, A., & Berrin, J.-G. (2021). From fungal secretomes to enzymes cocktails: The path forward to bioeconomy. *Biotechnology Advances*, 52, 107833. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107833>
- Garg, G., Singh, A., Kaur, A., Singh, R., Kaur, J., & Mahajan, R. (2016). Microbial pectinases: An ecofriendly tool of nature for industries. *3 Biotech*, 6(1), 47. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0371-4>
- Iandolo, D., Piscitelli, A., Sannia, G., & Faraco, V. (2011). Enzyme production by solid substrate fermentation of *Pleurotus ostreatus* and *Trametes versicolor* on tomato pomace. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 163(1), 40–51. <https://doi.org/10.1007/s12010-010-9014-0>
- Heerd, D., Diercks-Horn, S., & Fernández-Lahore, M. (2014). Efficient polygalacturonase production from agricultural and agro-industrial residues by solid-state culture of *Aspergillus sojae* under optimized conditions. *SpringerPlus*, 3(1), 742. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-742>
- Jayani, R. S., Saxena, S., & Gupta, R. (2005). Microbial pectinolytic enzymes: A review. *Process Biochemistry*, 40(9), 2931–2944. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.03.026>
- Kaissar, F. Z., Bouacem, K., Benine, M. L., Mechri, S., Sharma, S. R., Singh, V. K., Bakli, M., Lebouachera, S. E. I., & Emiliani, G. (2025). *Bacillus* pectinases as key biocatalysts for a circular bioeconomy: From green extraction to process optimization and industrial scale-up. *BioTech*, 14(3), 74. <https://doi.org/10.3390/biotech14030074>
- Kheirkhah, T., Neubauer, P., & Junne, S. (2023). Controlling *Aspergillus niger* morphology in a low shear-force environment in a rocking-motion bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 195, 108905. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108905>
- Kuuskeri, J., Häkkinen, M., Laine, P., Smolander, O.-P., Tamene, F., Miettinen, S., Nousiainen, P., Kemell, M., Auvinen, P., & Lundell, T. (2016). Time-scale dynamics of proteome and transcriptome of the white-rot fungus *Phlebia radiata*: growth on spruce wood and decay effect on lignocellulose. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 192. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0608-9>
- Levin, L., & Forchiassin, F. (1998). Culture conditions for the production of pectinolytic enzymes by the white-rot fungus *Trametes troglia* on a laboratory scale. *Acta Biotechnologica*, 18(2), 157–166. <https://doi.org/10.1002/abio.370180213>
- Lu, Z., Chen, Z., Liu, Y., Hua, X., Gao, C., & Liu, J. (2024). Morphological engineering of filamentous fungi: Research progress and perspectives. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34(6), 1197–1205. <https://doi.org/10.4014/jmb.2402.02007>
- Mandhania, S., Jain, V., & Malhotra, S. P. (2009). Culture optimization for enhanced production of microbial pectin methylesterase under submerged conditions. *Asian Journal of Biochemistry*, 5(1), 12–22. <https://doi.org/10.3923/ajb.2010.12.22>
- Manmohit Kalia, P. K. (2015). Pectin methylesterases: A review. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 05(05). <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000227>

- Mardones, W., Callegari, E., & Eyzaguirre, J. (2019). Corncob and sugar beet pulp induce specific sets of lignocellulolytic enzymes in *Penicillium purpurogenum*. *Mycology*, 10(2), 118–125. <https://doi.org/10.1080/21501203.2018.1517830>
- Marzo-Gago, C., Díaz, A. B., & Blandino, A. (2023). Sugar beet pulp as raw material for the production of bioplastics. *Fermentation*, 9(7), 655. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070655>
- Mat Jalil, M. T., Zakaria, N. A., Salikin, N. H., & Ibrahim, D. (2023). Assessment of cultivation parameters influencing pectinase production by *Aspergillus niger* LFP-1 in submerged fermentation. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 21(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s43141-023-00510-z>
- Meehnian, H., Jana, A. K., & Jana, M. M. (2016). Effect of particle size, moisture content, and supplements on selective pretreatment of cotton stalks by *Daedalea flavida* and enzymatic saccharification. *3 Biotech*, 6(2), 235. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0548-x>
- Mehmood, T., Saman, T., Asgher, M., Irfan, M., Anwar, Z., Nadeem, F., & Siddiqua, A. (2019). Optimization of cultural parameters for pectin methylestrase and polygalacturonase production from *Schizophyllum commune* in solid state fermentation. *Bangladesh Journal of Botany*, 48(1), 65–74. <https://doi.org/10.3329/bjb.v48i1.47417>
- Miyairi, K., Nishida, K., Takarae, M., Shikanai, Y., & Okuno, T. (2002). Purification and characterization of pectate lyase I and II from fungus *Stereum purpureum*. *Journal of Applied Glycoscience*, 49(2), 99–106.
- Miyairi, K., Toyoda, M., & Okuno, T. (2001). Purification and characterization of endo- and exopolygalacturonases from *Fomitopsis cytisina*. *Journal of Applied Glycoscience*, 48(2), 105–114.
- Oumer, O. J., & Abate, D. (2017). Characterization of pectinase from *Bacillus subtilis* strain Btk 27 and its potential application in removal of mucilage from coffee beans. *Enzyme Research*, 2017, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2017/7686904>
- Oumer, O. J., & Abate, D. (2018). Comparative studies of pectinase production by *Bacillus subtilis* strain Btk 27 in submerged and solid-state fermentations. *BioMed Research International*, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/1514795>
- Owusu Boakye, S., & Domakyaara Zakpaa, H. (2025). *Bioprocess optimization for pectinase enzymes synthesized from fungal species under solid-state fermentation conditions*. <https://doi.org/10.20944/preprints202501.1905.v2>
- Pili, J., Vargas, C. E. B., Oro, C. E. D., Toniazzi Backes, G., Valduga, E., & Zeni, J. (2018). Synthesis of pectin methylesterase from *Aspergillus niger* in submerged fermentation using citrus pectin and orange peel as inducers. *Industrial Biotechnology*, 14(4), 212–221. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.0013>
- Presley, G. N., Panisko, E., Purvine, S. O., & Schilling, J. S. (2018). Coupling secretomics with enzyme activities to compare the temporal processes of wood metabolism among white and brown rot fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(16). <https://doi.org/10.1128/AEM.00159-18>
- Ravichandran, A., Kolte, A. P., Dhali, A., Gopinath, S. M., & Sridhar, M. (2020). *Transcriptomic analysis of *Lentinus squarrosulus* provide insights into its biodegradation ability*. <https://doi.org/10.1101/2020.09.28.316471>

- Ravindran, R., Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2018). A review on bioconversion of agro-industrial wastes to industrially important enzymes. *Bioengineering*, 5(4), 93. <https://doi.org/10.3390/bioengineering5040093>
- Shakhova, N. V., Golenkina, S. A., Stepanova, E. V., Loginov, D. S., Psurtseva, N. V., Fedorova, T. V., & Koroleva, O. V. (2011). Effect of submerged cultivation conditions and inducers on biosynthesis of extracellular laccase by a *Trametes versicolor* 1666 strain. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47(9), 808–816. <https://doi.org/10.1134/S0003683811090055>
- Sharma, H. P., Patel, H., & Sugandha. (2017). Enzymatic aided extraction and clarification of fruit juices: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1215–1227. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.977434>
- Shrestha, S., Rahman, M. S., & Qin, W. (2021). New insights in pectinase production development and industrial applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(24), 9069–9087. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11705-0>
- Thakur, P., Singh, A. K., Singh, M., & Mukherjee, G. (2021). Extracellular alkaline pectinases production: A review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, e3745. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.3745>
- van Kuijk, S. J. A., Sonnenberg, A. S. M., Baars, J. J. P., Hendriks, W. H., & Cone, J. W. (2016). The effect of particle size and amount of inoculum on fungal treatment of wheat straw and wood chips. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 7(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0098-4>
- Vasina, D. V., Pavlov, A. R., & Koroleva, O. V. (2016). Extracellular proteins of *Trametes hirsuta* st. 072 induced by copper ions and a lignocellulose substrate. *BMC Microbiology*, 16(1), 106. <https://doi.org/10.1186/s12866-016-0729-0>
- Vršanská, M., Voběrková, S., Jiménez Jiménez, A., Strmiska, V., & Adam, V. (2017). Preparation and optimisation of cross-linked enzyme aggregates using native isolate white rot fungi *Trametes versicolor* and *Fomes fomentarius* for the decolourisation of synthetic dyes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 23. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010023>
- Xu, F., Zhang, S., Waterhouse, G. I. N., Zhou, T., Du, Y., Sun-Waterhouse, D., & Wu, P. (2022). Yeast fermentation of apple and grape pomaces affects subsequent aqueous pectin extraction: Composition, structure, functional and antioxidant properties of pectins. *Food Hydrocolloids*, 133, 107945. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107945>
- Zhu, N., Liu, J., Yang, J., Lin, Y., Yang, Y., Ji, L., Li, M., & Yuan, H. (2016). Comparative analysis of the secretomes of *Schizophyllum commune* and other wood-decay basidiomycetes during solid-state fermentation reveals its unique lignocellulose-degrading enzyme system. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0461-x>
- Zubyk, P., & Klechak, I. (2026). Screening of cultivation conditions for *Trametes hirsuta* IBK 1569 for endopolygalacturonase production. *Scientific Herald of Chernivtsy University. Biology (Biological Systems)*, 18(1), 19–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.31861/biosystems2026.01.019>
- Zubyk, P., Nesterenko, O., & Klechak, I. (2026a). Screening of *Trametes hirsuta* IBK 1569 culture conditions for the production of pectin lyase as a component of the pectinolytic complex. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Biology*, 13, 40–51. <https://doi.org/10.15330/jpnbio.13.40-51>

Zubyk, P. R., Dzygun, L. P., & Klechak, I. R. (2026b). Pectinolytic activity of the macromycete *Trametes hirsuta* (Wulfen) Lloyd under surface and submerged cultivation. *Biotechnologia Acta*, 19(2), 53–63. <https://doi.org/10.15407/biotech19.02.053>

Zubyk, P. R., Klechak, I. R., Linovytska, V. M., Titova, L. O., & Dzyhun, L. P. (2026c). Pectinolytic enzymes of Basidiomycota: Genetic basis, culture conditions, biochemical properties, and industrial applications. *Mikrobiolohichni Zhurnal*, 88(1), 83–103. <https://doi.org/10.15407/microbiolj88.01.083>

Received: 19.06.2026. **Accepted:** 12.08.2026. **Published:** 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Зубик П., Клецак І. Дослідження впливу умов культивування *Trametes hirsuta* IBK 1569 для отримання пектинестерази як частини пектинолітичного комплексу. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 264–278. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht2.26.19>

Cite this article in APA style as:

Zubyk, P., & Klechak, I. (2026). Doslidzhennia vplyvu umov kultivuvannia *Trametes hirsuta* IBK 1569 dlia otrymannia pektynesterazy yak chastyny pektynolitichnoho kompleksu [Study of the influence of cultivation conditions of *Trametes hirsuta* IBK 1569 for obtaining pectinesterase as part of the pectinolytic complex]. *Biota. Human. Technology*. (2), 264–278. <https://doi.org/10.58407/bht2.26.19> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Zubyk P. [in Ukrainian: **Зубик П.**] ¹, PhD student, e-mail: pv.zubyk@i.ua

ORCID: 0000-0003-0435-0254

Department of Industrial Biotechnology and Biopharmacy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

3 Academician Yangel'ya Street, Kyiv, Ukraine

Klechak I. [in Ukrainian: **Клецак І.**] ², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof., e-mail: klechak.inna@i.kpi.ua

ORCID: 0000-0002-7382-0259

Department of Industrial Biotechnology and Biopharmacy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

3 Academician Yangel'ya Street, Kyiv, Ukraine

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

² Writing-reviewing, editing, management.

UDC 663.81:579.864:634.723

DOI: 10.58407/bht.2.26.20



Copyright (c) 2026 Iryna Korotkova, Tetiana Chaika, Kateryna Kozhushko, Daria Trystan, Olha Barabolia

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 Короткова, Тетяна Чайка, Катерина Кожушко,
Дар'я Тристан, Ольга Бараболя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ СОКУ ЧОРНОЇ СМОРОДИНИ
КУЛЬТУРОЮ *LACTOBACILLUS PLANTARUM* LP-115



Iryna Korotkova, Tetiana Chaika, Kateryna Kozhushko,
Daria Trystan, Olha Barabolia

STUDY OF BLACK CURRANT JUICE FERMENTATION PROCESS BY
LACTOBACILLUS PLANTARUM LP-115

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідити особливості процесу молочнокислої ферментації соку чорної смородини культурою *Lactobacillus plantarum* LP-115 шляхом оцінювання динаміки фізико-хімічних, мікробіологічних і біохімічних показників для визначення особливостей його перебігу й обґрунтування перспектив використання культури у ферментації плодово-ягідної сировини.

Методологія. Проведено дослідження процесу ферментації соку чорної смородини культурою *L. plantarum* LP-115 у статичних мікроаерофільних умовах. У процесі ферментації оцінювали динаміку активної та титрованої кислотності, чисельності життєздатних клітин, вмісту розчинних цукрів і антиоксидантної активності. Активну та титровану кислотність визначали потенціометричним і титриметричним методами, чисельність життєздатних клітин – методом серійних десятикових розведень із поверхневим висівом на поживне середовище, вміст розчинних цукрів – рефрактометричним методом, антиоксидантну активність – спектрофотометричним методом із використанням DPPH. Взаємозв'язки між дослідними показниками аналізували методом головних компонент (PCA).

Наукова новизна. На основі комплексного аналізу фізико-хімічних, мікробіологічних і біохімічних показників та методу головних компонент встановлено закономірності перебігу ферментаційного процесу й взаємозв'язки між його основними показниками. Підтверджено перспективність використання культури *L. plantarum* LP-115 для ферментації плодово-ягідної сировини.

Висновки. Встановлено, що впродовж ферментації (із фазою найактивнішого метаболізму в інтервалі 12–24 год) чисельність *L. plantarum* LP-115 збільшилася на 2,29 lg КУО/мл. Активний ріст культури супроводжувався переважним споживанням глюкози (зниження на 54,3 %) порівняно з фруктозою (на 40,3 %), інтенсивним кислотоутворенням зі зниженням рН до 2,88, підвищенням титрованої кислотності до 70,2 °Т та зростанням антиоксидантної активності ферментованої основи з 42,5 до 70,6 % унаслідок мікробній біотрансформації фенольних сполук чорної смородини.

Дослідження підтвердило ефективність використання *L. plantarum* LP-115 для ферментації соку чорної смородини, що проявилось в інтенсивному кислотоутворенні, активному рості культури, споживанні розчинних цукрів і підвищенні антиоксидантної активності. Найбільш інтенсивний перебіг процесу відзначено в інтервалі 12–24 год, що дозволяє рекомендувати 24 години як оптимальну тривалість ферментації за досліджених умов.

Ключові слова: сік чорної смородини, *Lactobacillus*, молочнокисла ферментація, титрована кислотність, антиоксидантна активність, споживання вуглеводів, функціональні продукти

ABSTRACT

Purpose of the work. To investigate the characteristics of the lactic acid fermentation of blackcurrant juice by the *Lactobacillus plantarum* LP-115 culture through the evaluation of the dynamics of physicochemical, microbiological, and biochemical parameters in order to determine the features of its course and substantiate the prospects for using the culture in the fermentation of fruit and berry raw materials.

Methodology. The fermentation process of blackcurrant juice by *L. plantarum* LP-115 culture was investigated under static microaerophilic conditions. During fermentation, the dynamics of active and titrated acidity, viable cell counts, soluble sugar content, and antioxidant activity were evaluated. Active and titratable acidity were determined using potentiometric and

titrimetric methods, viable cell counts were enumerated by the serial decimal dilutions followed by surface plating on a culture medium, soluble sugar content was measured refractometrically; and antioxidant activity was determined spectrophotometrically using the DPPH assay. Relationships among the studied parameters were analyzed using principal component analysis (PCA).

Scientific novelty. Based on the integrated analysis of physicochemical, microbiological, and biochemical parameters and the principal component analysis, the patterns of blackcurrant juice fermentation process and the relationships among its key indicators were established. The prospects of *L. plantarum* LP-115 for the fermentation of fruit and berry raw materials was confirmed.

Conclusions. It was established that during fermentation, with the most intensive metabolic activity occurring between 12 and 24 h, the viable cell count of *L. plantarum* LP-115 increased by 2.29 log CFU/mL. Active growth of the culture was accompanied by the predominant consumption of glucose (a decrease of 54.3 %) compared to fructose (by 40.3 %), intensive acid formation with a decrease in pH to 2.88, an increase in titrated acidity to 70.2 °T and an increase in the antioxidant activity of the fermented base from 42.5 to 70.6 % due to microbial biotransformation of blackcurrant phenolic compounds.

The study confirmed the suitability of *L. plantarum* LP-115 for the fermentation of blackcurrant juice, as evidenced by intensive organic acid production, active culture growth, soluble sugar consumption, and increased antioxidant activity. The most intensive phase of the fermentation process occurred between 12 and 24 h, supporting the recommendation of 24 h as the optimal fermentation time under the studied conditions.

Key words: blackcurrant juice, *Lactobacillus*, lactic acid fermentation, titratable acidity, antioxidant activity, carbohydrate consumption, functional foods

Вступ

Ферментація фруктових соків за допомогою бактеріальних культур є одним із перспективних підходів до створення функціональних напоїв, оскільки забезпечує поєднання природних біологічно активних компонентів рослинної сировини з метаболітами, що синтезуються мікроорганізмами під час ферментації. Найбільшого поширення у технологіях ферментації набули представники родів *Lactobacillus* та *Bifidobacterium*, які переважно використовувалися у виробництві ферментованих молочних продуктів. Однак нещодавні дослідження продемонстрували їхню життєздатність і метаболічну активність у рослинних субстратах (Garcia et al., 2020; Žvirdauskienė et al., 2025).

Вибір штамів для виготовлення ферментованих рослинних напоїв визначається їхньою здатністю перетворювати складні вуглеводи та формувати бажані сенсорні властивості продукту (da Silva Vale et al., 2023). Крім того, вони не повинні утворювати небажані метаболіти, сторонні присмаки або біогенні аміни під час ферментації (Buruleanu et al., 2009; Fessard & Remize, 2019). Оскільки властивості обраної бактеріальної культури суттєво впливають на фізико-хімічні та функціональні характеристики кінцевого продукту, вона повинна характеризуватися високою адаптивністю до умов ферментації та позитивно впливати на органолептичний

профіль напою (Terpou et al., 2019; Ayed et al., 2020).

Найчастіше для ферментації рослинної сировини використовують представників родів *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Streptococcus* та термостійкі спороутворювальні бактерії роду *Bacillus*, проте провідне місце у виробництві ферментованих рослинних продуктів займають бактерії роду *Lactobacillus*.

Ферментація фруктових соків молочнокислими бактеріями супроводжується біотрансформацією фенольних сполук, що призводить до підвищення антиоксидантної активності продукту (Selvaraj & Gurumurthy, 2023). Фенольні сполуки діють як потужні антиоксиданти, нейтралізуючи вільні радикали за допомогою певних механізмів, наприклад, перенесення атома водню або перенесення електрона (Wu et al., 2020). Хоча рослинні фенольні сполуки існують переважно у зв'язаних формах, таких як глікозиди, естери або полімери, що обмежує їхню антиоксидантну ефективність, мікробна ферментація може підвищити їхню біодоступність.

Lactobacillus – це грампозитивні, неспороутворювальні, непатогенні бактерії, зазвичай анаеробні або факультативно анаеробні, які метаболізують вуглеводи з утворенням молочної кислоти (Rodríguez et al., 2021), беруть участь у біотрансформації компонентів рослинної сировини, сприяючи

перетворенню білків, целюлози та інші речовин шляхом вивільнення антиоксидантних пептидів та модифікації фенольних сполук (Li et al., 2022; Ayar-Sümer et al., 2024). Крім того, вони синтезують широкий спектр біологічно активних метаболітів, включаючи коротколанцюгові жирні кислоти, аміни, бактеріюцини, вітаміни та екзополісахариди, що сприяє подовженню терміну придатності, покращенню сенсорних властивостей та підвищенню функціональної цінності ферментованої продукції (Anumudu et al., 2024). Зокрема, використання різних штамів *Lactobacillus* під час ферментації грушевого соку забезпечило підвищення антиоксидантної активності та модифікацію фенольного профілю (Han et al., 2021; Wang et al., 2021), полуничного соку – зростання антиоксидантної активності внаслідок збільшення вмісту фенольних сполук (Chen et al., 2023).

Одним із найбільш перспективних представників молочнокислих бактерій для ферментації рослинної сировини є *Lactobacillus plantarum* (Satora et al., 2025). Численні дослідження підтверджують ефективність застосування *L. plantarum* в різних харчових матрицях, від традиційних молочних до інноваційних рослинних (Liu et al., 2024). Автори дослідження (Wu et al., 2020) показали, що під час ферментації яблучного соку за участі *L. plantarum* утворюються леткі сполуки (включаючи спирти, кетони, альдегіди та кислоти), що сприяє зменшенню вмісту небажаних смакових компонентів і покращенню загального сенсорного профілю ферментованого яблучного соку. Процес ферментації чорничного соку з додаванням *L. plantarum* призводить до значного збільшення активності поглинання радикалів DPPH (Dumuta et al., 2025). Ферментація соку шовковиці із застосуванням *L. plantarum* M3 сприяла покращенню його біоактивного профілю (Zhong et al., 2026). Ефективність ферментації фруктової та овочевої сировини також підтверджено для штаму *Lactiplantibacillus plantarum* LMG 17673 (Yi et al., 2021).

Однак, ефективність ферментації визначається не лише вибором бактеріальної культури, але й закономірностями її росту та метаболічної активності. Саме кінетика розвитку мікроорганізмів визначає

швидкість споживання субстрату, накопичення органічних кислот, зміну pH середовища та біотрансформацію фенольних сполук, що безпосередньо впливає на формування функціональних властивостей ферментованого продукту.

В даній роботі використано штам *Lactobacillus plantarum* LP-115, виділений з рослинного матеріалу, який характеризується високою ферментативною активністю, здатністю ефективно адаптуватися до рослинних субстратів та накопичувати значну кількість органічних кислот (DuPont Nutrition & Biosciences, 2018). На відміну від традиційної молочної сировини, рослинний матрикс відзначається високою структурною складністю через наявність клітинних стінок, пектинів і зв'язаних форм фенольних сполук, що вимагає використання ферментативно активних штамів, таких як *L. plantarum*. На сьогодні, штам LP-115 залишається недостатньо вивченим у технологіях ферментації рослинної сировини. Відомі лише окремі дослідження його застосування у виготовленні ферментованої рослинної продукції. Так, ферментація виноградного соку з додаванням молока за допомогою *L. plantarum* LP-115 сприяла усуненню небажаних смакових відтінків та покращенню функціональних властивостей ферментованого напою. Зокрема, після 16 год ферментації спостерігали підвищення вмісту антиоксидантів (543,56 мг/л), незамінних амінокислот (49,66 мг/л) та ненасичених жирних кислот (2774,51 мг/л) (Mirsalami & Alihosseini, 2023).

Як рослинну матрицю для виробництва функціонального напою ми використали сік чорної смородини (*Ribes nigrum* L.) завдяки високому вмісту біологічно активних фітохімічних речовин, включаючи фенольні кислоти, антоціани, флавоноли, гідролізовані та конденсовані таніни та вітамін С, оскільки біотрансформація цих компонентів сприяє підвищенню антиоксидантної активності готового продукту (Laaksonen et al., 2014; Yang et al., 2019), а висока природна кислотність і значний вміст фенольних сполук можуть впливати на перебіг ферментаційного процесу. Незважаючи на значний обсяг досліджень, більшість робіт зосереджена на оцінюванні кінцевих показників якості ферментованих продук-

тів. Натомість закономірності перебігу ферментації, взаємозв'язок між ростом культури, споживанням цукрів, накопиченням органічних кислот і зміною антиоксидантної активності залишаються недостатньо дослідженими.

Матеріали та методи дослідження

Для дослідження використано чорну смородину сорту Софіївська української селекції. Сік чорної смородини отримували шляхом подрібнення свіжих ягід, пресування та подальшої фільтрації. Основні параметри отриманого соку: рН 3,35, титрована кислотність 24,0 °Т, вміст сухих розчинних речовин 15,8 %, вміст розчинних цукрів 40,0 г/л, вміст вітаміну С – 208,2 мг/100 мл. Після пастеризації за температури 72 °С протягом 15 с сік розділяли на дві частини: контрольну та дослідну, до якої вносили інокулят *L. plantarum* LP-115. Штам *Lactobacillus plantarum* LP-115 був отриманий з Української колекції мікроорганізмів (Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України). Ферментацію проводили у статичних мікроаерофільних умовах за температури 37 ± 1 °С протягом 36 год. Інокулят *L. plantarum* LP-115 з концентрацією клітин $\sim 9,12 \lg \text{ КУО/мл}$ ($\approx 1,3 \times 10^9 \text{ КУО/мл}$) вносили в кількості 0,1 % (v/v), що забезпечувало початкову концентрацію бактеріальної культури у ферментаційному середовищі на рівні $6,12 \pm 0,08 \lg \text{ КУО/мл}$.

Активну кислотність (рН) визначали потенціометричним методом за допомогою лабораторного рН-метра (рН-150МІ) відповідно до ДСТУ EN ISO 10523:2022; абсолютна похибка вимірювання рН становила $\pm 0,05$ одиниці рН.

Титровану кислотність визначали методом кислотно-лужного титрування відповідно до ДСТУ ISO 750:2019. Для аналізу відбирали 10 мл зразка соку та титрували стандартизованим 0,1 н NaOH з використанням фенолфталеїну як індикатора. Титровану кислотність виражали у градусах Тернера (°Т) та розраховували за формулою:

$$T = V \cdot 10, \quad (1)$$

де Т – титрована кислотність, °Т;

V – об'єм 0,1 н розчину NaOH, витрачений на титрування, мл.

Визначення чисельності життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 проводили методом серійних десяткових розведень із поверхневим висівом 0,1 мл відповідного розведення на поживне середовище MRS-агар. Посіви інкубували за температури (37 ± 1) °С протягом 48 год, після чого підраховували кількість колонієутворювальних одиниць (КУО). Чисельність життєздатних клітин у кожному зразку визначали у двох паралельних повтореннях і виражали у колонієутворювальних одиницях на 1 мл ферментаційного середовища (КУО/мл), а результати подавали у логарифмічній формі ($\lg \text{ КУО/мл}$).

Чисельність життєздатних клітин розраховували за формулою:

$$N = C / (V \cdot d), \quad (2)$$

де N – чисельність життєздатних клітин, КУО/мл;

C – середня кількість колоній на двох паралельних чашках;

V – об'єм інокуляту, внесеного на поживне середовище (0,1 мл);

d – відповідне десяткове розведення.

Сік перед визначенням ретельно перемішували та доводили до температури приблизно 20 °С ($\pm 0,5$ °С). Перед аналізом із проб видаляли етанол випаровуванням для мінімізації його впливу на показник заломлення. Вміст розчинних цукрів оцінювали рефрактометричним методом за допомогою рефрактометра Аббе за масовою часткою розчинних сухих речовин, визначеною відповідно до ДСТУ ISO 2173:2007. Перерахунок у г/л здійснювали за співвідношенням $1^\circ \text{Brix} \approx 10 \text{ г/л}$.

Оскільки рефрактометричний метод не дає змоги диференційовано визначати окремі моносахариди, орієнтовні концентрації глюкози та фруктози оцінювали за загальним вмістом розчинних цукрів із використанням середнього співвідношення основних моносахаридів у ягодах чорної смородини, наведеного в літературі (46 % глюкози та 54 % фруктози) (Tian et al., 2019).

Антиоксидантну активність визначали спектрофотометрично за методом DPPH відповідно до (Dumuta et al., 2025) із використанням спектрофотометра UV/Vis Precision P2 (Mapada Instruments Co., Ltd.).

Метод ґрунтується на здатності антиоксидантних компонентів ферментованої основи напою відновлювати стабільний радикал 2,2-дифеніл-1-пікрилгідразилу (DPPH). Оптичну густину дослідних і контрольного зразків вимірювали за довжини хвилі $\lambda = 517$ нм. Антиоксидантну активність виражали у відсотках інгібування радикала DPPH та розраховували за формулою:

$$\text{Антиоксидантна активність (\%)} = [1 - D_{\text{зр}}/D_{\text{кон}}] \cdot 100, \quad (3)$$

де $D_{\text{зр}}$, $D_{\text{кон}}$ – оптична густина дослідного і контрольного зразка, відповідно.

Статистичну обробку виконано за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з розрахунком середнього арифметичного значення (SE) та стандартного відхилення (SD). Багатовимірний аналіз взаємозв'язків реалізовано методом головних компонент (PCA). Графічне представлення результатів виконували у програмному середовищі R версії 4.4.3 (R Core Team, 2025).

Результати дослідження та обговорення

Для оцінки ефективності ферментації соку чорної смородини за участю *L. plantarum* LP-115 було досліджено зміну основних фізико-хімічних, мікробіологічних та біохімічних показників ферментаційного середовища в часі. Кінетику процесу оцінювали за зміною активної та титрованої кислотності, динамікою споживання вуглеводів, чисельністю життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 та антиоксидантною активністю ферментованої основи напою.

Одними із основних показників перебігу молочнокислої ферментації є зміна активної (pH) та титрованої кислотності ферментаційного середовища, що відображають інтенсивність метаболічної діяльності молочнокислих бактерій та накопичення органічних кислот у процесі бродіння. Результати дослідження зміни pH під час ферментації соку чорної смородини наведено на рис. 1.

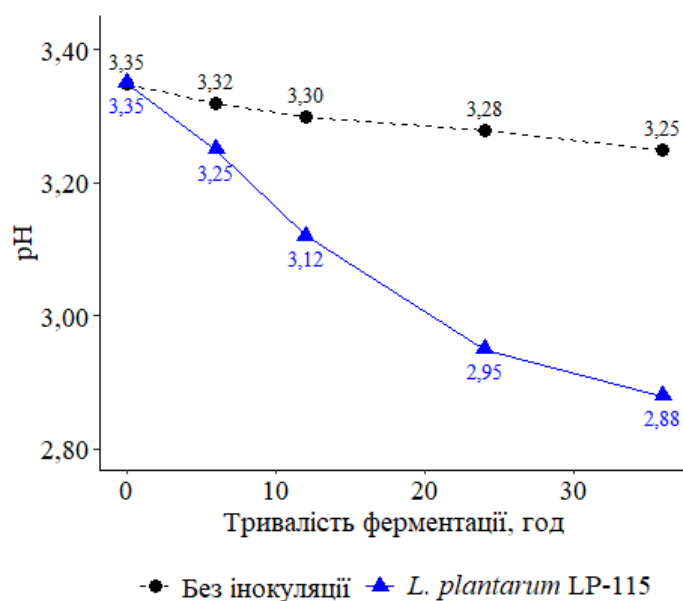


Рис. 1. Кінетика зміни активної кислотності (pH) ферментаційного середовища в процесі культивування *L. plantarum* LP-115 (дані pH наведено як середнє значення $\pm$ SE, $n = 3$)

У всіх дослідних варіантах на початку експерименту значення pH становило 3,35, що зумовлено природною кислотністю соку чорної смородини. У контрольному варіанті, без інокуляції *L. plantarum* LP-115, зміни активної кислотності протягом усього періоду спостережень були незначними: за 36 год

ферментації pH знизився лише до 3,25, що свідчить про відсутність інтенсивних процесів кислотоутворення.

У варіанті з інокуляцією *L. plantarum* LP-115 спостерігалось поступове зниження pH протягом усього періоду ферментації. Уже через 6 год значення pH зменшилося до 3,25, а через

12 год досягло 3,12. Найбільш інтенсивне кислотоутворення відбувалося в інтервалі від 12 до 24 год культивування, коли рН знизився до 2,95. Наприкінці ферментації (36 год) показник досяг мінімального значення 2,88.

Загальне зниження активної кислотності у дослідному варіанті становило 0,47 одиниці, тоді як у контролі лише 0,10 одиниці. Така різниця підтверджує визначальну роль *L. plantarum* LP-115 у процесах кислотоутворення та формуванні мікробіологічної стабільності ферментованого продукту.

Зниження активної кислотності супроводжувалося закономірним підвищенням титрованої кислотності ферментаційного середовища. На відміну від рН, який характеризує активну кислотність середовища, титрована кислотність відображає загальний вміст органічних кислот, насамперед молочної кислоти, а також незначних кількостей оцтової, янтарної та інших органічних кислот, що утворюються в процесі метаболічної діяльності молочнокислих бактерій. У даному дослідженні основним продуктом метаболізму *L. plantarum*

LP-115 є молочна кислота, яка робить найбільший внесок у формування титрованої кислотності ферментаційного середовища.

Як відомо, ефективна ферментація рослинної сировини молочнокислими бактеріями значною мірою залежить від здатності штаму адаптуватися до специфічного рослинного матриксу, інтенсивно споживати наявні вуглеводи та синтезувати органічні кислоти (Fessard & Remize, 2019).

На рис. 2 представлено динаміку титрованої кислотності під час ферментації соку чорної смородини за участю *L. plantarum* LP-115.

У процесі культивування *L. plantarum* LP-115 титрована кислотність поступово зростала від $24,0 \pm 1,0$ °Т на початку ферментації до $70,2 \pm 2,0$ °Т через 36 год. Найбільш інтенсивне підвищення показника спостерігалось в інтервалі 12–24 год, коли титрована кислотність збільшилася з 43,8 до 63,4 °Т, що свідчить про максимальну інтенсивність накопичення органічних кислот у цей період.

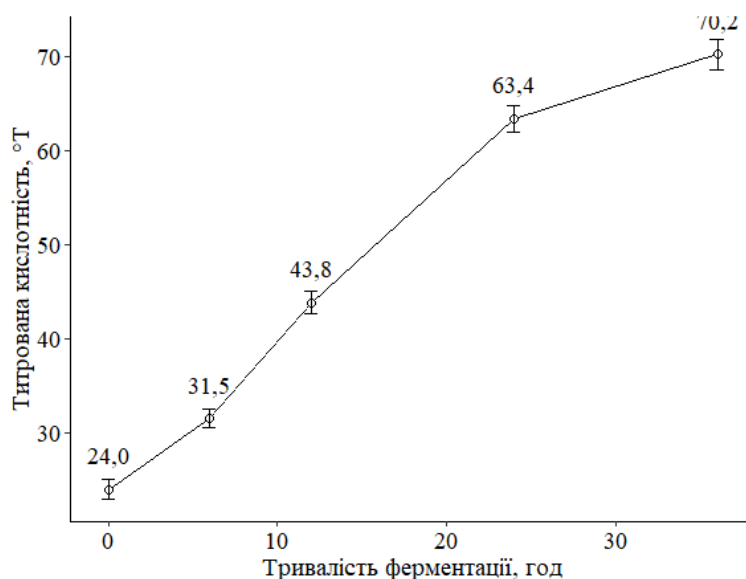


Рис. 2. Титрована кислотність під час ферментації

Таким чином, молочнокисла ферментація соку чорної смородини культурою *L. plantarum* LP-115 супроводжується закономірним зниженням активної кислотності та одночасним підвищенням титрованої кислотності ферментаційного середовища. Найбільш інтенсивні зміни обох показників відбувалися в інтервалі 12–24 год ферментації, що вказує на активне

накопичення органічних кислот у ферментаційному середовищі та ефективний перебіг молочнокислого бродіння.

Оскільки інтенсивність кислотоутворення безпосередньо залежить від росту бактеріальної культури, перебіг ферментаційного процесу оцінювали за динамікою чисельності життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 (рис. 3).

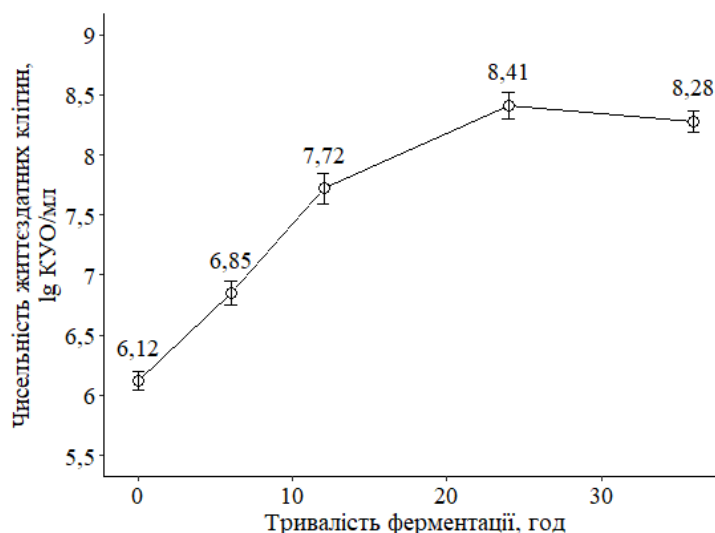


Рис. 3. Динаміка чисельності життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 під час ферментації

Як видно з отриманої графічної залежності, під час ферментації відбувається активний розвиток культури *L. plantarum* LP-115 у ферментаційному середовищі. Початкова чисельність життєздатних клітин становила $6,12 \pm 0,08$ lg КУО/мл і протягом перших 6 год культивування спостерігалось зростання цього показника до $6,85 \pm 0,10$ lg КУО/мл, що свідчить про успішну адаптацію мікроорганізмів до умов середовища та перехід культури до фази активного росту. Через 12 год ферментації чисельність клітин досягла $7,72 \pm 0,13$ lg КУО/мл, а через 24 год було зафіксовано максимальне значення показника – $8,41 \pm 0,11$ lg КУО/мл. Надалі чисельність життєздатних клітин практично не змінювалася і наприкінці ферментації, через 36 год, чисельність життєздатних клітин становила $8,28 \pm 0,09$ lg КУО/мл. Імовірною причиною такого зниження є поступове виснаження поживного середовища та накопиченням органічних кислот, що супроводжувалося зниженням рН до 2,88.

Отримані результати свідчать, що найінтенсивніший ріст *L. plantarum* LP-115 відбувався в інтервалі 12–24 год ферментації, що збігається з періодом найбільш інтенсивного кислотоутворення, встановленого за зміною активної та титрованої кислотності. Загалом за період культивування чисельність життєздатних клітин збільшилася на 2,16 lg КУО/мл, що підтверджує високу адаптаційну здатність штаму до середовища на основі соку чорної смородини та його ефективний розвиток у

процесі ферментації. Швидке накопичення біомаси *L. plantarum* на тлі зниження рН відіграє критичну роль у забезпеченні мікробіологічної безпеки напою, пригнічуючи розвиток патогенної мікрофлори (Anumudu et al., 2024).

Активний ріст бактеріальної культури супроводжувався споживанням природних вуглеводів ферментаційного середовища, які є основним джерелом енергії та вуглецю для молочнокислих бактерій. З огляду на те, що глюкоза та фруктоза є основними ферментованими моносахаридами соку чорної смородини, зміна їх концентрації характеризує інтенсивність використання вуглеводного субстрату *L. plantarum* LP-115 і дає змогу оцінити перебіг метаболічних процесів під час ферментації (рис. 4).

Як видно з графічної залежності, споживання глюкози протягом ферментації відбувалось більш інтенсивно порівняно з фруктозою. Протягом перших 12 год культивування розрахункова концентрація глюкози зменшилася на 22,8 %, тоді як концентрація фруктози – на 17,1 % (з 21,6 до 17,9 г/л), що свідчить про використання обох моносахаридів у процесі ферментації.

Найбільш інтенсивне споживання вуглеводів відбувалося в інтервалі 12–24 год ферментації. За цей період концентрація глюкози зменшилася на 25,4 %, а фруктози – на 17,3 %. Така динаміка узгоджується з фазою найактивнішого росту культури *L. plantarum* LP-115, протягом якої чисельність життєздатних клітин зростає з $7,72 \pm 0,13$ до $8,41 \pm 0,11$ lg КУО/мл (рис. 4).

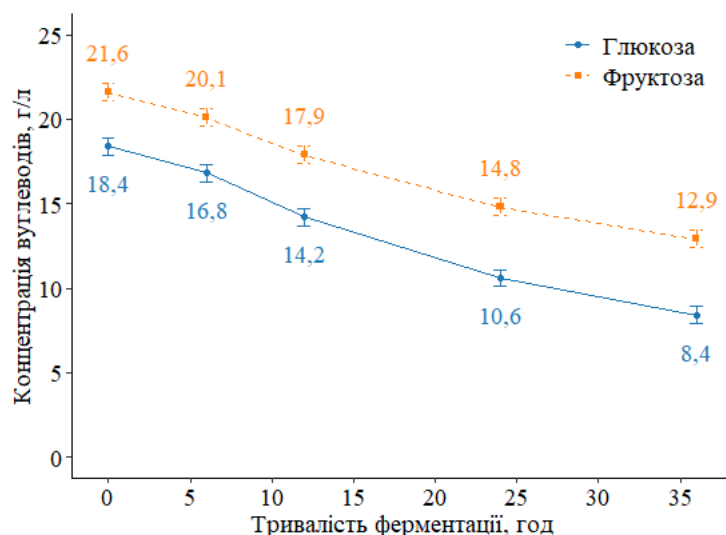


Рис. 4. Динаміка зміни концентрації глюкози та фруктози під час ферментації соку чорної смородини культурою *L. plantarum* LP-115

Наприкінці ферментації (36 год) концентрація глюкози становила 8,4 г/л, а фруктози – 12,9 г/л. Загалом за період культивування концентрація глюкози зменшилася на 54,3 %, тоді як фруктози – на 40,3 %, що свідчить про її більш інтенсивне використання бактеріальними клітинами як джерела енергії та вуглецю.

Отримані результати свідчать про високу метаболічну активність *L. plantarum* LP-115 у середовищі на основі соку чорної смородини. Інтенсивне споживання глюкози та фруктози супроводжувалося зниженням рН середовища та підвищенням титрованої кислотності, що відображає взаємозв'язок між використанням вуглеводного субстрату й перебігом

молочнокислого бродіння й узгоджується з даними інших дослідників, які відзначали високу виживаність і метаболічну активність лактобактерій у фруктових та овочевих соках (Buruleanu et al., 2009; Ayed et al., 2020).

Метаболічна активність *L. plantarum* LP-115, що супроводжується біотрансформацією фенольних сполук, антоціанів та інших біологічно активних компонентів чорної смородини, під час ферментації відображалася не лише зміною фізико-хімічних показників середовища, а й підвищенням антиоксидантної активності ферментованої основи напою, що характеризує її здатність нейтралізувати вільні радикали (рис. 5).

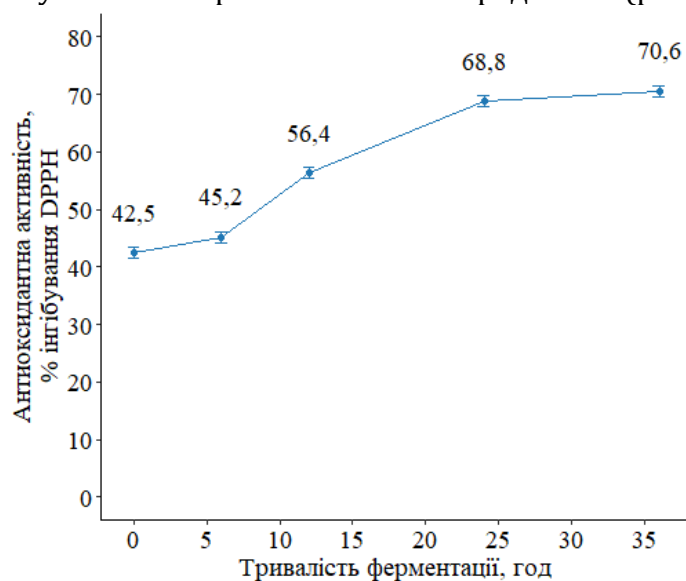


Рис. 5. Динаміка зміни антиоксидантної активності ферментованої основи напою під час ферментації

Як видно з рис. 5, антиоксидантна активність ферментаційного середовища поступово зростала протягом усього періоду культивування. На початку ферментації ступінь інгібування радикалу DPPH становила 42,5 %. Через 6 год цей показник збільшився до 45,2 %, а через 12 год – до 56,4 %, ймовірно через активізацію процесів біотрансформації компонентів рослинного матриксу та підвищення доступності біоактивних сполук.

Динаміка зміни антиоксидантної активності мала нелінійний характер. У перші 6 год ферментації приріст показника був незначним, після чого в інтервалі 6–24 год спостерігалось його найінтенсивніше зростання – від 45,2 до 68,8 %. На завершальному етапі культивування (24–36 год) швидкість підвищення антиоксидантної активності істотно зменшилася, і наприкінці ферментації показник досяг максимального значення – 70,6 %. Загалом порівняно з початком процесу антиоксидантна активність зросла на 66,1 %.

Найбільш значущим результатом нашого дослідження є істотне підвищення антиоксидантної активності ферментованої основи напою, ймовірно пов'язане з ферментативною біотрансформацією компонентів рослинного матриксу, зумовленою особливостями вихідного хімічного складу сировини. Згідно з сучасними дослідженнями, штами *L. plantarum* містять широкий спектр ферментів, зокрема бета-глюкозидази та декарбоксилази, які здатні руйнувати складні поліфенольні комплекси кислоти (Liu et al.,

2024). У процесі молочнокислої ферментації відбувається гідроліз зв'язаних фенольних глікозидів з утворенням вільних агліконів, які демонструють значно вищий антиоксидантний потенціал (Wu et al., 2020; Chen et al., 2023). Подібне зростання антиоксидантної активності за рахунок мікробної конверсії фенольних сполук раніше спостерігалось при ферментації яблучного та грушевого соків (Han et al., 2021; Wang et al., 2021), а також низки рослинних екстрактів (Ayar-Sümer et al., 2024).

Отже, найбільш інтенсивне підвищення антиоксидантної активності відбувалося в інтервалі 6–24 год ферментації, коли інтенсивне споживання глюкози (на 39,8 %) забезпечувало активний ріст культури *L. plantarum* LP-115 (від $6,85 \pm 0,10$ до $8,41 \pm 0,11$ lg КУО/мл), що супроводжувалося зниженням активної кислотності середовища від 3,25 до 2,95 та підвищенням титрованої кислотності від $43,8 \pm 1,5$ до $63,4 \pm 2,0$ °T (рис. 2).

Для комплексної оцінки динаміки процесу ферментації та виявлення закономірностей між досліджуваними показниками було застосовано метод аналізу головних компонент (РСА). Як видно з рис. 6, перші дві головні компоненти спільно описують 99,2 % загальної варіабельності даних, причому абсолютна більшість дисперсії (97,8 %) пояснюється першою головною компонентою (PC1). Це свідчить про високу надійність отриманої моделі.

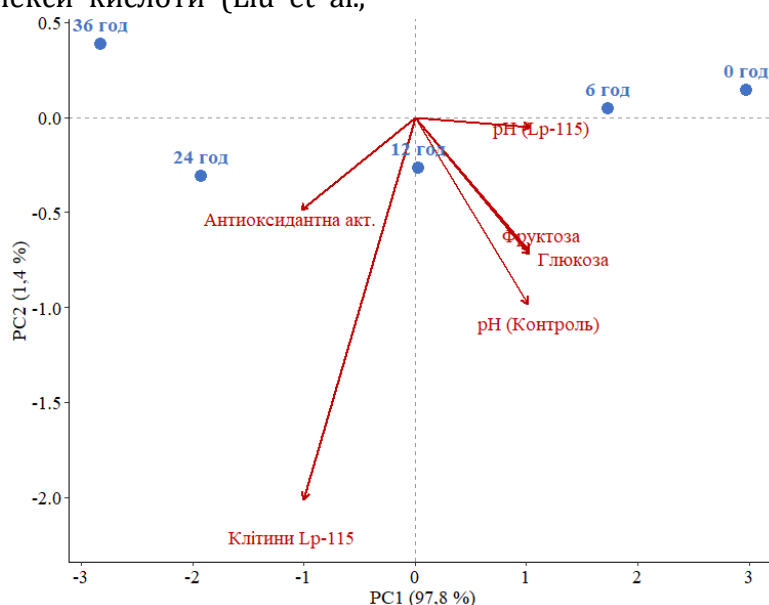


Рис. 6. РСА-біплат просторового розподілу та взаємозв'язку фізико-хімічних, мікробіологічних та біологічних показників у процесі ферментації за участі *L. plantarum* LP-115

На PCA-біплоті чітко прослідковується часовий вектор процесу: точки, що відповідають початковим етапам ферментації (0 та 6 год), локалізовані у правій півплощині (позитивні значення PC1). У міру протікання процесу відбувається закономірне зміщення показників у ліву півплощину, де згруповані кінцеві етапи (24 та 36 год).

Напрямок векторів наочно ілюструє характер кореляційних зв'язків між показниками. Вектори концентрації вуглеводів (глюкози та фруктози) і значень pH щільно згруповані та спрямовані в бік початкових годин процесу, що підтверджує їх високі вихідні значення та подальше синхронне зниження. Натомість вектори чисельності життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 та антиоксидантної активності спрямовані у протилежний бік (до 24 і 36 год). Таке просторове розмежування векторів на майже 180° статистично підтверджує наявність сильної зворотної залежності: інтенсивне споживання вуглеводів та кислотоутворення є прямими драйверами накопичення біомаси лактобактерій та зростання антиоксидантного потенціалу середовища.

Встановлений PCA-аналізом тісний обернений зв'язок між споживанням вуглеводів/кислотоутворенням і накопиченням біомаси й антиоксидантної активності узгоджується з висновком (Zhong et al., 2026), за яким саме мікробна конверсія вуглеводів є основним драйвером вивільнення біоактивних сполук.

Таким чином, отримані дані підтверджують високий технологічний потенціал штаму *L. plantarum* LP-115 та свідчать про перспективність його використання для ферментації плодово-ягідної сировини, що дозволяє не лише поліпшити фізико-хімічні показники, а й суттєво підвищити функціональну цінність кінцевого продукту. Це відповідає сучасним тенденціям щодо біотехнологічних підходів до виробництва функціональних ферментованих напоїв на рослинній основі (Terrou et al., 2019; Rodríguez et al., 2021; Žvirdauskienė et al., 2025).

Практична реалізація запропонованого підходу сприятиме розширенню асортименту функціональних ферментованих продуктів рослинного походження.

Висновки

Дослідження кінетики молочнокислої ферментації соку чорної смородини культурою *L. plantarum* LP-115 показало закономірне зниження активної кислотності (з 3,35 до 2,88) та зростання титрованої кислотності (з 24,0 до 70,2 °T), що супроводжувалося активним розвитком бактеріальної культури – чисельність життєздатних клітин зросла на 2,16 lg КУО/мл. Найбільш інтенсивні зміни всіх досліджених показників відбувалися в інтервалі 12–24 год ферментації, що відповідає фазі активного росту штаму. Протягом цього періоду спостерігалось інтенсивне споживання глюкози та фруктози (загальне зниження на 54,3 % та 40,3 % відповідно), яке супроводжувалося зростанням антиоксидантної активності ферментованої основи з 42,5 до 70,6 %. Зниження швидкості змін більшості досліджених показників після 24 год ферментації свідчить про завершення найбільш інтенсивної фази процесу та дає підстави розглядати 24 год як рекомендовану тривалість ферментації за встановлених умов: температури 37 ± 1 °C, статичних мікроаерофільних умов, дози інокуляту 0,1 % (v/v) та початкової концентрації *L. plantarum* LP-115 $6,12 \pm 0,08$ lg КУО/мл. Результати багатовимірного аналізу статистично підтвердили тісний взаємозв'язок між споживанням вуглеводів, кислотоутворенням, накопиченням біомаси *L. plantarum* LP-115 та підвищенням антиоксидантного потенціалу середовища.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні оптимальних параметрів процесу молочнокислої ферментації соку чорної смородини, що може бути використано для удосконалення технології виробництва ферментованих функціональних напоїв.

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

Під час підготовки цього рукопису використовувалися технології генеративного штучного інтелекту Gemini (Google) для написання програмного коду в середовищі R. Після використання цього інструменту автори ретельно переглянули і відредагували вміст за потреби та несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію / During the preparation of this manuscript, the generative artificial intelligence technology Gemini (Google) was used to write programming code in the R environment. After using this tool, the authors carefully reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the final published version.

References

- Anumudu, C. K., Miri, T., & Onyeaka, H. (2024). Multifunctional applications of lactic acid bacteria: Enhancing safety, quality, and nutritional value in foods and fermented beverages. *Foods*, 13, 3714. <https://doi.org/10.3390/foods13233714>
- Ayar-Sümer, E. N., Verheust, Y., Özçelik, B., & Raes, K. (2024). Impact of lactic acid bacteria fermentation based on biotransformation of phenolic compounds and antioxidant capacity of mushrooms. *Foods*, 13(11), 1616. <https://doi.org/10.3390/foods13111616>
- Ayed, L., M'hir, S., & Hamdi, M. (2020). Microbiological, biochemical, and functional aspects of fermented vegetable and fruit beverages. *Journal of Chemistry*, 2020, 5790432. <https://doi.org/10.1155/2020/5790432>
- Buruleanu, L., Nicolescu, C. L., Avram, D., Bratu, M. G., & Manea, I. (2009). Survival of probiotic bacteria during lactic acid fermentation of vegetable juices. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 15(1), 132–139.
- Chen, W., Xie, C., He, Q., Sun, J., & Bai, W. (2023). Improvement in color expression and antioxidant activity of strawberry juice fermented with lactic acid bacteria: A phenolic-based research. *Food Chemistry: X*, 17, 100535. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100535>
- da Silva Vale, A., Venturim, B. C., da Silva Rocha, A. R. F., Martin, J. G. P., Maske, B. L., Balla, G., De Dea Lindner, J., Soccol, C. R., & de Melo Pereira, G. V. (2023). Exploring microbial diversity of non-dairy fermented beverages with a focus on functional probiotic microorganisms. *Fermentation*, 9(6), 496. <https://doi.org/10.3390/fermentation9060496>

- Dumuta, A., Vosgan, Z., Giurgiulescu, L., Mihali, C., & Mihalescu, L. (2025). Kefir and *Lactobacillus plantarum* cultures in the production of fermented blueberry juices. *Sustainability*, 17, 10488. <https://doi.org/10.3390/su172310488>
- DuPont Nutrition & Biosciences. (2018). *Lactobacillus plantarum* Lp-115®: Technical memorandum (TM 50-2E). https://probiom.com/wp-content/uploads/2020/05/TM-50_2e-Lactobacillus-Plantarum-LP_115_d.pdf
- Fessard, A., & Remize, F. (2019). Genetic and technological characterization of lactic acid bacteria isolated from tropically grown fruits and vegetables. *International Journal of Food Microbiology*, 301, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.05.003>
- Garcia, C., Guerin, M., Souidi, K., & Remize, F. (2020). Lactic fermented fruit or vegetable juices: Past, present and future. *Beverages*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/beverages6010008>
- Han, M., Zhang, M., Wang, X., Bai, X., Yue, T., & Gao, Z. (2021). Cloudy apple juice fermented by *Lactobacillus* prevents obesity via modulating gut microbiota and protecting intestinal tract health. *Nutrients*, 13(3), 971. <https://doi.org/10.3390/nu13030971>
- Laaksonen, O. A., Mäkilä, L., Sandell, M. A., Salminen, J.-P., Liu, P., Kallio, H. P., & Yang, B. (2014). Chemical-sensory characteristics and consumer responses of blackcurrant juices produced by different industrial processes. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2877–2888. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1316-8>
- Li, R., Zhang, Y., Zhang, T., Liu, J., Liu, H., & Duan, C. (2022). The investigation on the characteristic metabolites of *Lactobacillus plantarum* RLL68 during fermentation of beverage from by-products of black tea manufacture. *Current Research in Food Science*, 5, 1320–1329. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.07.014>
- Liu, S., He, Y., He, W., Song, X., Peng, Y., Hu, X., Bian, S., Li, Y., Nie, S., & Yin, J. (2024). Exploring the biogenic transformation mechanism of polyphenols by *Lactobacillus plantarum* NCU137 fermentation and its enhancement of antioxidant properties in wolfberry juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72, 12752–12761. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01393>
- Mirsalami, S. M., & Alihosseini, A. (2023). The effect of *Lactobacillus plantarum* LP-115 strain on improving the savor and aroma of milk containing grape sap through fermentation. *Food and Humanity*, 1, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.06.013>
- Rodríguez, L. G. R., Gasga, V. M. Z., Pescuma, M., Van Nieuwenhove, C., Mozzi, F., & Burgos, J. A. S. (2021). Fruits and fruit by-products as sources of bioactive compounds: Benefits and trends of lactic acid fermentation in the development of novel fruit-based functional beverages. *Food Research International*, 140, 109854. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109854>
- Satora, P., Skotniczny, M., & Maziarek, M. (2025). Characteristics of novel fermented cloudy fruit juices produced using *Lactiplantibacillus plantarum* and lactic acid-producing *Lachancea* spp. yeasts. *Molecules*, 30, 3928. <https://doi.org/10.3390/molecules30193928>
- Selvaraj, S., & Gurumurthy, K. (2023). An overview of probiotic health booster-kombucha tea. *Chinese Herbal Medicines*, 15(1), 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.chmed.2022.06.010>

- Terpou, A., Papadaki, A., Lappa, I. K., Kachrimanidou, V., Bosnea, L. A., & Kopsahelis, N. (2019). Probiotics in food systems: Significance and emerging strategies towards improved viability and delivery of enhanced beneficial value. *Nutrients*, 11(7), 1591. <https://doi.org/10.3390/nu11071591>
- Tian, Y., Laaksonen, O., Haikonen, H., Vanag, A., Ejaz, H., Linderborg, K., Karhu, S., & Yang, B. (2019). Compositional diversity among blackcurrant (*Ribes nigrum*) cultivars originating from European countries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(19), 5621–5633. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00033>
- Wang, L., Zhang, H., & Lei, H. (2021). Phenolics profile, antioxidant activity and flavor volatiles of pear juice: Influence of lactic acid fermentation using three *Lactobacillus* strains in monoculture and binary mixture. *Foods*, 11(1), 11. <https://doi.org/10.3390/foods11010011>
- Wu, C., Li, T., Qi, J., Jiang, T., Xu, H., & Lei, H. (2020). Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice. *LWT*, 122, 109064. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109064>
- Yang, W., Kortenesniemi, M., Ma, X., Zheng, J., & Yang, B. (2019). Enzymatic acylation of blackcurrant (*Ribes nigrum*) anthocyanins and evaluation of lipophilic properties and antioxidant capacity of derivatives. *Food Chemistry*, 281, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.111>
- Yi, C., Li, Y., Zhu, H., Liu, Y., & Quan, K. (2021). Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the volatile flavors of mung beans. *LWT*, 146, 111434. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111434>
- Zhong, X.-S., Fan, S.-L., Keremu, B., Zhao, J.-Y., Duan, Y.-N., Yang, L., & Shi, L. (2026). *Lactobacillus plantarum* M3 fermentation enhances mulberry juice antioxidant capacity: Metabolomic analysis. *Foods*, 15(5), 906. <https://doi.org/10.3390/foods15050906>
- Žvirdauskienė, R., Jonik, V., Bašinskienė, L., & Cižeikienė, D. (2025). Fruit and vegetable juices as functional carriers for probiotic delivery: Microbiological, nutritional, and sensory perspectives. *Microorganisms*, 13, 1272. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13061272>

Received: 23.07.2026. Accepted: 19.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Короткова І., Чайка Т., Кожушко К., Тристан Д., Бараболя О. Дослідження процесу ферментації соку чорної смородини культурою *Lactobacillus plantarum* LP-115. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 279-292. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.20>

Cite this article in APA style as:

Korotkova, I., Chaika, T., Kozhushko, K., Trystan, D., & Barabolia, O. (2026). Doslidzhennia protsesu fermentatsii soku chornoi smorodyny kulturoiu *Lactobacillus plantarum* LP-115 [Study of black currant juice fermentation process by *Lactobacillus plantarum* LP-115]. *Biota. Human. Technology*, (2), 279-292. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.20> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Korotkova I. [*in Ukrainian: Короткова І.*] ¹, PhD in Chem. Sc., Assoc. Prof., email: 2irinakorotkova10@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0577-9634

Department of Agriculture and Agrochemistry named after V.I. Sazanov, Poltava State Agrarian University
1/3 Skovorody Street, Poltava, 36003, Ukraine

Chaika T. [*in Ukrainian: Чайка Т.*] ², PhD in Econ. Sc., email: chayka_ta@ukr.net
ORCID: 0000-0002-5980-7517

Department for Ecological and Economic Development of Rural Areas, Academy of Sciences of Technological
Cybernetics of Ukraine, Poltava Department
3 Ivan Bank Street, Poltava, 36003, Ukraine

Kozhushko K. [*in Ukrainian: Кожушко К.*] ³, PhD Student, email: kateryna.blahodar@pdau.edu.ua
ORCID: 0009-0002-5697-283X

Department of Agriculture and Agrochemistry named after V.I. Sazanov, Poltava State Agrarian University
1/3 Skovorody Street, Poltava, 36003, Ukraine

Trystan D. [*in Ukrainian: Тристан Д.*] ⁴, PhD Student, email: daria.trystan@pdau.edu.ua
ORCID: 0009-0008-8854-0218

Department of Agriculture and Agrochemistry named after V.I. Sazanov, Poltava State Agrarian University
1/3 Skovorody Street, Poltava, 36003, Ukraine

Barabolia O. [*in Ukrainian: Бараболя О.*] ⁵, PhD in Agric. Sc., Assoc. Prof., email: olga.barabolia@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0003-4123-9547

Department of Plant Science, Poltava State Agrarian University
1/3 Skovorody Street, Poltava, 36003, Ukraine

¹ Study design, manuscript preparation.

² Study design, manuscript preparation, statistical analysis.

³ Data collection, study design.

⁴ Data collection, manuscript preparation.

⁵ Data collection, manuscript preparation.



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. Only publications for which a correct and active DOI or a valid URL providing access to the relevant document can be included in the list of references. 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

ПІД *PLATANUS* L. HA 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 *Quercus-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 *Quercus-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 *Quercus-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 *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. 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 bht.journal.nuchc@gmail (indicate the author's last name in the letter).

EDITORS OF THE JOURNAL 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 Standards 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, перевіrivши 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. До списку використаних джерел можуть бути включені лише публікації, для яких наведено коректний та активний DOI або достовірний URL, що забезпечує доступ до відповідного документа. 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 [АРА стилем](#). Джерела, які написані у оригіналу мовою з кириличним написанням, подаються двома абзацами таким чином: спочатку переклад англійською мовою (не транслітерація!), оформлений за [АРА 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

ПІД *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 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. 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.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 / Національний університет
«Чернігівський колегіум» імені Т.Г.Шевченка; гол. ред.
О.В. Лукаш. 2026. №2. 309 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
31.08.2026 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